

**И.М. Яшин, И.И. Васенев, В.А. Черников**

# **ЭКОГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТА**



**Москва 2015**

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –  
МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА

Факультет почвоведения, агрохимии и экологии  
Кафедра экологии

И.М. Яшин, И.И. Васенев, В.А. Черников

# ЭКОГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТА

Учебное пособие  
для бакалавров, обучающихся по направлению  
«Экология и природопользование»

(Издание 2-е – дополненное и иллюстрированное)

Научный редактор - доктор биологических наук,  
профессор И.М. Яшин

Москва  
Издательство РГАУ-МСХА  
2015

УДК 504.54: 631.42  
ББК 40.35:85+65.281.635  
Я968

**Яшин И.М., Васенев И.И., Черников В.А. Экогеохимия ландшафта.** Учебное пособие // И.М. Яшин, И.И. Васенев, В.А. Черников. Ред. И.М. Яшин. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2015. - 305 с.

*Распределение нагрузки:* Яшин И.М. – введение, главы 1-7, задачи, научная редакция; И.И. Васенев, В.А. Черников – гл. 7, заключение, тесты совместно с И.М. Яшиным.

В учебном пособии «Экогеохимия ландшафта» изложены базовые сведения по *экогеохимической оценке ландшафтов и почв* некоторых регионов РФ. Охарактеризован фактический материал, накопленный авторами на стационарах в зоне тайги за период 1972 - 2015 гг. На выбранных ключевых участках авторами проводятся почвенно-экологический мониторинг, исследуется *водная миграция веществ с оценкой экологической безопасности почв и поверхностных вод, осуществляется контроль за эмиссией газов с помощью современных приборов*. В качестве локальных фоновых участков с 2004 г. в таежной зоне выбраны фации и почвы *Соловецкого архипелага*; изучаются также почвы и экосистемы заповедников Карелии «Кивач» и «Кижиги». С 2011 года аналогичные изыскания начаты в лесных, луговых фациях и на залежах **ЦЛГПБЗ** в Тверской области. Полученные сведения позволили авторам *диагностировать почвы* не только в качестве *самостоятельных природных тел* (по Докучаеву В.В.), но и как компоненты и продукты функционирования конкретных экосистем. *Таким образом, почва – это подсистема в экосистеме*. Подобный методологический подход дополняет современные представления о генезисе почв, углубляет познание экологических функций почв, например, биогенную кислотность. В этой связи авторы подробно рассматривают некоторые процессы почвообразования (оглеение и подзолообразование), а также функции фульвокислот и генезис *биогенной кислотности таежной экосистемы, а не только почвы, как это традиционно проводится*.

Содержание учебного пособия по дисциплине «Экогеохимия ландшафта» включает теоретические аспекты дисциплины, тесты, задачи, темы рефератов и вопросы для самоконтроля. Авторами подготовлена к изданию Рабочая тетрадь.

Книга предназначена для бакалавров, магистров и аспирантов ВУЗов естественнонаучного профиля – почвоведов, экологов, геохимиков, агрохимиков.

**На обложке:** лесостепные ландшафты, в частности, в Среднем Поволжье России издавна испытывают эрозию, длительные засухи, особенно в **2007, 2010-2015 гг.** Аридизация климата вызывает здесь пожары, засоление почв, деградацию черноземов и их гумусовых веществ. Авторами установлено, что *черноземы выщелоченные в долинах рек Среднего Поволжья трансформируются сначала в черноземы солонцеватые, а затем в солонцы черноземные*. В почвах появляется плотная «плужная подошва», вызывающая слитизацию мелкозема. На верхнем снимке – исток большого оврага у д. Марфино в Аткарском районе: процесс оврагообразования сопряжен с *засолением черноземов, образованием опок и водной миграцией гуматов и фульватов натрия*; на нижнем снимке – природная *хроматограмма продуктов деградации гумусовых веществ* в слое кварцевого песка на древней речной террасе. Такой профиль по морфологии похож **на дерново-подзол таежной зоны**. Поэтому *диагностика почв в поле* по их морфологии должна обязательно дополняться сведениями о ландшафтах и фациальных процессах почвообразования. Именно эти процессы и изучаются нами с 2006 года в динамике в ландшафтах учхоза «Муммовское» РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева в Саратовской области на пашне, сенокосах, смешанном лесу, лесополосах, пойме и террасах долины реки Большой Колышлей, обычно в почвенно-экологических катенах (фото И.М. Яшина, 16.10.2015).

**Рецензент:** доктор биологических наук, профессор В.Г. Мамонтов.

**ISBN...**

© Яшин И.М., Васенев И.И., Черников, 2015

© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2015

© Издательство РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2015

## Оглавление

|  |            |
|--|------------|
| Введение.....  | 5          |
| Глава 1. Эколого-геохимическая характеристика ландшафтов.....                                    | 8          |
| 1.1 Таксономия и загрязнение аграрных ландшафтов.....  | 8          |
| 1.2. Эко-геохимическая оценка зон загрязнения ландшафтов.....                                    | 14         |
| <i>Вопросы для самоконтроля.....</i>   | <i>17</i>  |
| Глава 2. Схема каскадного геохимического ландшафта.....  | 18         |
| 2.1. Геохимическая характеристика ландшафтов.....  | 18         |
| <i>Вопросы для самоконтроля.....</i>   | <i>22</i>  |
| Глава 3. Элементарные геохимические ландшафты.....   | 23         |
| 3.1. Таксономия и оценка барьеров миграции.....  | 23         |
| 3.2. Биогеохимические барьеры.....   | 23         |
| <i>Вопросы для самоконтроля.....</i>   | <i>26</i>  |
| Глава 4. Физико-химические барьеры миграции.....   | 27         |
| 4.1. Сорбционные барьеры миграции.....   | 29         |
| 4.2. Количественная оценка барьеров миграции.....  | 30         |
| <i>Вопросы для самоконтроля.....</i>   | <i>34</i>  |
| Глава 5. Трансформация веществ на барьерах миграции.....   | 35         |
| 5.1. Дегградация гумусовых веществ.....  | 35         |
| 5.2. Эко-геохимическая оценка подзолообразования.....  | 37         |
| 5.3. Диагностика и оценка свойств почвы.....   | 38         |
| 5.4. Теория почвообразования.....  | 40         |
| 5.5. Новое в концепции подзолообразования.....   | 41         |
| 5.6. Процесс глееобразования.....  | 45         |
| <i>Вопросы для самоконтроля.....</i>   | <i>46</i>  |
| Глава 6. Изучение водной миграции веществ в ландшафтах.....                                      | 47         |
| 6.1. Оценка масштаба водной миграции веществ.....  | 47         |
| 6.2. Методология изучения абиогенных потоков веществ.....  | 50         |
| 6.3. Интенсивность водной миграции элементов в ландшафтах.....                                   | 52         |
| 6.4. Диагностика кислотности таежной экосистемы.....   | 53         |
| 6.4.1. От теории к практике применения хроматографии в эколого-<br>геохимических изысканиях..... | 55         |
| 6.5. Исследование экологических функций фульвокислот таежных экосистем.....                      | 56         |
| <i>Вопросы для самоконтроля.....</i>   | <i>59</i>  |
| Глава 7. Эко-геохимические аспекты превращения веществ в почвах.....                             | 60         |
| 7.1. Химическое загрязнение почвенного покрова.....  | 62         |
| 7.2. Методы, используемые при очистке и дезинфекции природных вод.....                           | 66         |
| 7.3. Особенности применения метода сорбционных лизиметров.....                                   | 69         |
| 7.4. Эколого-геохимические аспекты эволюции черноземов.....                                      | 75         |
| 7.5. Ландшафты и почвы Юрьев-Польского ополья Ярославской области.....                           | 81         |
| 7.6. Эко-геохимическая оценка процесса опустынивания на примере Ливии.....                       | 96         |
| 7.7. Экологические риски и их диагностика на примере почв Ливии.....                             | 112        |
| 7.8. Моделирование почвенно-экологических процессов.....   | 126        |
| 7.9. Дегградация черноземов лесостепной зоны - причины и экологические следствия.....            | 162        |
| 8.0. Аналитические методы диагностики веществ.....   | 177        |
| 8.1. Экологическая концепция гумификации растительных остатков в почвах тайги.....               | 194        |
| 8.2. Диагностика $k_{тр}$ растительных остатков в почвах тайги.....                              | 203        |
| 8.3. Комплексная оценка загрязнения почв и ландшафтов.....                                       | 208        |
| <i>Вопросы для самоконтроля.....</i>   | <i>278</i> |
| <b>Задачи.....</b>   | <b>279</b> |
| <b>Решения задач и ответы.....</b>   | <b>281</b> |
| <b>Тесты по курсу «Экогеохимия ландшафта».....</b>   | <b>283</b> |
| <b>Библиография.....</b>   | <b>290</b> |
| <b>Темы рефератов и вопросы для зачета.....</b>  | <b>294</b> |
| <b>Заключение.....</b>   | <b>298</b> |
| <b>Приложение.....</b>   | <b>300</b> |

## Введение

Во многих ландшафтах России заметно активизировались экологические риски при возделывании сельскохозяйственных культур, а также масштабные геодинамические явления (наводнения, засухи, масштабные пожары, аномальные явления погоды, ухудшение качества поверхностных вод). *От наводнений страдают люди и промышленные объекты, часто из-за некорректного размещения строений в ландшафтах: например, в поймах рек нельзя размещать постройки и свалки отходов.* Климатические условия в последние годы стали неустойчивыми, а порой и непредсказуемыми. Резкие флуктуации погоды негативно сказываются на безопасности людей, качестве и комфорте их жизни, а также результатах деятельности аграрного комплекса, прежде всего, южных регионов РФ. Вектор прогноза погоды для степных и лесостепных ландшафтов РФ – усиление засух и опустынивания.

Цель дисциплины «Экогеохимия ландшафта» - выработать у студентов *навыки, умения и компетенции*, используемые затем ими в практической деятельности для *оценки эколого-геохимических ситуаций* в различных ландшафтах. Учебное пособие подготовлено к изданию профессорами кафедры экологии И.М. Яшиным, И.И. Васеневым, В.А. Черниковым к 150-летию со дня основания РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Напомним, что под редакцией И.М. Яшина в 2010 году было издано в нашем университете аналогичное учебное пособие (при финансовой поддержке проекта TEMPUS ES), но в нем не было некоторых разделов, а также *фотоиллюстраций, улучшающих доказательную базу и наглядность объекта.*

Настоящее учебное пособие по дисциплине «Экогеохимия ландшафта» включает *эко-геохимическую* характеристику ландшафтов и почвенно-геохимических барьеров миграции, оценку процессов почвообразования (лессиваж, оглеение, выщелачивание и оподзоливание), *сведения об о каскадных элементарных геохимических ландшафтах и масштабном опустынивании*, которое в ближайшие годы будет играть важную роль в деградации почв, ухудшении качества вод и ландшафтов сухостепной, степной и лесостепной зон России.

Темы данного учебного пособия объединяют сведения по основным разделам курса «Экогеохимия ландшафта» в соответствии с его учебной программой 3-го поколения. В учебном пособии представлены теоретические основы курса «Экогеохимия ландшафта». *Авторами для занятий подготовлена Рабочая тетрадь по дисциплине «Экогеохимия ландшафта».* На первом занятии студенты получают рабочие тетради у педагога и самостоятельно приступают к выполнению заданий, в частности, по административным районам Московской области.

Изучение учебного материала курса на семинарах и лабораторно-практических занятиях позволит бакалаврам овладеть полевыми методами эко-геохимических исследований, навыками чтения топографических карт. Студенты научатся объяснять ландшафтообразующие и почвенно-

экологические процессы (опустынивание ландшафтов, деградация черноземов), составлять макет эколого-геохимической карты и экологического профиля, а также правильно описывать в специальном полевом дневнике ареалы растительности, почв, рельефа, почвообразующих пород; оценивать в агроландшафтах почвенно-геохимические барьеры миграции, на которых аккумулируются ксенобиотики; выявлять характер водной эрозии и дегумификации почв.

2015 год в России объявлен годом почв. Это весьма знаменательно. В этой связи по каждой теме защищается, например, фрагмент эколого-геохимической карты, эко-геохимическая catena и почвы применительно к ландшафтам одного из административных районов Подмосковья. Не набравшие *минимума баллов* студенты (в зависимости от числа выполненных ими работ), *не допускаются к итоговой аттестации*. С 2016 года баллы, как известно, совместно с общественной и научной работой будут учитываться при начислении стипендии студентам.

На практических занятиях бакалавры будут ставить простые лабораторные работы с использованием некоторых инструментальных методов физико-химического анализа (они выполняются в новой агроэкологической лаборатории ЛАМП кафедры экологии РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева), а также *решать простые эко-геохимические задачи*. Большое внимание уделяется диагностике в почвах, природных водах и кормах, в частности, *ионов тяжелых металлов и иных экотоксикантов*. Полученные сведения помогут студентам более эффективно *решать задачи по экологическому нормированию*, оценке качества агроэкосистем, поверхностных вод суши, трансформации и водной миграции веществ и ксенобиотиков.

Практические и лабораторные работы по дисциплине «Экогеохимия ландшафтов» могут дополнительно включать специальные расчетные *экологические задачи, тесты*, «круглые столы» и вебинары по некоторым разделам курса – очистке вод для пищевых целей, диагностике «плужной подошвы», а также *контрольные вопросы и задания, ролевые экологические «игры»*. Все определяется реальной учебной нагрузкой.

В частности, приоритетной темой *может быть оценка эколого-геохимической ситуации в связи с масштабными пожарами и аномальной жарой в центральных регионах России в 2010-2015 г.* Или экологическая оценка качества сапропеля, почвенного покрова. Здесь актуальны вопросы деградации черноземов, эрозия дерново-подзолистых почв, свалки ТБО в поймах рек Подмосковья; особенности распространения торфяных пожаров и задымление воздуха диоксинами, частицами золы, пыли и сажи. Важную роль приобретает исследование проблем, связанных с засолением черноземов и каштановых почв аридных регионов России. Здесь следует оценить *масштабные геодинамические процессы*, обусловленные нерациональным использованием поверхностных вод при орошении, чрезмерной распашкой степей, перевыпасом скота, вторичным засолением почвенного покрова

вследствие увлечения и применением «чистых паров», вызывающих очаговое опустынивание, пыльные бури, деградацию почв, «ожелезнение» поверхностных вод.

Указанные почвенно-геодинамические процессы изучены неполно, и входят в приоритетные экологические риски, которые *могут неожиданно проявиться* в южных ландшафтах и почвенном покрове России. Это приводит не только к снижению качества продукции растениеводства и урожайности возделываемых культур, но и к утрате устойчивости экосистем. *Напомним, что 2015 год в России – это год почв. Им и нужно уделять подобающее внимание. Информация о ежегодном получении рекордных урожаев на черноземах требует проверки независимыми экспертами: аграрные экосистемы, ежегодно теряют огромные массы элементов питания (азота, фосфора, калия, кальция и микроэлементов) и требуют время на восстановление эффективного почвенного плодородия (3-4 года).* Кроме восстановления пищевого режима, в черноземах существуют и иные экологические риски, например, низкое содержание доступной влаги и низкая биологическая активность почв, активизируемая с помощью травосеяния. Экологи и почвоведы хорошо знают: урожайность *не может иметь непрерывно возрастающий тренд*, здесь типичны флуктуации.

**Особенно тревожными** являются новые почвенно-экологические сведения, полученные авторами по деградации черноземов и их гумусовых веществ. Данной проблеме посвящены разделы 7.4 и 7.8.

На наш взгляд, черноземы Среднего Поволжья уже давно испытывают масштабную и глубокую деградацию. Ведущие специалисты в области почвоведения *пытались понять загадку данного природного феномена*, но их усилия в экспериментальных исследованиях были или неудачными, или неполными. Негативные явления, связанные с деградацией черноземов, специалистами преуменьшались и даже замалчивались. В то же время исследователи (И.С. Кауричев, 1957; П.А. Щербаков и И.И. Васенев, 1980; И.М. Яшин, 2012, 2015; молдавские специалисты) приводили фактические данные о масштабной деградации черноземов и их трансформации *в черноземоподобные почвы и непочвенные образования.* Экологическое качество черноземов напрямую обуславливает экологическую безопасность поверхностных вод. Засоление и осолонцевание черноземов способствует «ожелезнению» грунтовых и речных вод: ухудшению их гидрохимических и эпидемиологических свойств. Стоимость таких почв заметно ниже в сравнении с не деградированными черноземами. Впервые обратил внимание на деградацию черноземов, как известно, основоположник научного почвоведения В.В. Докучаев в работах «Русский чернозем» и «Наши степи прежде и теперь».

Авторы благодарны рецензенту профессору В.Г. Мамонтову за дискуссии и полезные замечания.

Пожелания просим присылать по адресу: e-mail – [ivan.yashin2012@gmail.com](mailto:ivan.yashin2012@gmail.com)



## Глава 1. Эколого-геохимическая характеристика ландшафтов

### 1.1. Таксономия и загрязнение аграрных ландшафтов

Рассмотрим данную тему кратко, главным образом, на примере ландшафтов таежной зоны России.

*Экологи отмечают, что антропогенная нагрузка на таежные ландшафты в последние десятилетия существенно повысилась, что привело к их заметному разрушению и масштабной деградации (рис. 1). Это сказалось на составе атмосферы земного шара и климате. К негативным явлениям добавились и масштабные пожары, причина которых имеет часто антропогенный характер, связанный с несанкционированными рубками леса.*



Рис. 1. **Остров Большой Соловецкий**: вторичный сильно завалуненный лес. Подобные участки преобладают на территории Соловков – коренные хвойные леса были давно вырублены; лишь на заметном удалении от Соловецкого Кремля еще сохранились небольшие урочища **старовозрастных ельников и сосняков** среди болот, озер на повышенных каменистых моренных холмах и увалах; эти участки очень пожароопасные (фото И.М. Яшина, 2004).

Эти факторы являются движущей силой сукцессий биоты и почвенного покрова в нативных экосистемах. Промышленные (крупномасштабные) рубки и пожары нанесли особенно ощутимый урон экосистемам тайги в Тюменской и Иркутской областях, в Забайкалье. *В Архангельской области пуски ракет с космодрома «Плесецкий» заметно загрязнили леса Плесецкого, Мезенского и других районов.* Наблюдается отравление водных ресурсов озер и болот компонентами ракетного топлива (Юфит, 2002). Колоссальные потери лесных ресурсов наблюдаются в зоне тайги при строительстве гидроэлектростанций и заполнении водохранилищ: богатые природные ресурсы пойменных ландшафтов – основа для развития животноводства были затоплены, а кормовая база животноводства – уничтожена.

Помимо интенсивных заготовок древесины в зоне тайги активно проводятся геологоразведочные работы на нефть, газ, уголь, золото, алмазы; экосистемы страдают от *техногенных аэральных выбросов* – пыли, дыма, и



«кислотных дождей» промышленных предприятий. В результате ухудшается экологическая обстановка: снижается биологическая продуктивность лесов и влагозапасы ландшафтов. Грибы, ягоды и лекарственные травы (а также мед) накапливают **тяжелые металлы и иные экотоксиканты** (пестициды, диоксины, фенолы, микотоксины, СПАВ и иные); при этом ухудшается качество почв, гумуса, поверхностных природных вод (Яшин И.М, Шишов Л.Л., Раскатов В.А., 2000).

*В любой ландшафтной зоне — от тундр до пустынь — уничтожение или нарушение целостности растительного покрова, сформированного на холмисто-увалистом и останцовом рельефе, вызывает глубокую, нередко необратимую, трансформацию всего ландшафтного облика. Антропогенез многообразен: среди садов, чайных и овощных плантаций и виноградников нередко можно встретить свалки бытовых отходов, бревна, ржавые бочки и «горы мусора», ухудшающие эстетический облик ландшафтов (рис. 2).*



Рис. 2. **Остров Большой Соловецкий**: побережье островов Соловецкого архипелага локально захлавлено. Поэтому первое восприятие северных ландшафтов Соловков после долгого и непростого пути сталкивается у людей с **неухоженностью пирса, бухты и береговых коммуникаций**. Но это впечатление *быстро исчезает после посещения Соловецкого Кремля*: завораживают его величие, порядок, таинственность исторических хроник прошлых событий и судеб, дошедших до наших дней. Постигание людьми феномена Соловков продолжается и окупается сторицей (фото И.М. Яшина, 2004).

### 1.1. Таксономия аграрных ландшафтов

Антропогенно измененные ландшафты — не эпизодические территории на поверхности Земли, а нередко преобладающие природно-территориальные комплексы (ПТК) во многих государствах и географических зонах: *поросшие лесом карьеры, пустоши; известняково-карстовые плато и низкогорья стран средиземноморского бассейна (Испании, Италии, Греции, Туниса, Марокко, Ливии, Египта, Сирии, Израиля, Турции), поля пшеницы, подсолнечника и рисовые чеки, сады и виноградники, водохранилища и пруды,*

лесные посадки и лесопарковые массивы в городах, созданные творческим трудом людей. Отметим, степень преобразования природных ландшафтов в результате реализации конкретных социально-экономических проектов определяется следующими факторами:



Рис. 3. Бывший лесной ландшафт Австрии, эстетически измененный людьми с формированием культурных пастбищ, охотничьих угодий и туристических комплексов.

- 1) численностью населения,
- 2) общественным и экономическим укладами,
- 3) энергетической базой и природными ресурсами,
- 4) продолжительностью антропогенеза,
- 5) масштабами региона (страны).

Люди за долгий период своего существования привыкли к тому, что ландшафт непрерывно обновляется — восстанавливается и очищается, возобновляются природные ресурсы — продукты питания, сырье. Так было раньше. Однако в погоне за удовлетворением *своих непрерывно растущих потребностей* люди нарушают биогеохимические циклы и равновесие между компонентами экосистем и ландшафтов, что нередко приводит к *необратимой деградации почв, растительности и поверхностных вод*.

Локальные разрушения в ландшафтной сфере являются прообразом тех экологических катастроф, которые могут в ближайшие десятилетия перерасти в глобальные, если коренным образом не изменить отношение людей к почвам и экосистемам. Рассмотрим некоторые ландшафты.

**Полевые аграрные ландшафты** (рис.4-6) — это пахотные сельскохозяйственные угодия. В зоне тайги после раскорчевки и сведения леса в севообороты включаются вновь освоенные почвы подзолистого типа. При этом новый пахотный горизонт включает компоненты подзолистого (гор.  $A_2$  или **EL**) и элювиально-иллювиального горизонта ( $A_2B$  или **EL/B**), и без длительного (и целенаправленного) окультуривания пахотный горизонт

будет еще десятки лет иметь низкий уровень плодородия: незначительное содержание доступных форм азота, фосфора, калия и кальция, а также очень кислую реакцию среды ( $pH < 4,5$ ) и фульватный состав гумуса, который



Рис. 4. Полевой ландшафт в лесостепной зоне – учхоз «Муммовское» Саратовской области: скоро уборка зерновых культур (фото И.М. Яшина, 2012).

имеет высокую миграционную способность. Часто он залегает на горизонте **В**. Однако при полевом картировании молодые специалисты нередко не учитывают выше сказанное и выделяют совершенно другой тип почв, а не **окультуренные дерново-слабоподзолистые почвы**. Почему? Зачем же тогда проводили окультуривание только что «вышедших» из-под леса дерново-подзолистых и подзолистых почв в течение десятков лет? Причем, понятно, что глубоких изменений пахотные почвы на типовом уровне не претерпели, а изменились *только их свойства в верхнем горизонте*. Если прекратить приемы окультуривания, то такие почвы быстро вернуться к исходному состоянию, характерному для лесных почв. Именно лесная таежная биота и произвели подзолистые и дерново-подзолистые почвы. При размещении с.-х. культур в севооборотах следует учитывать своеобразие *элементарных геохимических ландшафтов (ЭГЛ)*. Так, на водоразделах (меж балочном, меж овражном и между речном) можно сочетать углубление пахотного горизонта с химической мелиорацией. В этих условиях размещают картофель и технические культуры, требующие мощного пахотного горизонта, который при обработках почвы не будет эродирован. В транс-элювиальных ЭГЛ (на склонах мореных холмов, увалов и гряд) целесообразно возделывать многолетние травы (злаковые и бобовые), используя их в качестве барьеров — почвозащитных севооборотов (рис. 4). Транс-аккумулятивные ЭГЛ лучше отводить *под овощные культуры и плодовые кустарники*. Нередко эти экологические объекты отличаются сезонным переувлажнением почв и оглеением ряда генетических горизонтов. Здесь также нецелесообразно размещать плодовые культуры.



**Садовые ландшафты** отличаются заметным разнообразием их видов в пространстве. Например, в тропиках помимо плодово-ягодных деревьев и кустарников возделывают травянистые многолетники — банан и ананас. *Экология садовых плантаций* стоит ближе к лесо-культурным, чем к полевым



Рис.5. Полевой ландшафт в подзоне южной тайги на острове Кижы в Онежском озере (Музей деревянного зодчества) в Карелии – один из объектов фонового мониторинга кафедры экологии РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; на переднем плане пахотная дерновая супесчаная почва, развитая на **шунгитах** (высокоуглеродистых сланцах) - фото И.М. Яшина (2009). В разделе 8.3. о таких почвах мы расскажем подробнее.



Рис. 6. Надпойменные террасы реки Большой Колышлей в учхозе «Муммовское» Саратовской области заняты **полевыми ландшафтами**; в пойме реки находятся **садово-огородные и сенокосные ландшафты** (фото И.М. Яшина, 2015).

ландшафтам. Однако низкий уровень самоорганизации и самовозобновления, потребность в высокой агротехнике, поливах и правильном выборе участков

под сады определяют принадлежность садов к классу сельскохозяйственных или агроландшафтов.

Особую разновидность садовых ландшафтов образуют **виноградники**. Для получения высококачественной продукции эти плантации нуждаются не только в постоянной обработке почвы, но и внесении значительных доз органических и минеральных удобрений, а также *микроэлементов*. **Сады размещаются, как правило, в ландшафтах автономного и транс-элювиального типов с глубоким залеганием грунтовых вод, отсутствием в профилях почв признаков засоления, оглеения, плотных коровых горизонтов и не загрязненных техногенными токсичными для биоты продуктами (углеводородами, диоксинами, пестицидами).** Садовые культуры требовательны к теплу и влаге, поэтому для них проводят периодические влагозарядковые поливы и подкормки удобрениями.

**Овощные плантации** обычно размещают в поймах рек с плодородными пойменными почвами. Здесь нужно учитывать близкое залегание грунтовых вод. Такие плантации, например, в Подмосковье характерны для Окской и поймы реки Москвы. К сожалению, пойменные почвы овощных плантаций уже заметно химически загрязнены, в частности, ионами тяжелых металлов, например, на реке Оке и Москве-реке. Поэтому нужен мониторинг качества продукции.

В значительной мере *загрязнение пойменных почв* связано с незаконным размещением в поймах рек твердых бытовых отходов (ТБО), а также сбросом в речные воды стоков промышленных объектов (города Серпухов и Коломна).

### Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите основные типы ландшафтов Подмосковья.
2. Назовите основные компоненты пойменного ландшафта.
3. Назовите компоненты фации – ельника-черничника зеленомошного в Архангельской области.
4. Какую экологическую роль играет таежная хвойная растительность в функционировании ландшафта? Что происходит с подзолистыми почвами после раскорчевки леса и вовлечения почв в агроландшафты?
5. Где в таежном геохимическом ландшафте формируются песчаные иллювиально-железистые подзолы? Назовите их роль в ландшафтах.
6. Охарактеризуйте садовые ландшафты.
7. Назовите отличия садовых ландшафтов от овощных плантаций.
8. Почему пойменные почвы считаются весьма плодородными?
9. Почему подзолистые почвы (с агрономической точки зрения) являются низко продуктивными?
10. Охарактеризуйте полевые аграрные ландшафты в зоне тайги.
11. Охарактеризуйте полевые аграрные ландшафты лесостепи.

## 1.2. Эко-геохимическая оценка зон загрязнения ландшафтов

Антропогенно измененные ландшафты созданы людьми целенаправленно или непреднамеренно. Их не нужно противопоставлять нативным, поскольку они развиваются в тех же биоклиматических условиях. Поскольку эти ландшафты располагаются рядом с нативными аналогами, необходимо комплексное исследование взаимосвязанных фаций, урочищ и ландшафтов изучаемой территории. Наряду с полевыми выделяют лугово-пастбищные, садово-огородные, пойменные и другие ландшафты. Их полная оценка представлена в книге «Ландшафтоведение» под ред. И.М. Яшина, 2004.

Исследуя антропогенно измененные ландшафты, специалисты решают проблемы *рационального природопользования и охраны природы*. Наряду с экологическими и эколого-геохимическими задачами освещаются экономико-географические: размещение промышленности, населения, сельского хозяйства и транспорта, рекультивация земель, прогноз развития агроландшафта при использовании удобрений, известковых мелиорантов и химических средств защиты растений. Например, нельзя в поймах крупных рек размещать населенные пункты и свалки, промышленные объекты... *Нередко это важное экологическое правило нарушается*. Так, в пойме реки Лены, какой год уже наводнения уничтожают населенные пункты, а государство в очередной раз в короткие сроки их восстанавливает. А зря. **Все равно эти постройки будут уничтожены «большой водой»**. Вместо этого, людей нужно отселить в безопасное место – на высокую террасу или коренной берег. *Но людям это не выгодно*: ловить рыбу, создать огород, брать воду из реки будет неудобно, **далековато**. И таких примеров много. Например, в поймах рек Подмосковья размещено более 80% различных свалок, загрязняющих и почвы, и воды, и овощную продукцию (эти сведения добыты специалистами факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова). Непонятно, как выполняют свои функции экологические службы подмосковного и федерального правительств? Посещают ли их представители ландшафты Подмосковья?

Комплексная оценка экологического состояния ландшафтов включает ряд взаимосвязанных блоков:

- **первый** – это источники химического загрязнения агроландшафтов. К ним относятся не только средства химической защиты растений, удобрения и мелиоранты, но и продукты промышленных предприятий, автотранспорта, теплоэлектростанций и другие.

- **второй** – транзитные ландшафты (склоны мореных холмов и гряд), которые принимают экотоксиканты и в которых происходит их трансформация, водная и твердофазная (эрозионная) миграция.

- **третий** – депонирующие ландшафты (межувалистые понижения, поймы рек, болота, а также ручьи, реки и озера – местные базисы эрозии). В них наблюдается *аккумуляция* техногенных экотоксикантов, их превращение и миграция. Важное значение здесь имеют процессы почвообразования.



**Среди источников загрязнителей** следует отметить *аэральные выпадения* пыли, сажи и кислотных дождей. Особенно масштабные в аномально жаркое лето 2010 г. По сведениям Ю.Е. Саета (1988) и М.А. Глазовской (1988) запыленность промышленных городов *центра Русской равнины* составляет 50-150 кг/км<sup>2</sup> в сутки, а в фоновых лесных ландшафтах она в 5-10 раз меньше. *Тонкодисперсные частицы пыли* способны сорбировать аэрозоли, содержащие сильные (новообразованные) минеральные кислоты (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>...), а также химические элементы с высокими Кларками – Fe, Mn, Zn, Cr, Cu. Более токсичные ионы тяжелых металлов – бериллия, кадмия, свинца, ртути, сурьмы, а также мышьяка находятся в парогазовой фазе аэрозолей.

Вообще специалисты выделяют пять основных групп поллютантов:

1. ионы тяжелых металлов (ТМ),
2. фенолы, формальдегид, полихлорбифенилы (ПХБ),
3. радионуклиды,
4. полиароматические углеводороды,
5. диоксины.

Однако сюда следует **добавить микотоксины, пестициды и ряд других ксенобиотиков**. Их влияние на биоту изучено неполно. Основное внимание уделяется безопасности человека. *В то же время качество жизни людей неразрывно связано с экологической безопасностью аграрных и иных ландшафтов, а также биоты, в них обитающих*. Причем, нужно еще научиться нормировать экологическое загрязнение агроэкосистем (рис. 7).



Рис. 7. Комплексное использование сельскохозяйственной техники: внесение минеральных удобрений с обработкой почвы дискаторами. Анкерные шины заметно уменьшают давление трактора и агрегатов на почву.

При эколого-геохимическом картографировании агроэкосистем учитывают виды близлежащих промышленных производств и их возможное влияние, например, на кислотно-основные параметры почв

сельскохозяйственных ландшафтов. Так, цементные и строительные заводы (например, в Воскресенском районе Подмосковья), предприятия черной металлургии способствуют подщелачиванию почв. Причем величина рН снеговых вод вблизи этих объектов достигает величин 8,2-9,4. В составе поглощающего комплекса почв увеличивается содержание ионов кальция и магния. Напротив, *теплоэлектростанции на угле, нефтехимические заводы, цветная металлургия и терриконы угольных шахт* приводят к заметному подкислению почв и природных вод.

По эффекту воздействия на почвы токсичные химические элементы дифференцируются на две группы:

- *первая* – биогеохимически активные и
- *вторая* – трофически активные.

**В первом случае** химические элементы, содержащиеся в техногенных продуктах, сорбируются гумусом, коллоидами и минералами почвы. Наблюдается некоторое изменение окислительно-восстановительных и кислотно-основных свойств почв. Подобные изменения вызывают элементы с высокими Кларками: железо, марганец, кальций, магний, натрий, калий, алюминий, а также анионы сильных минеральных кислот.

**Во втором случае** на почву и ее биоту влияют высокотоксичные химические элементы (бериллий, ртуть, мышьяк, кадмий, селен, свинец, хром), концентрация которых пока еще очень незначительная в агроэкосистемах, но *локально уже экологически опасная*. Их экологическое действие реализуется иначе. Подобные экотоксиканты включаются в биогеохимическую миграцию из почв, поступают в трофические (**пищевые**) цепи. Токсиканты последовательно (но каждый раз уже с большими массами) *аккумулируются в кормах, продуктах растениеводства и животноводства; наконец, они достигают и накапливаются в организмах людей*. При этом происходят изменение биохимических реакций организмах людей и эндемические заболевания. Обычными лекарствами подобные заболевания не вылечиваются, как и их диагностика: она не известна и не изучена. *Врачи пока мыслят старыми категориями, поскольку не изучают экологию, почвоведение и геохимию ландшафта*. В дисциплине «Экология человека» основное внимание уделяется другим вопросам. Нужно помнить, что все на Земле изменилось **в век техногенеза**: заметно загрязнены почвы и почвенный покров, поверхностные воды и воздух, качество продуктов питания ухудшилось. Почему? Потому что жалко выбрасывать испорченный и «залежалый» товар (рыбу, мясо, сметану). *Независимого экологического контроля за торговлей продуктами питания, даже в таком мегаполисе как Москва, по-видимому, пока нет*.

Состояние здоровья людей неразрывно связано с окружающими ландшафтами и токсикантами. В последнем случае некоторые из микроэлементов и тяжелых металлов выступают «**двойниками**» аналогов в ферментах и клеточных структурах (в частности, в молекулах хлорофилла).

Поэтому не исключено, что направленность **фотосинтеза** (основы жизни на планете) может измениться. И вместо выделения такого важного, но промежуточного компонента фотосинтеза как молекулярный кислород, начнется процесс его поглощения.

В этой связи экологический мониторинг за состоянием взаимосвязанных процессов **«фотосинтез – гумусообразование»** в основных фациях и ландшафтах Земли является приоритетным. Такими же должны быть *«производство – контроль качества продуктов питания» у производителей и в продовольственных магазинах.*

### **Вопросы для самоконтроля.**

1. Назовите основные группы экотоксикантов.
2. Охарактеризуйте воздействие **загрязнителей на биоту.**
3. Для каких целей в **агроэкологии** картируются фации и урочища?  
Варианты ответов:  
а) составить легенду, б) написать отчёт, в) заработать деньги на полевых изыскательных работах; г) совершенствовать технологии обработки почвы; д) улучшить структуру севооборотов на экологической основе; е) совершенствовать технологии использования средств химизации, ж) для познания **структуры** ландшафтов, з) уточнить стоимость природных ресурсов регионов.
4. Постройте **ландшафтно-экологический профиль** (нарисуйте схему) по линии «водораздел — терраса — русло реки» и охарактеризуйте особенности **структуры и функционирования** элементарных геохимических ландшафтов в подзоне южной тайги (на примере Подмосковья) для оценки экологической ситуации, связанной с химическим загрязнением почв, растительности, природных вод тяжёлыми металлами.
5. Перечислите **методы изучения** морфологии ландшафта (состояние и его динамика).
6. В чем экологическое отличие овощных фаций в пойме реки от сенокосной фации на плакоре?
7. Дайте обоснование термина «Экогеохимия ландшафта».
8. Что изучает дисциплина «Экогеохимия ландшафта»?
9. Назовите основные отличия дисциплины «Ландшафтоведение» от «Экогеохимия ландшафта».
10. Назовите отличия пойменного ландшафта от полевого в подзоне южной тайги.
11. Перечислите особенности садовых и огородных ландшафтов.
12. Охарактеризуйте любой техногенный ландшафт в степной зоне.
13. Охарактеризуйте термин «автономный геохимический ландшафт».

## Глава 2. Схема каскадного геохимического ландшафта

Элементарные геохимические ландшафты (ЭГЛ) в урочищах взаимосвязаны водными и газообразными потоками веществ и энергии (прямыми и обратными).

**Каскадный** эколого-геохимический ландшафт состоит из «парагенетической ассоциации» сопряженных ЭГЛ – *автономного, транс-элювиального и транс-аккумулятивного*. В долине реки к ним добавляются супераквальный (в пойме) и аквальный (русло реки и донные осадки). Важнейшую роль в формировании связей между ЭГЛ играют поверхностный и внутрипочвенный (нисходящие, восходящие, боковые внутрипочвенные) водные миграционные потоки (И.С. Кауричев, 1965; А.Д. Фокин, 1975; И.М. Яшин, 1993, 2013, 2015; М. А. Глазовская, 1996). Поэтому исследование водных потоков мигрантов, например, с помощью метода сорбционных лизиметров играет важную роль при почвенно-геохимической оценке состояния и эволюции ландшафтов.

Закономерное сочетание массивов ЭГЛ в ландшафте называется геохимическим сопряжением, которое проявляется в виде конкретного типа биогенного круговорота элементов (БИК), обмена энергии и информации как между компонентами ЭГЛ, так и между самими ЭГЛ. Поэтому при исследовании ЭГЛ необходим системный подход и моделирование (математическое и экспериментальное).

Как отмечает А. И. Перельман (1975), одной из важных особенностей ЭГЛ является отсутствие внутренних причин, ограничивающих площадь выявления и распространения данных ландшафтов. Идентичные ЭГЛ должны характеризоваться и аналогичными геоморфологическими условиями, и химическим составом грунтовых вод.

Выделяются и *меж барьерные ландшафты*, которые представляют собой совокупность ЭГЛ, связанных единым типом миграции веществ и расположенных между двумя соседними ландшафтами одного класса. В экологии такие участки **называются экотонами**.

Подобные ЭГЛ интересные с геохимической точки зрения, но для их выделения в ландшафтах требуется хорошая профессиональная подготовка по геоморфологии, геоботанике, почвоведению, ландшафтоведению и экологии.

Нативные и загрязненные ЭГЛ функционируют в одной геохимической «цепочке». В этой связи изучают почвенно-геохимические катены и ЭГЛ.

К их рассмотрению и приступим.

### 2.1. Геохимическая характеристика ландшафтов

Геохимическая диагностика мигрантов должна учитывать особенности географического пространства. А.И. Перельман (1975) выделил следующие типы связей в геохимических ландшафтах:

1. прямые – водные,
2. воздушные,

3. обратные – биотические,
4. биокосные,
5. водные и воздушные.

*В геохимических ландшафтах выделяются биокосные тела:* почвы, коры выветривания, речные и озерные илы, водоносные горизонты, аллювиальные, делювиально-пролювиальные отложения, поверхностные воды, приземная атмосфера, наземные биоценозы (А.И. Перельман, 1975). На плакоре функционирует *структурный центр* ландшафта, из которого и выходят водные потоки мигрантов, перемещающиеся как внутри профилей почв по склону – к местному базису эрозии (меж увалистому понижению, пруду, реке), если *почвы имеют двучленное сложение*, и по поверхности, формируя эрозионный сток мелкозема, особенно при отсутствии растений.

Рассмотрим элементарные геохимические ландшафты подробно.

### **Элементарные геохимические ландшафты.**

*Элювиальные* (автономные) ЭГЛ занимают выровненные водоразделы<sup>1</sup> (местный, межбалочный, межовражный, междуречный) и *пакоры увалов*, гряд. Их относительно повышенное положение в рельефе обуславливают поступление веществ в ландшафт в основном *из атмосферы*, а в *агрландшафтах с целевыми техногенными продуктами* – из удобрений, мелиорантов, пестицидов, орошаемых вод (в частности, с осадками сточных вод).

В зависимости от гидротермического режима, почвы таких ЭГЛ промываются только атмосферными осадками. В лесных фациях отмечается *мобилизация ВОВ с кислотными свойствами* из опада и лесных подстилок, а затем и выщелачивание ВОВ через горизонты почв в глубь профилей. В пределах почвенного профиля весной и осенью может возникать *верховодка*, приводящая к развитию процессов поверхностного оглеения с интенсивным образованием ВОВ. В гумидных зонах Земли господствует промывной водный режим ( $KU > 1$ ), благоприятствующий проявлению элювиальных и элювиально-глеевых процессов. В автономных ЭГЛ мореных увалов и холмов формируются *зональные почвы* подзолистого типа, а на «озах», «камах» и «друмлинах» - подзолы иллювиально-железистые песчаные.

В связи с этим на общем фоне элювиального ЭГЛ по микро,- и мезопонижениям, где скапливаются поверхностные воды, могут быть выделены *элювиально-аккумулятивные ЭГЛ*. На таких участках ландшафтов создаются *аномально высокие концентрации педогенных и экологически вредных химических продуктов*. Не исключена их активная трансформация и последующая абиогенная миграция в профиле почв с попаданием в грунтовые воды или даже постепенный возврат в верхние генетические горизонты в периоды иссушения и замерзания верхних горизонтов почв.

*Трансэлювиальные ЭГЛ* приурочены к пологим склонам гряд, холмов, увалов, террас рек и озер (*транзитные* – к крутым и выпуклым склонам

---

<sup>1</sup> **Водораздел** – это условная линия, проходящая по наибольшим абсолютным отметкам местности; **пакор** – это площадь участка на водоразделе, а вершина холма, увала – это «точка».

холмов, увалов и гряд). Эти ЭГЛ функционируют в условиях заметного вертикального и горизонтального расчленения моренного и иного рельефа. По характеру водообмена данные ЭГЛ можно отнести к ускоренному типу функционирования (Б.Ф. Апарин, 1994).

В зависимости от условий *стока и инфильтрации* атмосферных осадков (что определяется удаленностью водоразделов от рек, озер), формой, крутизной и протяженностью склонов трансэлювиальные ЭГЛ могут быть разделены на два вида:

1-й ЭГЛ расположен в *верхней трети склонов холмов, увалов и гряд*. Здесь **только начинает** проявляться *водная эрозия* (смыв, перенос и отложение частичек мелкозема), обуславливающая твердый сток; обычно здесь формируются слабо смытые дерново-подзолистые почвы в зоне тайги.



Рис. 8. При правильной агротехнике **эрозию почвы** можно практически полностью остановить; на снимке опытные поля в НИИ сельского хозяйства «Немчиновка». В настоящее время эти сельскохозяйственные угодья отведены под строящийся инновационный технопарк «Сколково» - **будущий наукоград**, причем приоритетным при обучении и работе здесь является английский язык (фото И.М. Яшина, 2013).

2-й ЭГЛ приурочен к *середине склонов холмов и увалов*. Здесь *кинетическая энергия водного потока при эрозии максимальная*. В этой связи на этих участках рельефа довольно часто диагностируются средне- и сильно смытые почвы. Для дерново-подзолистых почв таежной зоны это означает *смытость «старого» пахотного горизонта, подзолистого и элювиально-иллювиального; новый пахотный слой теперь залегает на плотном иллювиальном горизонте*. Почвенный покров, таким образом, в средней части склонов существенно трансформирован.

3-й ЭГЛ занимает нижнюю часть склонов увалов, гряд и холмов. Практики порой этот элемент рельефа именуют «*подошвой*» склона. Эти участки относят к транс-аккумулятивному ЭГЛ. Здесь формируется замедленный тип водообмена за счет образования оглеенных водоупорных



горизонтов, а поверхностный перенос частиц почвы и веществ сочетается с их аккумуляцией. Образуются намытые **почвы** на вогнутых склонах. В почвенных профилях здесь легко **диагностируются погребенные**, чаще всего, темно-серые гумусово-аккумулятивные горизонты, оставшиеся от прежних «старых» почв (И.М. Яшин с соавт., *Ландшафтоведение*. 2004). Начинающие почвоведы такие почвы ошибочно называют «почвы со вторым гумусовым горизонтом». Оценка ландшафта позволяет избежать ошибки.



Рис. 9. Сложный антропогенно измененный ландшафт среди холмисто-грядовых лесных массивов; здесь можно выделить следующие **основные виды ландшафтов**: селитебные (населенные пункты), водные (речки и пруды); среди полевого ландшафта можно выделить **урочища** «чистых паров», сенокосов и пастбищ; **фации** полевых и пропашных культур, а также овощные и садовые плантации, тяготеющие к поселкам.

С географической точки зрения важно знать структурные элементы ландшафта. К ним относятся *фации, урочища (подурочища) и местности*. На крупно- и среднемасштабных ландшафтных картах обязательно выделяются урочища. Подурочища и местности выделяются по мере необходимости. *Урочища представляют собой сложно организованный природно-территориальный комплекс (ПТК), состоящий из группы смежных фаций (или их сочетаний)*.

**Фации** картируют по одному типу почв, одной почвообразующей породе, одному виду растительности, которые приурочены к одному мезо- и микрорельефу. Например, фация сосняка-беломошника на подзоле иллювиально-железистом песчаном, развитом на древнем аллювии и приуроченная ко 2-й надпойменной террасе реки Северной Двины. Фации могут быть *фоновые, второстепенные, доминантные и субдоминантные среди фоновых*. Поскольку в дифференциации урочищ ведущая роль принадлежит рельефу и породам, то именно этим факторам и отводится определяющее значение при названии урочищ. Например: урочища моренных холмов и увалов с подзолистыми почвами под ельниками-черничниками

зеленомошными; урочища межувалистых низин с болотными, дерново-глеевыми и болотно-подзолистыми почвами под осоковыми лугами и ельниками долгомошными.

**Местность** – довольно крупный ПТК в ландшафте, особенности которого обусловлены комплексом мезоформ рельефа. Обособление местностей может быть вызвано различными причинами: эрозией и денудацией более древних пород, близким залеганием к поверхности пород иного генезиса, разной интенсивностью флювиальных (водных) потоков (рис. 9).

*Названия местностей:* местности сырых и сухих оврагов, вскрывающих известняки; местность гривистой (прирусловой) поймы реки с иллювиальными почвами; урочища и фации местности столовых останцовых гор или плато; местности высоких моренных холмов среди болотных урочищ; местности карстовых полей (Каргополье, Архангельская область).

Повторим, фация – это функционально целостный, *элементарный природно-территориальный комплекс (ПТК); здесь один вид растений, один тип почвы и один тип почвообразующей породы.* В пределах одного мезорельефа, как правило, залегают 2-3 и более фаций. На стационарных площадках исследования проводятся в фациях.

#### **Названия фаций:**

- фация сосняка-брусничника с подзолом иллювиально-гумусово-железистым песчаным на древнем аллювии боровой террасы р. Мезени;
- фация ивняка с черной ольхой осоково-таволгового с пойменной дерново-глеевой среднесуглинистой почвой на аллювии, приуроченной к притеррасной пойме р. Сев. Двины (*эти участки отводятся под охотничьи угодья; здесь есть старицы, много валежа и они трудно проходимые*).

#### **Вопросы для самоконтроля.**

1. Назовите любой каскадный ЭГЛ.
2. В чем отличие фации от урочища?
3. Чем отличаются автономный и транс-элювиальный ЭГЛ?
4. При географическом картировании ландшафтов выделяют фации, урочища и местности. А что выделяют при геохимическом картировании?
5. Что такое геохимическое сопряжение ЭГЛ?
6. Какие фации распространены на борových террасах крупных северных рек?
7. Какие фации можно диагностировать в степной зоне с черноземами обыкновенными среди типчаково-полынных растительных сообществ?
8. Назовите цель изучения ЭГЛ.
9. Охарактеризуйте цель изучения фаций.
10. Назовите типы связей в сопряженных ЭГЛ по А.И. Перельману.
11. Какую негативную экологическую роль в лесостепной и степной зонах играют «чистые пары» на черноземах в агроландшафтах?

## Глава 3. Элементарные геохимические ландшафты

### 3.1. Таксономия и оценка барьеров миграции

*Выделяют два типа барьеров миграции: нативные и техногенные.* Некорректно говорить о «природных» барьерах миграции. Все барьеры находятся в «природе». Среди первых диагностируют три класса (А.И. Перельман, 1975):

- механические,
- физико-химические и
- биогеохимические.

Подобной таксономии придерживаются и авторы настоящего учебного пособия «Экогеохимия ландшафта». Рассмотрим данные барьеры миграции.

Механические барьеры — это участки почв, почвообразующих пород и ландшафтов с резким уменьшением интенсивности переноса какого-то субстрата (мелкозема) ветром или водой **без радикального изменения их форм миграции и химического состава**. Так образуются, например, наносы почвенного мелкозема у изгороди при пыльных бурях в зонах сухих степей и полупустынь. Мелкозем и соли переносятся на большие расстояния. *Перенос солей ветром называется импульверизацией.*

### 3.2. Биогеохимические барьеры миграции

Биогеохимические барьеры миграции формируются на территориях, занятых биотой, например хвойным лесом. Подобные барьеры миграции дифференцируются в зависимости от масштабного эффекта на макро-, мезо- и микро барьеры миграции. В последнем случае такой барьер миграции в почвах создают, в частности, микроорганизмы совместно с физико-химическими процессами — явление **сегрегации** ионов железа и марганца с фульвокислотами. Так формируются конкреции при смене режимов увлажнения и иссушения обычно песчаного, супесчаного горизонтов в двучленных профилях подзолов и дерново-подзолов тайги. На этом барьере химические элементы не только аккумулируются, но и **радикально изменяют форму миграции и свойства** за счёт реакций комплексообразования, сорбции, коагуляции, сегрегации и других процессов. Так, в частности, в экосистемах образуются генетические горизонты и профили почв, система специфических гумусовых соединений, сорбционно закрепленных на почвенной матрице. Сорбция в ландшафтах играет уникальную роль, поскольку ей противостоит мощный природный механизм рассеивания в пространстве веществ и энергии. Одним из них является диффузия, ветровая и водная миграция веществ, а также пожары и **дигрессия** ландшафтов (рис. 10,11).

Физико-химические барьеры включают обширный класс барьеров, формирование которых связано с резким изменением *физико-химических*

условий миграции химических элементов как по вертикали, так и в пространстве на коротких расстояниях. В последнем случае, как правило,



Рис. 10. Разрушение **биогеохимического барьера миграции** при масштабной эрозии и засолении почв в лесостепной зоне Среднего Поволжья. На снимке видно, что мощность **гор. А<sub>1</sub>** достигла критического значения – **13 см**; это все, что осталось от **профиля чернозема выщелоченного**, приуроченного к коренному берегу реки Большой Колышлей Саратовской области, учхоз «Муммовское» - см. рис. 4 (фото И.М. Яшина, 2011).



Рис. 11. Былая мощность (**38-64 см**) гумусово-аккумулятивного горизонта чернозема выщелоченного утрачена (**14-19 см**); причины деградации здесь различные, но одна из них – **осолонцевание** черноземов за счет близкого залегания засоленных пород и **водная миграция новых продуктов – гуматов и фульватов натрия в период дождей** (фото И.М. Яшина, 2011).

имеют ввиду латеральные - *площадные (или пространственные) барьеры*, образующиеся, в частности, по крайкам болот или у «*подошвы*» склона мореного увала. В этом случае наблюдается резкий типовой переход почв: на склоне в еловом лесу (на морене) развиты сильноподзолистые среднесуглинистые почвы, а у подошвы - перегнойно-глеевые (или



торфяные подзолисто-глеевые) аналоги с близким уровнем залегания грунтовых вод. Экотоны, например, и являются площадными барьерами.

**Радиальные (или вертикальные) барьеры** миграции (рис. 11а) залегают в профилях почв, пород и корах выветривания. Такие барьеры являются зонами накопления и осаждения различных химических элементов, например, и экотоксикантов из миграционного потока в почвах, а также в почвообразующих и подстилающих породах. В этой связи отметим, что химическое загрязнение почв может быть вызвано антропогенной деятельностью, а также повышенным содержанием элементов-токсикантов в почвообразующих и подстилающих породах, а также корах выветривания.



А

В

Рис.11а. А - северо-таежный ландшафт Музея «Малые Корелы» - фация сложного ельника-черничника V-го бонитета с глееподзолистыми почвами, в профиле которых установлены сорбционные лизиметры; В – среднетаежный лесопарковый ландшафт Петрозаводска – фация темнохвойного ельника II-го бонитета на «свежей» несанкционированной вырубке с подзолами контактно-осветленными песчаными, развитыми на двучленных отложениях. Со временем (к 2009 году) интенсивно белесый цвет подзолистого горизонта стал серовато-палевым за счет прокраски миграционными Fe-органическими комплексными соединениями и заиливания его коллоидами из контактно-осветленного горизонта (фото И.М. Яшина, 26.07.2002).

Например, алмазоносные породы Беломорско-Кулойского плато (к С-В от г. Архангельска) содержат заметные количества таких элементов как барий, ванадий и другие. В местах скопления алмазов отмечена пульсирующая радиоактивность в корах выветривания. Поэтому в этих северо-таежных

ландшафтах должен проводиться эко-геохимический мониторинг. Наши полевые изыскания на стационарных площадках фаций Музея деревянного зодчества «Малые Корелы» (в 25 км на Ю-Ю-В от г. Архангельска) выявили локальное сосредоточение ионов тяжелых металлов в оглеенных горизонтах глееподзолистых почв, в Fe-Mn конкрециях (рис. 11а-А). Здесь речка Корелка образует V-образную залесенную долину и глубоко дренирует кору выветривания. За пределами территории Музея речка Корелка впадает в один из крупных «рукавов» дельты реки Северной Двины (рис. 11б).



Рис. 11б. Заболоченная пойма реки Корелки на южной границе Музея деревянного зодчества «Малые Корелы» (фото И.М. Яшина, 2004).

### **Вопросы для самоконтроля.**

1. Перечислите основные барьеры миграции.
2. Охарактеризуйте специфику механических барьеров миграции.
3. Дайте обоснование биогеохимическим барьерам миграции.
4. Какие виды физико-химических барьеров миграции есть в почвах таежной зоны?
5. Перечислите виды сорбционных барьеров миграции.
6. Охарактеризуйте испарительный и солевой барьеры миграции.
7. Назовите особенности карбонатно-кальциевого барьера миграции.
8. В чем заключается специфика глеевого барьера миграции?
9. Назовите особенности кислотного барьера миграции.
10. Что такое площадные барьеры миграции? Приведите примеры.
11. Какое влияние на черноземы оказывают легкорастворимые соли?
12. В каком случае происходит подкисление черноземов?
13. Что представляет собой в почвах двухсторонний барьер миграции?
14. К какому типу барьеров миграции относятся лесополосы?
15. Приведите пример комплексных барьеров миграции.
16. К какому типу барьеров миграции относятся донные осадки озер?



## Глава 4. Физико-химические барьеры миграции

Известны и изучены следующие *физико-химические барьеры миграции*:

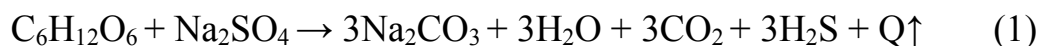
1. кислородный,
2. глеевый (в т.ч. и сероводородный),
3. щелочной,
4. кислый (кислотный),
5. испарительный,
6. **сорбционный** (органогенный, органоминеральный, минеральный, карбонатно-кальциевый),
7. солевой (тесно связанный с испарительным).

В ландшафтах тайги также широко распространены **двухсторонние и комплексные барьеры миграции**.

Рассмотрим особенности *физико-химических барьеров миграции, которые исследованы специалистами наиболее полно*.

Кислородные барьеры очень широко распространены в ландшафтах Земли, формируясь в местах разгрузки так называемых «**глеевых вод**» на участках, богатых свободным молекулярным  $O_2$ . Из металлов здесь осаждаются Fe(III) и Mn(II). Кроме указанных элементов здесь аккумулируются также **сера и селен**, в частности в местах выхода сероводородных вод. Одним из таких уникальных мест на Северном Кавказе является **гора Машук** и «Провал» на южном склоне горы, где в виде большой лужи скопилась жидкая сероводородная кислота (зеленовато-голубого цвета) вследствие естественного генезиса. Вблизи этого *сероводородного источника* заметны новообразования серы в виде её самородной формы, являющейся, как известно, антисептиком.  $H_2S$  может находиться и в растворе, и в газовой фазе.  $H_2S$  – яд.

Сероводородный (глеевый) барьер миграции образуется в восстановительной почвенно-геохимической обстановке при наличии источников серы и водорастворимых органических веществ. В глубинах Земли при  $t^{\circ} \geq 150^{\circ} C$  в породах и газах, содержащих  $CH_4$  и сульфаты, возможно образованные  $H_2S$  по схеме:  $CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+ \rightarrow CO_2 + 2H_2O + H_2S$ . Однако гораздо большее значение в образовании  $H_2S$  имеет деятельность сульфатредуцирующих бактерий:



Формирование  $H_2S$  сопровождается активным осадкообразованием Fe, Mn, Pb, Zn, Cu, Cd, Ag, Hg, Sb, Bi, Mo. Железо и марганец в водных растворах образуют с сероводородом труднорастворимые **осадки черного цвета**. *Сероводородные барьеры* ярко выражены в почвах дельт северных рек, впадающих в морские бассейны: Сев. Двины, Мезени, Кулоя, Печоры, Оби, Енисея. По побережьям (приморским плоским равнинам) распространены так называемые **маршевые почвы и солончаки**, имеющие в верхних горизонтах черную окраску. При выкапывании прикопки (их мощность небольшая) ощущается запах сероводорода – тухлых яиц.

**Глеевые барьеры миграции (без участия  $H_2S$ ).** Возникают на участках интенсивного разложения растительных остатков и образования ВОВ без соединений серы и без доступа молекулярного  $O_2$ . Показателем глеевой обстановки обычно являются очень низкие величины окислительно-восстановительного потенциала (Eh), высокие концентрации ВОВ, наличие свободных газов –  $H_2$  и  $CH_4$ , а также закисные формы  $Fe^{2+}$  и  $Mn^{2+}$ , которые с полифенолами образуют *почти чёрные растворы*, мигрирующие из гор.  $A_0$  и временно прокрашивающие минеральный субстрат под лесной подстилкой в темно-серый цвет. *Такие горизонты порой ошибочно принимают за гор.  $A_1$ , а почву (в пределах подзон средней и северной тайги на бескарбонатных породах) также некорректно диагностируют или как дерново-глеевую, или дерново-подзолистую. Это некорректно.*

На глеевых барьерах (например, концентрические «окрайки» болот) — на гидрозолях  $Fe(OH)_3$  — осаждаются Cu, Mo, U, Ag, Cr, V, As. Глеевые барьеры, как правило, *являются двусторонними*, а в краевых частях болот находятся комплексные барьеры: кислый, сорбционный, глеевый и биогеохимический. В этих барьерах отмечается сегрегация соединений железа, марганца и фульвокислот в конкреции, примазки.

**Щелочные барьеры миграции.** Щелочные барьеры миграции образуются на участках ландшафта, где реакция среды скачкообразно изменяется от кислой (pH = 4,1-5,0) до щелочной (pH  $\geq$  7,9). В этих условиях из водных растворов осаждаются многие вещества, относящиеся к карбонатам, гидроксидам металлов, фосфатам, арсенатам и ваданатам. На карбонатных щелочных барьерах (в донных осадках озера Лача, в частности, вблизи г. Каргополя), наблюдается осаждение соединений Fe, Mn, Pb, Zn, Cu, Cd и многих других ионов металлов, а также компонентов ВОВ. Привнос частиц почвенного мелкозёма при эрозии способствует формированию в озере **мощных слоев сапропеля**. Поскольку сапропель обогащён Ca и гумусовыми соединениями, его нужно использовать как удобрение, одновременно очищая и озеро. Это важная природоохранная экологическая задача.

**Кислый (точнее кислотный – И.Я.) барьер миграции** диагностируется при резкой смене реакции среды от слабощелочной до кислой. На подобных барьерах осаждаются анионные мигранты: Si, Ge, Mo, As, Se, V, U. Сочетание кислого и восстановительного (глеевого) барьеров может возникнуть за счет жизнедеятельности сульфатредуцирующих бактерий при наличии доступных форм органических веществ, например, мигрируемых ВОВ. Такие барьеры весьма сорбционно активны: здесь накапливаются ионы кремния, молибдена и урана.

**Испарительный барьер миграции** возникает при интенсивном зимнем и летнем испарении почвенных растворов особенно в степных, сухостепных и пустынных ландшафтах. Подобные барьеры способствуют вторичному засолению почв, при близком залегании грунтовых вод, что крайне негативно сказывается на развитии культурных растений. Масштабы вертикальной

восходящей миграции водорастворимых солей в аридных почвах можно изучить с помощью метода сорбционных лизиметров. Гидротермический и концентрационный градиенты – движущая сила восходящей миграции солей.

#### 4.1. Сорбционные барьеры миграции

*Наиболее распространенный вид барьеров миграции. Сорбционные барьеры часто встречаются в почвах и ландшафтах. Они формируются на участках почв, пород, донных осадков, где водные или газовые миграционные потоки встречаются с природными сорбентами: доломитами, глинами, коллоидами Fe, Mn, Si, гумусовыми веществами и другими. На формирование таких барьеров большое влияние оказывают гумусовые соединения и вторичные минералы — каолинит и монтмориллонит. Активными сорбентами в почвах являются коллоиды Fe, Mn, Si, Cr.... Коллоиды гидроксида Fe имеют положительный знак заряда и сорбируют As, V, P, Sb, Se; а коллоиды Mn(OH)<sub>2</sub> – отрицательный, сорбируя ионы Ni, Co, K, Ba, Cu, Zn, Gh, Au, W; коллоиды кремния также имеют отрицательный знак заряда сорбируют и радиоактивные элементы; слои известняки и доломиты активно поглощают Pb, Zn, Sr, защищая часто от загрязнения поверхностные воды.*

Глинистые минералы сорбируют ионы металлов лучше в слабощелочной среде, чем в кислой. Поэтому в чернозёмах и дерновых почвах ионы тяжёлых металлов (ТМ) сорбируются более полно и прочно. Впоследствии ионы ТМ активно загрязняют сорбционно-геохимические барьеры миграции почв:

- органогенный (гор.  $O^T$ ),
- органоминеральный (гор.  $A_1$ ),
- минеральный (гор. В и другие нижележащие горизонты почв),
- карбонатно-кальциевый,
- сульфидный,
- фосфатный.

Указанные барьеры миграции становятся источниками загрязнения сельскохозяйственной продукции и поверхностных природных вод. Поэтому в настоящее время наряду с уровнем эффективного плодородия важно установить степень химического загрязнения почв и их барьеров миграции.

Кроме качественной (эколого-химической) важна и количественная оценка барьеров миграции по следующим параметрам:

- градиент барьера,
- контрастность барьера,
- импульс миграции и другие.

Количественная оценка аккумуляции веществ (и экотоксикантов) на барьерах миграции позволяет оценить их экологическую безопасность. Выявить возможный проскок мигрантов из зоны сорбции (горизонта и профиля почв).

## 4.2. Количественная оценка сорбционного барьера миграции

*Данный методологический подход весьма актуальный, поскольку весьма часто исследователи ограничиваются диагностикой только содержания экотоксикантов в почве, поверхностных водах.*

Градиент барьера миграции ( $G$ ) — показатель, характеризующий особенности сорбции вещества или химических элементов в миграционном водном потоке (восходяще-нисходящем, боковом...) при их свободной фильтрации через барьер миграции. Для расчёта величины  $G$ , например, для элювиального горизонта  $E_L$  в подзолистой среднесуглинистой почве, необходимо знать миграционную массу изучаемого вещества (фульвокислот, Fe-ФК комплексных соединений) **до и после барьера** (в нашем примере — **гор.  $E_L$**  имеет мощность  $l = 25$  см). Учёт масс мигранта проводят с помощью МСЛ — колонки с приёмниками лизиметрических вод устанавливают на «входе» и на «выходе» мигранта из барьера.

Величину барьера миграции  $G$  определяют по выражению (А.И. Перельман, 1975):

$$G = (m_1 - m_2)/l \quad (2)$$

Напомним, что для компонентов ВОВ гор.  $E_L$  (подзолистый, состоящий преимущественно из частиц оксида кремния) является химически слабо активным барьером. Если  $m_1$  — миграционная масса ВОВ перед барьером (допустим,  $50 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}^{-1}$ ), а  $m_2$  после барьера —  $63 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}^{-1}$ . Тогда получим:  $G = 50 - 63 \text{ г/м}^2 / 0,25 \text{ м} = -53 \text{ г/м}^3 \cdot \text{год}^{-1}$ .

**Знак минус  $G$**  означает, что вместо сорбции на барьере (гор.  $E_L$ ) происходит какая-то дополнительная мобилизация в раствор компонентов ВОВ и их активный вынос. Возможно, ранее (в предыдущие годы или сезоны) ВОВ были здесь сорбированы, а в настоящее время наблюдается их десорбция и вынос. Подобным образом, кстати, обнаруживаются в природных водах различные экотоксиканты давным-давно попавшие в почву, но сорбционно удерживаемые ею. Это характерно, в частности, для радионуклидов ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ...), основным механизмом миграции которых, по-видимому, является диффузия (А.Д. Фокин, 2005).

**Выражение (2)**, на наш взгляд, может быть модифицировано с учетом процессов сорбции-десорбции и хроматографии компонентов ВОВ в почве (И.М. Яшин, 2013). *В выражении (2), в знаменателе, вместо мощности горизонта почвы (см), следует поставить фактическое значение массы слоя изучаемой почвы (кг).*

Ее вычисляют с учетом расчетной площади поверхности в  $1 \text{ м}^2$ , плотности и мощности изучаемого горизонта почвы. Тогда величина  $G$  приобретет реальное значение **градиента барьера миграции**, как показатель, отражающий сорбцию мигранта (**мг, ммоль**) единицей массы почвы (**кг почвы**) за единицу времени (**год**) через единицу площади расчетной поверхности  $1 \text{ м}^2$  почвы.

Величина  $G$ , предложенная нами, более объективная, соответствует представлениям о сорбционно-десорбционных взаимодействиях в почвах.

## Сорбция веществ на сорбционном барьере миграции

Для расчета задерживаемой массы мигранта на барьере эмпирическим путём используют следующее выражение:

$$h = k_{\text{моб}} (C_1 - C_2) / (\alpha_1 - \alpha_2) / l \quad (3),$$

где:  $l$  — мощность барьера (м),

$k_{\text{моб}}$  — коэффициент мобилизации (безразмерная величина) химического элемента из сложного (труднорастворимого) химического соединения в раствор; данный параметр в выражение (3) предложил ввести **И.Я.**;

$C_1$  и  $C_2$  — концентрации изучаемых элементов до и после барьера (*целесообразно использовать массу мигранта, а не концентрации — И.Я.*);

$\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — сухой остаток аликвотов лизиметрических вод до и после барьера (% , г/л).

В расчетах следует обратить внимание на сопоставимость единиц измерения.

**Пример.**  $K_{\text{моб}} C_{\text{орг}} \text{ВОВ}$  для хвойного опада в почвах подзолистого типа Подмосковья равен 5%;  $C_1$  и  $C_2$  — соответственно не концентрации, а массы ВОВ по углероду, полученные с помощью МСЛ — 21 и 3 г/м<sup>2</sup>·год<sup>-1</sup>;  $l = 25$  см;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — соответственно 0,25 и 0,15%. Подставив указанные опытные данные в выражение для расчета  $h$ , получим:

$$h = 5 \cdot \frac{21 - 3}{(0,25 - 0,15) \cdot 0,25 \text{ м}} = 90 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}^{-1} / 0,025 \text{ м} = 3600 \text{ г/м}^3 \cdot \text{год}^{-1} \quad (4)$$

Расчёты показывают, что в данном случае (**гор. А<sub>1</sub>**) — это очень активный органоминеральный сорбционный барьер миграции.

В таёжных ландшафтах природные и лизиметрические (почвенные) воды, как правило, ультрапресные по уровню минерализации, но сильно обогащены мобильными формами гумусовых соединений (ГС) — ВОВ.

Поэтому эти разнообразные по молекулярно-массовому составу и физико-химическим свойствам органические и органоминеральные соединения играют чрезвычайно важную и уникальную роль в формировании почв и биоты тайги, их эволюции, перераспределении в профилях продуктов почвообразования и экотоксикантов, в частности ТМ (Pb, Cd, Be, Zn, Hg, Cu...); выполняют своеобразные экологические функции в ландшафтах (И.М. Яшин, 1973, 1993, 2004).

Контрастность (технофильность) барьера миграции рассчитывают, используя следующее выражение:

$$k_6 = C_i / C_{\text{фон}} \quad (5)$$

где  $C_i$  — реальное содержание мигранта в массе барьера (% , моль) и  $C_{\text{фон}}$  — **фоновое содержание** (или **Кларк**) изучаемого элемента (вещества), %. Нужно умело выбрать фон, например, почву биосферного заповедника.

Например, содержание мобильных форм свинца в гор.  $O^{III}$  составило 0,11%, а **Кларк Pb** в коре выветривания составляет  $1,6 \cdot 10^{-3} \%$ . Отсюда  $k_6 = 0,11/0,016 = 68,8$ .

Таким образом, несмотря на **низкие концентрации ионов  $Pb^{2+}$**  в почвенных растворах таежных ландшафтов, данный элемент *очень активно накапливается на некоторых сорбционных барьерах*.

Пренебрегать низкими величинами экотоксикантов в ландшафтах и почвах нельзя: ионы тяжелых металлов накапливаются постепенно. Расчет опасности по ПДК не корректен. Нужно учесть динамику – вдыхание воздуха, выпитой воды, съеденной пищи. ПДК – статичный параметр.

### Комплексные барьеры миграции

*Комплексные барьеры миграции* наиболее широко распространены в ландшафтах земного шара. С этими барьерами связаны максимальные по динамике изменения форм миграции веществ. Например, в Чёрном и



Рис. 12. Прибрежные (волноприбойные) зоны морей – участки комплексных барьеров миграции химических элементов; **на Балтике** – это зоны аккумуляции янтаря; в южных морях (например, **Каспий, Средиземноморье**) в мелких лагунах формируются осадки легкорастворимых солей, гипса и карбоната кальция (фото И.М. Яшина, 2004).

Красном морях на глубинах 150-200 м начинается *сероводородный барьер*: здесь нет биоты. В Красном море на дне отложились сульфидные полиметаллические рудные отложения Pb, Cu, Zn. Глубинные металлоносные рассолы, поднимающиеся по трещинам горных пород вверх, претерпевают трансформацию на кислородном барьере (в поверхностных слоях моря): закисное Fe(II) окисляется и переходит в  $Fe^{3+}$  с последующим образованием коллоидных частиц  $Fe(OH)_3 \downarrow$ . Последние представляют собой прекрасные сорбенты как для ВОВ, так и многих металлов, поэтому вода хорошо очищается. При осаждении  $Fe(OH)_3$  увлекает растворимые формы Cu, Pb, Cd, а сам гидроксид железа превращается в гетит. Здесь важную роль играют и



сульфатредуцирующие бактерии, деятельность которых можно диагностировать как *биогеохимический микробарьер*. Похожие барьеры миграции существуют в лагунах и волноприбойных зонах морей (рис.12).

### Иные параметры количественной оценки барьеров миграции

Другим важным показателем активности мигрантов является их *интенсивность миграции*  $P_x$ . Она отражает количество вещества (моль, г), мигрирующее за определенный промежуток опыта (месяц, сезон, год) через заданную площадь сечения или **точнее объём** почвенно-геохимического барьера. Рассчитывается  $P_x$  по выражению:

$$P_x = db/dt \text{ или } P_x = (b_2 - b_1)/(t_2 - t_1) \quad (6)$$

Данное выражение без учёта общей массы (валовой) формы мигранта отражает параметр  $P_x$  как скорость мобилизации элемента из твердой фазы в раствор. Если теперь величину  $db/dt$  разделить на массу химического элемента в форме оксида (валовое содержание) или его Кларк в коре выветривания (%), то получим следующее выражение:

$$P_x = \frac{1}{b_x} \cdot \frac{db}{dt} \quad (7)$$

Приняв  $db/dbx$  за  $U$  (*импульс миграции*), найдем:

$$P_x = U/dt \quad (8)$$

*Выражение  $db/dbx$*  — это приращение небольшой мобильной массы мигранта к валовой на расчетной площади (в принципе, это соотношение масс мигранта в жидкой и твердой фазах). По смыслу оно подобно  $k_{\text{моб}}$ .

Из выражения  $P_x = U/dt$  можно найти значение импульса миграции  $dU = P_x \cdot dt$ .

*Импульс миграции* — это плотность потока мигранта (модуль потока) за конкретный промежуток стационарного опыта через заданную (расчетную) площадь ( $m^2$ ) почвы.

Поскольку  $dU = db/dbx \cdot dt$ , то взяв определенный интеграл, получим:

$$dU = \int_{b_1}^{b_2} \frac{db}{dbx_o} \int_0^t dt = \ln \frac{b_2}{b_1} \cdot t^{-1} \quad (9)$$

После преобразования найдем вид функции: это восходящая экспонента-

$$b_2 = b_1 \cdot \exp(U) = b_1 \cdot \exp[P_x(t_2 - t_1)] \quad (10)$$

**Пример.** В результате техногенного загрязнения одной из агроэкосистем Подмосковья с дерново-подзолистыми почвами в гор.  $A_{\text{max}}$  содержание мобильной формы меди ( $\text{Cu-R}$ ,  $\text{CuCl}_2$ ) за 1 год достигло экологически опасного уровня — 2%, а Кларк меди в коре выветривания —  $4,5 \cdot 10^{-3}\%$ . Отсюда:

$$U = \ln b_2/b_1 = \ln 2 - \ln 4,5 \cdot 10^{-3} = 0,693 - (-5,404) = 6,1 \quad (11)$$

Величина  $\ln b_1$  не изменяется, поскольку  $\ln t$  (1 год) равен нулю. Таким образом, *импульс миграции* ионов  $\text{Cu}^{2+}$  в гор.  $A_{\text{пах}}$  довольно значительный.

### Вопросы для самоконтроля

1. Приведите примеры сорбционных барьеров миграции. Какие классы веществ они сорбируют?
2. Какую роль играют глеевые и сероводородные барьеры миграции при формировании почв подзолистого типа и черноземов?
3. Перечислите основные классы аграрных ландшафтов.
4. Нарисуйте схему каскадного геохимического ландшафта в прямоугольных координатах.
5. Что такое «градиент барьера миграции»?
6. Сущность термина «импульс миграции».
7. Сущность коэффициента водной миграции.
8. Методы изучения барьеров миграции.
9. Кто автор концепции «барьеры миграции»?



Рис. 13. Фация разнотравного луга на 1-й надпойменной террасе реки Межа в Центрально-лесном заповеднике Тверской области, рядом с конторой заповедника: **А** – профиль почвы во влажное лето 2014 года (соединения железа интенсивно окрашивают мелкозем по всему профилю вплоть до подзолистого белесого горизонта, а с глубины 69-74 см появляются грунтовые воды; в лесу в это же время профили дерново-подзолов на двучленах «высушены» за счет эвапотранспирации); **В** – тот же профиль почвы, но в июле 2015 года (осадков не было три месяца) – профиль почвы оказался не переувлажненным, соединения железа «опустились» на глубину 38-44 см, при этом верхний подзолистый горизонт был маскирован компонентами ВОВ и Fe-органическими комплексными соединениями. Тип почвы не изменился, изменились условия и формы миграции соединений железа при активном участии компонентов ВОВ (фото И.М. Яшина).

## Глава 5. Трансформация веществ на барьерах миграции (на примере почв зоны тайги)

*Дегградация физико-химических барьеров происходит вследствие совместного действия внешних и внутренних факторов. Эти факторы, определяющие трансформацию и миграцию веществ, можно обобщить в три группы условий:*

*1-я группа* — условия, влияющие на накопление и передвижение носителя (воды) в почвах и грунтах. Например, необоснованное осушение больших массивов болот в Шатурском районе Подмосковья вызвало резкое обеднение ландшафтов поверхностными водами, что привело к масштабным и трудно ликвидируемым пожарам. В результате мощные торфяники после пожаров превращаются в песчаные *пирогенные почвы*, а органогенный биогеохимический барьер полностью уничтожается; накопленные экотоксиканты (диоксины и другие) включаются в миграционные водные и воздушные потоки. Огромные массы дыма, пыли и сажи достигают г. Москвы, вызывая не только дискомфорт, но и экологические заболевания людей.

*2-я группа* — условия, определяющие химический и минералогический состав почвенно-грунтовой толщи, включая поступающие продукты антропогенного воздействия (удобрения, пестициды, вещества техногенного загрязнения).

*3-я группа* — условия, определяющие свойства и режимы почв. Они влияют на подвижность и мобилизацию ионов металлов и веществ из компонентов почвы, а также поступающие в нее чуждые вещества — экотоксиканты.

*Первая группа условий* предусматривает оценку, с одной стороны, климатических параметров региона и их влияние на увлажнение территории (количество осадков, их режим, мощность снегового покрова, режим снеготаяния, коэффициента увлажнения — КУ), а с другой — учет комплекса конкретных локальных факторов, определяющих водопроницаемость и водоподъемную способность почв (как миграционного барьера), а также поверхностный сток: гранулометрический состав, мощность гумусового слоя, почвогрунтов, условия рельефа и наличие растительности.

### 5.1. Дегградация гумусовых веществ

*Процесс дегградации ГС (органоминерального почвенного барьера миграции)* — это совокупность различных по природе и направленности реакций, протекающих в генетических горизонтах конкретной почвы, в ответ на целенаправленное (или неосмотрительное) воздействие тех или иных продуктов техногенеза (легкорастворимых солей, кислот, щелочей и других



Рис.14. Природная хроматограмма **продуктов деградации гумусовых соединений чернозема выщелоченного в кварцевом песке** на склоне коренного берега реки Большой Кольшлей учхоза «Муммовское» Саратовской области (фото И.М. Яшина, 2011).

соединений) и нативных веществ, приводящее не только к изменению состава, свойств и структуры ГС, но и трансформации их некоторых функций в почве (рис.14). Когда уничтожается естественная растительность и распахиваются целинные почвы, наблюдается резкое изменение биогенного круговорота веществ (его емкость), гидротермического режима и состава групп живых организмов в экосистемах различных географических зон Земли, что обуславливает прежде всего изменение биогеохимического цикла углеродсодержащих соединений в системе: жидкие водорастворимые органические вещества (ВОВ) ↔ газообразные ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и др.) ↔ твердые продукты (ГС).

*Нами выделены две группы макропроцессов, определяющих особенности деградации гумуса: внешние и внутренние. Внешние — действие солнечной радиации (в виде энергии — лучистой и тепловой), атмосферных газов и сопутствующих веществ, которые при контакте с атмосферной влагой, превращаются в агрессивные химические продукты («кислотные дожди»), кинетическое воздействие латеральных потоков воды, воздуха, а также воздействие льда, вызывающих как пространственное перемещение и перераспределение мелкозема в пределах макро- и мезорельефа, так и внутригоризонтные (почвенные) превращения высокомолекулярных и коллоидных структур и их «очистку» от минеральных солей, и, наконец, непосредственное тепловое влияние Солнца, особенно на не защищенную растениями поверхность почв и почвенного покрова (Яшин И.М., Черников В.А., 1998).*

Своеобразное химическое влияние на ГС оказывают *легкорастворимые минеральные удобрения* (активные химические электролиты) и различные мелиоранты — фосфогипс, фосфорит и известковые материалы. А.Ю. Кудеяровой (1991), например, установлено, что *высокие дозы ортофосфатов*, вносимые в дерново-подзолистую почву, способствуют

заметной мобилизации в раствор мобильных форм ГС и их миграции в генетическом горизонте ( $A_{\text{пах}}$ ).

Однако механизмы таких взаимодействий и особенности трансформации удобрений и мелиорантов с участием ВОВ, солей и других соединений остаются еще экспериментально слабо обоснованными (см. раздел 7.8).

## 5.2. Эко-геохимическая оценка процесса подзолообразования

Подзолообразование рассматривается как сложный и динамичный процесс, имеющий известную стадийность и различные формы проявления в почвах таежных экосистем. Данный процесс реализуется во взаимосвязи с другими почвенными и экологическими процессами на разных уровнях структурной организации веществ. В этой связи нужна система методов при исследовании почв и экосистем.

Наряду с *биогеохимической теорией* развивается гипотеза, основанная на экзогенных процессах развития почв, например с текстурно-дифференцированным профилем (исходная литогенная неоднородность почвообразующих пород) – И.А. Соколов (1990).

Следует *уточнить критерии*, по которым в настоящее время диагностируются почвенные процессы. Могут ли быть критериями реальных микро-, мезо- и макропроцессов почвообразования те параметры почвы, которые были получены на *основе статического отбора* и изучения проб почвы? По-видимому, нет. В данном случае можно получить лишь косвенное представление о почвенных процессах, а их интерпретация, как правило, определяется не фактическими данными, а уровнем подготовки специалиста и его практическими навыками. *Прямые критерии диагностики почвенных процессов* могут быть сформулированы лишь на основе долговременных полевых (стационарных) и модельных биогеохимических изысканий.

При таком подходе появляется новый взгляд на рассматриваемую проблему. Известно, что *реальные почвенные процессы* и реакции в почвах подзолистого типа осуществляются преимущественно в многообразных динамических взаимодействиях (диффузия, ионный обмен, сорбционно-десорбционные процессы, осадкообразование, комплексообразование) при непосредственном и активном участии ВОВ с ярко выраженными кислотными и комплексообразующими свойствами, воды и микрофлоры. Циклы указанных и иных процессов, как правило, незамкнуты, вследствие чего в почвенных горизонтах постепенно накапливаются остаточные (устойчивые) продукты почвообразования.

*Но отражают ли эти продукты в полной мере сущность почвенных процессов?* Очевидно, нет. И вот почему. До их пор еще недостаточно полно изучен «мобильный блок веществ» (в общем балансе вещества и энергии в наземных экосистемах). Но именно здесь совершается масштабная (в многовековом интервале времени) качественная дифференциация веществ из



инертных (консервативных) состояний и форм, характерных для почвообразующих и коренных пород, кор выветривания, в миграционные и биологически активные соединения, непрерывно трансформируемые в компонентах экосистем и геохимических ландшафтах. Такое превращение осуществляется, как известно, *абиотическим и биогенным путями*, на что обратил внимание еще Вернадский В.И. (1924) в своих лекциях о биосфере в Сорбонском университете. *«Учение о живом веществе является особой формой понимания и явлений жизни, и окружающей нас природы»*, – писал В. Вернадский. Он отмечал: *«...как увязать неизменное количество жизни с ее явно идущим развитием?»*

По В.И. Вернадскому вопрос решается так: *«...количество «вращаемых» жизнью масс потоков веществ остается неизменным, но интенсивность их в единицу времени увеличивается»*. **В.И. Вернадский** вывел *два биогеохимических принципа*, весьма актуальные и для экологии. Второй, например, гласит: *«...на Земле живут и выживают в ходе эволюции только те виды, которые увеличивают скорость миграции и разнообразие вещества»*. Он охарактеризовал также **особенности биосферы Земли**:

- а) геохимическое единство ландшафтов,
- б) неравновесность процессов,
- в) накопление энергии,
- г) дифференциация вещества и энергии,
- д) накопление информации.

Эти положения являются и сейчас основополагающими при экогеохимической характеристике того или иного ландшафта. Добавим, информация не только накапливается, но и качественно изменяется во времени и пространстве.

В концепции уровней проявления и развития в пространстве и времени почвообразовательных процессов важное место отводится познанию *микропроцессов как основы*, определяющей последующие направленность и скорость мезо- и макропроцессов. Предложена система показателей, позволяющая оценить состояния и свойства элементов, а также особенности почвенных процессов (И.М. Яшин, 1993, 2013).

### 5.3. Диагностика и оценка свойств почвы

Бакалавры должны знать, какие свойства позволяют определить почвы?

*Почвы диагностируются с помощью следующих показателей* (Л.А. Воробьева, 1998):

- 1) химический состав почв и почвенных компонентов,
- 2) подвижность и доступность биоте химических элементов в почвах,
- 3) кислотнo-основные свойства,
- 4) ионообменные и коллоидные свойства,
- 5) окислительно-восстановительные свойства,
- 6) каталитические свойства.



Рис. 15. Сосняк-беломошник в Мезенском районе Архангельской области с подзолом иллювиально-железистым песчаным на древнем аллювии (вверху – северо-таежная фация сосняка на **боровой террасе** реки Мезень, в 17 км к югу от г. Мезени; внизу – профиль подзола); напомним, **подзолистые почвы песчаного и супесчаного гранулометрического состава в зоне тайги относятся к подзолам**, а суглинистого – к подзолистым и дерново-подзолистым (фото И.М. Яшина, 1983).

Сюда необходимо добавить **сведения о гумусовых соединениях (ГС) почв**. И отметить в этой связи дополнительно следующие свойства:

1) свойства, характеризующие специфику мобилизации, трансформации и миграции основных *гумусообразователей* – компонентов ВОВ в конкретных ландшафтах,

2) свойства, определяющие генезис ГС, их молекулярно-массовый и химический состав, а также кислотность и комплексообразующую активность,

3) свойства ГС, обуславливающие их устойчивость к биодegradации и воздействию продуктов техногенеза (в частности, компонентов «кислотных дождей»),

4) свойства, характеризующие передачу во времени-пространстве информации об экосистеме, что реализуется с помощью миграции ВОВ – водной и биогеохимической (И.М. Яшин, 1993).

*Ориентироваться в указанных показателях, уметь правильно выбрать те из них, изучение которых позволит с наименьшими затратами решить поставленную задачу, нелегко.* Трудность выбора состоит и в том, что конкретная проблема может быть решена **на основе разных показателей**, дополняющих друг друга. В любой почве одновременно протекает множество биохимических, физико-химических и иных реакций, взаимодействий и процессов, поэтому систему показателей следует ориентировать на ведущие признаки. Поэтому нередко можно встретить ошибки и неточные формулировки. Например, при использовании *санитарно-гигиенического показателя ПДК* в отношении почв прослеживается следующее. Так, в отношении свинца дается показатель 32 мг/кг почвы. Непонятно, о чем здесь идет речь? Почва биогенное тело. В ней много червей, микроорганизмов, кротов, нематод и т.д. Поэтому ПДК нужно конкретизировать в отношении почвенной биоты путем постановки серийных модельных опытов.

*Движущими силами* разрушения минералов и дифференциации минеральной массы почв таежных экосистем на генетические горизонты выступают, с одной стороны, компоненты ВОВ, а с другой – гравитационные потоки воды, ориентированные не только в вертикальном (нисходящем), но и в боковом направлении. Не менее активную роль в этих процессах играют и восходящие капиллярно-диффузные процессы перемещения воды и растворенных веществ.

Несмотря на обилие опытных данных, широкое использование в последние годы уникальных физико-химических методов анализа (хроматографии, радиоактивных изотопов, сорбционных лизиметров и других), а также приёмов моделирования (экспериментального, математического...) *диагностика подзолистых почв в полевых условиях*, равно как и *оценка своеобразия подзолообразовательного процесса* (и оподзоливания горизонтов) до сих пор *остаётся спорной и методически нерешённой задачей* (Яшин И.М., Кауричев И.С., 1996).

#### 5.4. Теория почвообразования

Дальнейшая разработка *теории почвообразования* вообще и, в частности, генетических аспектов подзолообразования, связана, на наш взгляд, с реализацией плодотворных идей Н.М. Сибирцева.

Н.М. Сибирцев наметил два подхода при нативной оценке подзолообразования:

- **первый – почвенный**, связанный с возникновением белёсых горизонтов вследствие процессов поверхностного оглеения «...в западинки попадает больше влаги...», поэтому «... мы вправе ожидать здесь процессов раскислительных и подзолообразовательных»;

- **и второй – биогеохимический** (экосистемный – в современном значении): генезис подзолистых почв – есть результат длительного воздействия хвойных и смешанных лесов на почвообразующие породы (в основном мореного типа) в условиях умеренно холодного и гумидного климата тайги.

В последующих работах отечественных и зарубежных специалистов был накоплен и обобщён огромный фактический материал не только о специфике подзоло,- и глееобразования в ландшафтах тайги, но и получены новые оригинальные сведения по вопросам географии, картографии, генезиса, окультуривания и классификации почв таёжной зоны. При этом оба генетических направления, сформулированные Н.М. Сибирцевым, развивались и, в той или иной мере, были экспериментально обоснованы.

Почвенное направление (оно также в принципе *биогеохимическое*), связано с реализацией биогеохимических функций анаэробных микроорганизмов, но проявляется на более низком уровне структурной организации веществ, чем подзолообразование (горизонтном) отражено в интересных работах С. Яркова (1947, 1961), Т. Аристовской (1964, 1980), Ф. Зайдельмана (1975, 1985, 1992, 1998), Я. Сюты (1962) и других. В наиболее законченной форме эта концепция нашла отражение в последней монографии Ф. Зайдельмана: «...подзолистые горизонты и подзолистые почвы... не возникают вне анаэробных условий, выноса значительных масс несиликатного железа, падения ОВП, лессиважа, периодического застоя влаги» (1998, с. 207).

Если принять за основу выше названные теоретические построения, то как тогда *объяснить стремительное оподзоливание почв под хвойными (еловыми) деревьями*, например, в подзоне южной тайги, протекающее без указанных выше (обязательных) условий глееобразования?

Биогеохимическое направление было сформулировано в трудах В.Р. Вильямса (1940) и развито в работах А.А. Роде (1937), В.В. Пономарёвой (1864), И. С.Кауричева (1965, 1977), А. Д. Фокина (1975, 1986), А. И. Карпухина (1986), И. М. Яшина (1993) и других авторов.

## 5.5. Новое в концепции подзолообразования

Наиболее важными положениями современной концепции о генезисе подзолистых почв являются (И. М. Яшин, И. С. Кауричев, 2000) – **рис. 15**:

1) признание процесса подзолообразования как результата функционирования таёжных (хвойных) биогеоценозов в особых ландшафтно-геохимических условиях таёжной зоны *при своеобразном биогеохимическом круговороте химических элементов*;

2) развитие представлений о характере *движущих сил*, вызывающих радикальную трансформацию многообразных веществ и их перераспределение в профиле почв подзолистого типа; здесь определенную роль играет *биогенное кислотообразование*.

3) разработка положения *об экологических аспектах гумусообразования* в почвах тайги, в частности, обоснование экологических функций водорастворимых органических веществ (ВОВ), имеющих ярко выраженные кислотные и комплексообразующие свойства;

4) раскрытие в модельных опытах совокупности микропроцессов и механизмов реакций, обуславливающих своеобразие сорбционно-десорбционных взаимодействий групп ВОВ (в том числе и нативных фульвокислот) с минералами и коллоидами почвы (в частности, кислотный гидролиз, хелатизация, комплексообразование, реакции восстановления без оглеения);

5) обоснование химического и молекулярно-массового состава и форм миграции новообразованных продуктов почвообразования;

6) формирование представлений *об уровнях и специфике проявления абиогенной (водной) миграции веществ*: профильный (почвенный в педоне), парцеллярный (экосистемный) и ландшафтный (в сопряжённых элементарных геохимических ландшафтах), а также об их критериях и параметрах: масштаб, скорость и мобилизация веществ;

7) накопление данных *о поведении химических соединений на почвенно-геохимических барьерах* (градиент барьера, импульс миграции...);

8) уточнение представлений о механизмах поглощения-выделения природных химических соединений (не только минеральных солей) в реальных экосистемах для диагностики периода и ёмкости биогенного круговорота элементов и уточнения *биогеохимических функций биоты*.

**С экологической точки зрения** трансформация почвенных минералов – следствие направленного воздействия продуктов жизнедеятельности групп живых организмов таёжных экосистем, в частности ВОВ (и фульвокислот), на почвообразующую породу, а затем и подзолистую почву с целью эффективного поиска и симбиозного усвоения макро- и микроэлементов питания, находящихся в труднодоступном и рассеянном состоянии. С помощью указанных процессов и элементарных реакций живые организмы успешнее адаптируются к суровым почвенно-биоклиматическим условиям тайги, формируя среду обитания – *подзолистую почву*.

Оценка *экстенсивных и интенсивных факторов миграции веществ* представляет самостоятельный и весьма актуальный раздел **экологического почвоведения** (Л.О. Карпачевский, 1996), методология которого, так или иначе, опирается на достижения теории динамики сорбции и хроматографии (В.В. Рачинский, 1964) и гидрофизические параметры оценки направленности и скорости движения природных почвенных растворов (Д.Л. Роуэлл, 1998). На основании собственных и литературных данных нами выполнен



Табл. 1. Сравнительная оценка движущих сил, специфика микропроцессов и продуктов глее – и подзолообразования в почвах таёжных экосистем и геохимических ландшафтов европейского Севера (Яшин И.М., Кауричев И.С., 1996)

| Основные явления и процессы  | Характеристика нативных процессов почвообразования  |  |
|--|---|--|
|  | Подзолообразование  | Глееобразование  |
| <p><b>I. Движущие силы</b> биогеохимической миграции и трансформации веществ:</p> <p>а) биогенный цикл;</p> <p>б) абиогенный цикл</p> <p><b>II. Ландшафтно-геохимические условия:</b></p> <p>а) характеристика элементарного ландшафта,</p> <p>б) тип миграции продуктов почвообразования,</p> <p>в) почвенно-геохимические барьеры,</p> <p>г) залегание почв по рельефу.</p> <p><b>III. Оценка БИК (тайга).</b></p> <p><b>IV. Почвенно-биогеохимическая обстановка</b> таёжной экосистемы:</p> <p>а) окислительно-восстановительные условия,</p> <p>б) преобладающие катионы в ПТК,</p> <p>в) характер превращения наземного растительного опада,</p> <p>г) образование и превращение групп ГС,</p> <p>д) реакции, типичные для</p> | <p>А) Таёжные экосистемы (высшие хвойные растения, мхи, лишайники, микроскопические плесневые грибы и продукты их жизнедеятельности);</p> <p>б) Вода как фактор переноса веществ в профиле почвы, ландшафте.</p> <p>А) Автономный ЭГЛ (элювиальный) и транзитно-элювиальный;</p> <p>б) Биогенный и абиогенный циклы миграции;</p> <p>в) Биогенный, карбонатный, окислительный; кислотный (гор. А<sub>2</sub> – осаждение Si);</p> <p>г) Почвы водоразделов, склонов моренных гряд, речных и озёрных террас. Биомасса ~ 500-300 (ц · га<sup>-1</sup>);</p> <p>Прирост – 40-80 (ц · га<sup>-1</sup>).</p> <p>А) Eh &gt; 350 мВ;</p> <p>б) Н<sub>3</sub>О<sup>+</sup> и Al<sup>3+</sup> (редко Са<sup>2+</sup>);</p> <p>в) Биогенное кислотообразование при ярком дефиците ионов Са<sup>2+</sup>, минерализация ВОВ и их миграция: формирование при этом в гор. А<sub>2</sub> и А<sub>2</sub>В группы ФК;</p> <p>г) В кислом интервале рН биополимеры типа ГС не формируются. Доминируют ВОВ с низкими молекулярными массами (ММ &lt; 1000);</p> <p>д) Доминирует биогеохимическое выветривание при активном участии ВОВ. Гравитационные потоки влаги устраняют разобщённость зон мобилизации и взаимодействия ВОВ с</p> | <p>а) <b>Анаэробные микроорганизмы</b> (и продукты их жизнедеятельности);</p> <p>б) <b>Вода</b> как фактор гидролиза поливалентных металлов; вода + ВОВ как фактор создания анаэробной среды.</p> <p>А) <b>Супераквальный</b> и субаквальный (подводный) – локальный и элювиальный ЭГЛ;</p> <p>б) <b>Диффузия и коллоидная миграция</b> Fe, Mn, Al и Si;</p> <p>в) <b>Глеевый</b> (без Н<sub>2</sub>S); <b>сероводородный</b>; периодически окислительный;</p> <p>г) <b>Почвы низин, болот, зарастающих озёр и депрессий.</b></p> <p>Точная диагностика затруднена.</p> <p>А) Eh &lt; 350 мВ (нередко &lt; 0);</p> <p>б) Н<sub>3</sub>О<sup>+</sup> и Fe<sup>2+</sup> (нередко и Al<sup>3+</sup> в кислой среде);</p> <p>в) <b>Биогенное кислотообразование</b> с накоплением индивидуальных органических веществ в составе ВОВ, их минерализация и трансформация;</p> <p>г) В зависимости от значения рН и наличия ионов Са<sup>2+</sup> <b>процесс образования</b> ГС может быть как активным, так и заторможенным (с различным качественным составом ГС);</p> <p>д) Доминирует биогеохимическое выветривание при активном участии ВОВ (как энергетического фактора). Очень динамичны реакции трансформации форм и состояний веществ: гидратация минералов, гидролиз поливалентных металлов и кремния – образование коллоидных систем. Сорбция ВОВ коллоидами. Модификация и ВОВ и самих коллоидов. Активный этап (при устойчивом оглеении) «быстро» затухает из-за ухудшения инфильтрации растворов. Доминируют диффузия и плёночно-капиллярное движение веществ. Трансформация биофильных элементов – N, P, S и образование восстановленных продуктов (Н<sub>2</sub>S, СН<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O).</p> <p><b>Оглеенные горизонты</b> – продукты жизнедеятельности</p> |

|   |  |   |
|---|--|---|
| <p>превращения почвенных минералов, е) <b>водный режим</b>, ж) реакция среды [H<sup>+</sup>], з) Биогеохимические эндемии.</p>  | <p>минералами. При этом зоны реакций постоянно обновляются, т. К. продукты удаляются. Сорбция ВОВ минералами, имеющими небольшую сорбционную ёмкость. Мобилизация в раствор ионов Ca<sup>2+</sup>. Перевод их в биогенный и абиогенный потоки.</p>   | <p>анаэробной микрофлоры при активном участии коллоидов;<br/>е) Застойный (грунтовое оглеение) или периодически застойно-промывной;<br/>ж) рН варьирует в широком интервале – от кислого до слабощелочного;<br/>з) Компоненты ВОВ резко ухудшают качество питьевых вод (колодцы, скважины...), ВОВ существенно усиливают миграцию любых металлов в почвах и пищевых (трофических) цепях...</p>  |
| <p>V. Особенности почвенно-геохимической миграции продуктов почвообразования:<br/>а) разнообразие мигрантов и их формы,<br/>б) дальное действие.<br/>VI. Основные горизонто- и профилеобразующие процессы почвообразования.</p> | <p>Е) Промывной;<br/>ж) рН &lt; 5,5;<br/>з) Дефицит ионов Ca<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, N, P, F вызывает болезни растений, а у животных и людей – малокровие, рахит и кариес зубов. Избыток ионов Al<sup>3+</sup> и Pb<sup>2+</sup> негативно влияет на нервную систему.<br/>А) Включает число геохимических барьеров (см. выше) и формы миграции веществ: ионно-молекулярные и металлорганические комплексные соединения; локальный перенос тонкодисперсных частиц возможен при дефиците ВОВ и оглеении отдельных горизонтов подзолистых почв;<br/>б) Почвы экосистем и сопряжённых ЭГЛ. Биогенное кислотообразование, кислотный гидролиз..</p> | <p>а) То же (см. выше), формы миграции веществ – коллоидная, металлорганические комплексы, диффузия ионов в оглеенных горизонтах;<br/>б) Глеевые горизонты почв тайги и частичный вынос продуктов почвообразования в депрессии. Развитие восстановительных процессов, образование гор. A<sub>0</sub><sup>тп</sup>, T и A<sub>д</sub><sup>т</sup>, гумусообразование, активное кислотообразование, гидролиз, коллоиды, кольматаж, сегрегация Fe, Mn, оглинивание гор. В, лессиваж (при поверхностном оглеении).<br/>Формирование газов с восстановительными функциями: H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, CO. Ферролиз минералов?</p> |

Анализ движущих сил, специфики реакций, особенностей состава и свойств новообразованных продуктов, формирующихся при развитии процессов глее – и подзолообразования – **табл. 1. Информация табл. 1** позволяет более полно охарактеризовать реализацию в почвах таежной зоны процессов глее- и подзолообразования.

Данные процессы реализуются на разных уровнях организации веществ в пространстве фаций и урочищ тайги. Напомним, что некорректно рассматривать процессы в почвах только на основе отобранных почвенных образцов и результатов моделирования.

Рассмотрим более подробно процесс глееобразования.

## 5.6. Процесс глееобразования

*Оглеение* – биохимический (микробиологический) восстановительный процесс, реализующийся *только в условиях устойчивого анаэробнозиса почв.*



Рис. 16. Побережье острова Большой Соловецкий сильно завалунено; здесь периодически возникают приливы и отливы, приносящие с соленой морской водой в лагуны и рыбу. Участки приморских **маршевых почв** (на фото) обычно сильно каменистые и коротко профильные с ярким оглеением крупнозернистого песка и окрашены в черный цвет за счет **восстановления сульфатов солей в сульфиды Fe, Mn**; вечной мерзлоты нет (фото И.М. Яшина, 2004).

Следствием оглеения является восстановление различных химических элементов, мобилизованных из гумуса и минералов, и формирование коллоидов, прежде всего Si, Fe, Mn, резко уменьшающих миграцию из почвы мобильных форм веществ.

*Сущность механизма оглеения в своей основе едина и в кислых, и в щелочных условиях развития разных типов почв: это дифференциация почвенных соединений по их агрегатному составу, формам миграции, кислотно-основным и иным свойствам. Это обстоятельство позволило некоторым авторам категорично утверждать, что глееобразование включает и процесс подзолообразования (Ф.Р. Зайдельман, 1974).*

Важную роль при этом играют гидратация и гидролиз, окислительно-восстановительные реакции и комплексообразование мобилизованных в растворимое состояние ионов металлов ( $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ ) с органическими лигандами ВОВ (в том числе и фульвокислотами): Т.В. Аристовская, И.С. Кауричев, С.В. Зонн, Е.Д. Никитин, А.Д. Фокин, И.М. Яшин, Я. Сюта, В. Блумфильд. Предлагаем самостоятельно прочитать указанные работы.

### Вопросы для самоконтроля

1. Назовите движущие силы трансформации веществ в почвах ЭГЛ.
2. Охарактеризуйте экологические функции компонентов водорастворимых органических веществ (ВОВ) при гумусообразовании почв тайги.
3. Почему в таежной (лесной) экосистеме активно формируются компоненты ВОВ с кислотными и комплексообразующими свойствами?
4. Как выявить кислотные экологические функции ВОВ?
5. Назовите основные методы изучения компонентного состава ВОВ таежной экосистемы.
6. Что такое фульвокислоты подзолистых почв? Можно ли считать их артефактом или феноменом таежных экосистем?
7. Что такое «комплексные барьеры миграции» в почвах?
8. Объясните процесс сорбции на барьерах миграции.
9. Что такое процесс подзолообразования?
10. Перечислите процессы, ответственные за формирование подзолистых почв тайги.
17. Объясните термин «подзолы».
18. Что такое глееобразование?
19. В чем состоит взаимосвязь процессов глее- и подзолообразования?
20. Процессы гумификации и гумусообразования.
21. Процесс лессиважа.



Рис. 16а. Профессор И.М. Яшин отбирает растения пойменного луга реки Корелки на зольный анализ; **на заднем плане** – один из экспонатов Музея Деревянного зодчества «Малые Корелы» под открытым небом - деревянная церковь (фото Е.В. Мухина, 2003).

## Глава 6. Изучение водной миграции веществ в ландшафтах

Одним из важнейших агентов миграции (по А.И. Перельману, 1975) химических элементов является *биогеохимический круговорот, имеющий, как правило, мощный аккумулятивный вектор*. Совокупность явлений, охватывающих трансформационный пул веществ в экосистемах тайги, неразрывно связана с круговоротом органического углерода, способного совместно с атомами кислорода, водорода и азота формировать многообразные (и взаимопереходные) формы органических соединений – основу жизни на Земле. Этот круговорот неразрывно сочетается с другими уникальными природными макропроцессами – *фотосинтезом, азотфиксацией и гумусообразованием*. **Первый процесс** является стабильным и мощным источником новообразованных биоорганических веществ, свободного молекулярного кислорода и закодированной информации в синтезированных органических и металлорганических соединениях. **Последний** способствует формированию хранилища биологической информации\* и энергии в почвах. Экологические условия, в частности, таёжной зоны обуславливают образование и функционирование в почвах *динамичных, неравновесных и самоорганизованных систем* различного генезиса, например, гумуса. В их развитии активное участие принимают компоненты водорастворимых органических веществ (ВОВ) с кислотными и комплексообразующими функциями; они являются связующим звеном между *фотосинтезом и гумусообразованием*. В компонентах ВОВ зашифрована и передается по трофической и иным цепям экосистем известная информация функционирующей биоте. Компоненты ВОВ, очевидно, можно рассматривать и как **биокорректоры** (готовые программные вставки), используемые живыми организмами для исправления нарушенных участков биологических (генетических) программ.

### 6.1. Оценка масштаба водной миграции веществ

*При оценке масштаба водной (внутрипрофильной) миграции следует выполнить следующее.*

- 1) рассчитать величины масштаба абиогенной миграции (по генетическим горизонтам),
- 2) выполнить оценку средней линейной скорости миграции в профиле почвы,
- 3) осуществить разработку концепции «**абиогенных полей**» миграции в биогеоценозе,
- 4) рассчитать коэффициент интенсивности водной миграции  $k_{\text{миг}}$ ,
- 5) охарактеризовать «поведение» химических элементов на сорбционных барьерах миграции.

---

\* Биологические структуры кроме «памяти» о прошлом сочетают в себе самоорганизацию (порядок, дубликацию) и химическую активность; эти особенности передаются и гумусу.



Рассмотрим эти положения.

*1. Расчет величины масштаба абиогенной миграции* (на примере ВОВ). При расчете величины масштаба миграции водорастворимых химических соединений из генетических горизонтов почвы целесообразно использовать единую размерность – массу веществ (мг, г, кг).

Для этого искомую концентрацию, например, углерода компонентов ВОВ в элюатах, полученных в лаборатории из определенной массы конкретного сорбента ( $Al_2O_3$ , ионитов, угля), переводят в содержание (концентрацию углерода ВОВ умножают на объем элюата). Затем находят массу ВОВ во всей навеске сорбента и пересчитывают ее на расчетную площадь –  $1 \text{ м}^2$ , исходя из рабочей площади сорбционного лизиметра.

**Пример:** в 1 н. NaOH десорбенте ( $V = 250 \text{ мл}$ ) из  $50 \text{ г } Al_2O_3$  установлена концентрация органического углерода ВОВ, равная  $125,0 \text{ мг/л}$ . Следовательно, масса  $m$  данного мигранта в элюате будет равна  $31,25 \text{ мг}$ :

$$C \cdot V = 125 \text{ мг/л} \cdot 0,25 \text{ л} = 31,25 \text{ мг} \quad (12)$$

а на всю навеску сорбента ( $100 \text{ г}$ ) в сорбционной колонке она составит  $62,5 \text{ мг}$ . Исходя из соотношения рабочей площади лизиметра ( $66,4 \text{ см}^2$ ) и расчетной поверхности почвы ( $1 \text{ м}^2$ ), находят искомую величину массы углерода ВОВ, вытесненную из сорбента щелочью.

В следующей аналитической операции используют водный раствор  $0,1 \dots 1,0 \text{ н. } H_2SO_4$ , который пропускают через сорбент после его промывки водой ( $200 \dots 300 \text{ мл}$ ). Диагностированную массу углерода ВОВ суммируют с предыдущей.

Поскольку часть компонентов ВОВ **сорбируется  $Al_2O_3$  необратимо** (по типу химической сорбции), целесообразно определять углерод ВОВ непосредственно в сорбенте по методу Тюрина в модификации Симакова, *соблюдая меры предосторожности при нагревании* (возможен выброс части хромовой смеси). Искомая величина общего органического углерода в  $Al_2O_3$  выражается массовыми долями процентов.

**Пример:** допустим, в верхнем слое  $Al_2O_3$  (общей массой  $125 \text{ г}$ ) содержание  $C_{\text{общ}}$  равно  $0,35\%$  (т.е.  $350 \text{ мг}$  углерода на  $100 \text{ г}$  поглотителя, а на всю навеску в колонке –  $437,5 \text{ мг}$ ). В нижнем слое  $Al_2O_3$  –  $0,17\%$  (общая масса  $Al_2O_3$  в этом слое –  $109 \text{ г}$ ), или  $185,3 \text{ мг}$  на всю навеску. По первому слою абиогенный вынос углерода ВОВ составит  $65,9 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}^{-1}$ , по второму (нижнему) –  $27,9 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}^{-1}$ . <sup>2</sup> Общий вынос –  $93,8 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}^{-1}$ . Полученную величину целесообразно сравнить с расчетами кислотно-щелочных элюатов

<sup>2</sup> Вынос рассчитывают из следующего соотношения:

$$\begin{aligned} & 437,5 \text{ мг} - 66,4 \text{ см}^2 \text{ (рабочая площадь колонок)} \\ & x - 10^4 \text{ см}^2 \text{ (расчетная площадь почвы)} \end{aligned} \quad (13)$$
$$x = 65,9 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}^{-1}$$

и сделать вывод о природе миграционных групп ВОВ. Отдельно рассчитывают массу ВОВ в приемниках вод<sup>3</sup>.

*Ориентировочный вынос* мигранта (например, ВОВ из гор. А<sub>0</sub> подзолистой почвы в лесном биогеоценозе) при использовании метода сорбционных лизиметров в первом приближении можно прогнозировать, исходя из соотношения следующих реальных (выявлены в натурном опыте) величин:

$$m = \frac{Q \cdot C_0}{S \cdot t} = \frac{2,7 \text{ л} \cdot 0,250 \text{ г/л}}{6,64 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2} = 101,7 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}^{-1} \quad (14)$$

где **m** – масса углерода ВОВ, поступившая из лесной подстилки в зону действия лизиметрической установки (г/м<sup>2</sup>·год<sup>-1</sup>) в условиях Няндомского стационара Архангельской обл.;

**Q** – объем воды, профильтровавшейся через сорбционную колонку с активированным углем и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и поступившей в приемник – 2,7 л;

**C<sub>0</sub>** – концентрация углерода ВОВ в природном почвенном растворе (0,250 г/л);

**S** – площадь сечения потока гравитационной воды, заданная в виде *рабочей площади сечения сорбционного лизиметра* (в опыте 66,4 см<sup>2</sup>); **t** – время функционирования лизиметров (один год).

Объем фильтрующейся (гравитационной) влаги, поступившей в зону функционирования лизиметра, можно *ориентировочно оценить*, исходя из водного баланса подзолистой почвы (А. Роде, 1963) в ельнике Тверской обл. (в пределах реального водосбора).

Анализ натуральных данных из работ А.А. Роде (1963) показывает, что в *расходной части водного баланса* первое место – от общего расхода – занимает десукция древостоем (24...45%), второе – испарение осадков с крон (22...25%), третье – разные виды стока (в том числе и инфильтрация воды в почву – 3...24%).

Рассматриваемые параметры весьма динамичны во времени. Исходя из средней величины годовых осадков 579 мм и 24%-м расходе на миграцию в почве, фильтрующаяся масса воды в профиле подзолистой почвы составит 139 мм. Известно, что масса воды в 1 мм жидких осадков на 1 га составляет 10 т. Отсюда масса воды, просочившейся через расчетную площадь 1 м<sup>2</sup>, будет равна 139 кг/м<sup>2</sup>.

На основе соотношения рабочей площади сорбционного лизиметра (407 см<sup>2</sup>) и расчетной поверхности почвы (1 м<sup>2</sup>) найдем искомую величину: 5,7 л H<sub>2</sub>O. При площади сорбционного лизиметра 66,4 см<sup>2</sup> эта величина будет равна примерно 1 л. При использовании метода сорбционных лизиметров целесообразно исследовать особенности фильтрации растворов. Скорость фильтрации влияет на характер абиогенных потоков веществ в почвах.

---

<sup>3</sup> **Концентрацию Сорг** ВОВ в приемных водах лизиметров умножают на объем природного раствора (л). Затем, исходя из массы Сорг ВОВ (г), рассчитывают вынос ВОВ. Результат суммируют с прежним, получая величину масштаба абиогенной миграции по данному лизиметру (г/м<sup>2</sup>·год<sup>-1</sup>).

## 6.2. Методология изучения абиогенных потоков веществ

Данная методология **авторская**, и тесно связана с оценкой состояния и функционирования экосистем. Как следствие, она сопряжена с разработкой концепции *абиогенного «поля миграции»*, которая отражает разноориентированный вынос ВОВ в сопряженных и автономных ЭПА того или иного биогеоценоза (или элементарного ландшафта). А также потоки веществ за счет корневых выделений, выщелачивания атмосферными осадками из вегетативных органов растений. При стационарных исследованиях *необходимо обосновать места закладки траншей* и ответить на вопрос, какие математические приемы следует использовать при оценке достоверности и точности результатов полевых наблюдений?

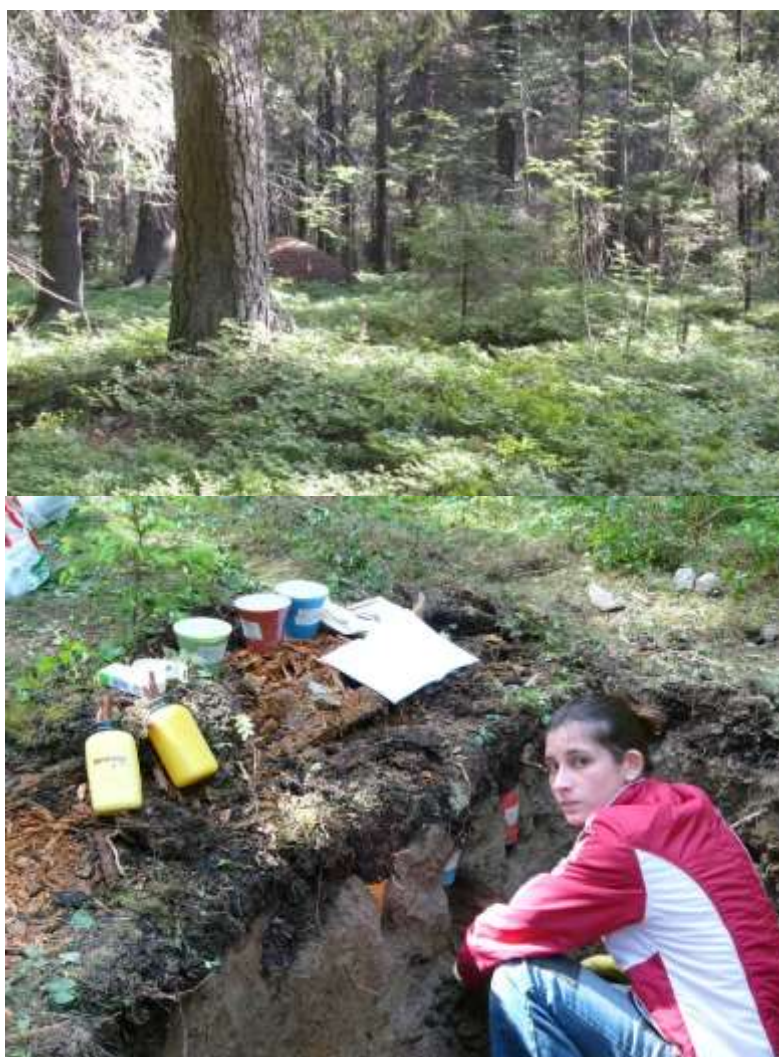


Рис. 17. Стационарная площадка в таежном лесопарке (ельнике-черничнике) вблизи Петрозаводска (район «Перевалка», ул. Университетская), где проводится экологический мониторинг оценки экологического состояния фаций и водной миграции ВОВ в каскадном геохимическом ландшафте – **плакор – склон – «подошва склона»** с 2002 года как на вырубках, так и в нативных лесных фациях (фото И.И. Яшина, 2012).

Опыт использования МСЛ (И.М. Яшин, 1993, 2013) позволяет заключить, что наиболее полная информация об абиогенных потоках может быть получена на трех уровнях структурной организации веществ:

- почвенном (профильном),
- парцеллярном (экосистемном),
- ландшафтном.

Первый уровень, как показывает анализ литературных источников, основательно изучен. Второй и третий только начинают разрабатываться (И.М. Яшин, И.С. Кауричев, 1996; Ю.А. Семенов с сотр., 1993).

Потоки, например, ВОВ в южно-таежном биогеоценозе можно дифференцировать на следующие составляющие:

- а) сток в составе атмосферных осадков с вегетативных органов высшей и низшей растительности,
- б) миграция ВОВ из растительного опада и лесных подстилок,
- в) поступление ВОВ в почву в составе корневых выделений и гумуса,
- г) аэральный привнос веществ углерода в условиях развивающегося экологического кризиса экосистем (рис. 15,16).

Результаты сопряженного изучения вертикальной нисходящей миграции ВОВ в парцеллах елово-разнотравного биогеоценоза подзоны южной тайги (стационарная площадка в смешанном лесу учхоза «Михайловское» Московской области) свидетельствуют о четкой дифференциации масс ВОВ в почвенном пространстве, обусловленной как парцеллярной структурой и

Состоянием биогеоценоза, так и своеобразием организации ЭПА в пространстве. Показано, что ЭПС стационара в настоящее время функционируют не только сравнительно автономные, но и сопряженные ЭПА. **У первых** практически отсутствует боковой внутрипочвенный привнос ВОВ, и они развиваются как бы обособленно.

**Вторые** взаимосвязаны местными внутрипочвенными потоками влаги и ВОВ, а локальный сток замыкается вокруг западины с оглееными почвами подзолистого типа.

**Однако балансовая оценка** абиогенного потока ВОВ в элювиальной части нативной (лесной) сильноподзолистой и **окультуренной** дерново-подзолистой почв указывает *на общий отрицательный баланс  $C_{орг}$  ВОВ* и на нисходящий вынос современных продуктов почвообразования. По масштабу он примерно в 2 раза менее интенсивен в окультуренных дерново-подзолистых почвах: здесь активно функционирует органо-минеральный *сорбционный барьер миграции*. Вынос веществ с нисходящим потоком влаги заторможен. Это очень важный факт для почв агроландшафтов. *Поэтому диагностика пахотных почв таежной зоны по степени окультуренности должна быть сохранена. Почвы следует изучать по профилям.*

В то же время, опираясь только на указанные результаты, *нельзя сформулировать законченную концепцию миграции веществ, поскольку здесь не учтены: биогенный поток, особенности перераспределения почвенной влаги* (направленность потоков – нисходящие, восходящие и боковые).

### 6.3. Интенсивность водной миграции химических элементов в ландшафтах

Еще в 1917 г. американский исследователь Смит разработал метод количественной оценки интенсивности водной миграции некоторых химических элементов в ландшафтах. Его методический подход основывался на учете соотношений среднего гидрохимического состава речных вод с химическим составом горных пород. В дальнейшем Б.Б. Польшин (1956) развил идеи Смита и обосновал хорошо известные специалистам-почвоведом, геохимикам и ландшафтоведом *ряды миграции* химических элементов. На основе этих изысканий А.И. Перельман (1975) предложил формулу расчета *коэффициента водной миграции химического элемента*  $k_{\text{миг}}$  в реальном ландшафте. Автор полагал, что интенсивность миграции химического элемента в ландшафте можно охарактеризовать с помощью соотношения этого элемента в природных водах и горных породах (с учетом Кларка, % оксида элемента).

В одной из работ А.И. Перельман отмечал, что **определять  $k_{\text{миг}}$**  можно как по «Кларку» в литосфере (в качестве ориентира), так и по валовому содержанию элемента в почве, почвообразующей породе. Лучше использовать Кларки химических элементов в почвообразующей породе.



Рис. 18. Аспирант А.А. Петухова устанавливает сорбционные лизиметры в профиле почвы на одном из «ключей» **каскадного геохимического ландшафта** в таежном лесопарке Петрозаводска для учета интенсивности водной миграции углеродсодержащих веществ (ВОВ)  $k_{\text{миг}}$  и ионов тяжелых металлов – свинца, кадмия и др. (фото И.М. Яшина, 2011).

#### Генезис «почвоутомления»

Гродзинский А.М. (1965) и Берестецкий О.А. с соавт. (1984) считают, что накопление в почве промежуточных органических продуктов



трансформации растительных остатков, в частности, **фенольных компонентов**, вызывает микробиологическое «почвоутомление» в агрофитоценозах. Источниками индольных и фенольных компонентов являются, с одной стороны, продукты метаболизма конкретных групп микроорганизмов (например, низших плесневых грибов – источников микотоксинов), а с другой – поступление в раствор (мобилизация) из растительных остатков и гумусовых веществ (И.С. Кауричев и Яшин И.М., 1973; Райс Э., 1978).

В этой связи необходимо отметить интересные и оригинальные работы Фокина А.Д. (1975), Карпухина А.И. (1980, 1986, 1990) и Черникова В.А. (1986). Карпухин А.И. (1986), например, с помощью методов бумажной распределительной, гель-хроматографии и других физико-химических методов идентифицировал органические вещества индивидуальной природы в гидролизатах гумусовых соединений: аминокислоты, сахар, органические кислоты и фенольные компоненты, составляющие соответственно 1,5-3,0; 5,2-8,2; 2,6-7,8; 5,9-9,3% от массы препарата гумусовых соединений (ГС).

Автор констатирует, в частности, что вследствие комплексообразующей способности как индивидуальные, так и специфические компоненты *регулируют поступление* химических элементов в растения. Этот важный факт нашел отражение в работах А.Д. Фокина.

#### 6.4. Диагностика кислотности таежной экосистемы

*Природа кислотности таежных экосистем более уникальна, чем это традиционно представляется. В настоящее время учитывается только один ее аспект (хотя и весьма важный) – почвенный. Но почвы существуют не сами по себе, а являются компонентами экосистем.*

В условиях масштабных техногенных нагрузок на фации, урочища и ландшафты необходимо выделять *три основных вида кислотности* – как устойчивых источников ионов водорода и трансформаторов почвенных соединений – минералов, коллоидов и гумусовых веществ:

- 1) *почвенная (химическая) – это традиционная кислотность,*
- 2) *биогенная (адаптационная) отражает биогенное кислотообразование (предложена впервые в 1989 г. И.М. Яшиным, В.А. Черниковым и И.С. Кауричевым при диагностике процесса таежного гумусообразования),*
- 3) *антропогенная кислотность, связанная с выпадением «кислотных дождей» и внесением кислых форм минеральных удобрений в агроландшафтах (азотных и калийных).*

Почвенная кислотность достаточно полно изучена. При ее оценке очень часто используются реагенты, которых нет в экосистемах. Поэтому получаемые результаты нередко неадекватны реальным параметрам кислотности. Отсюда делаются порой некорректные выводы о движущих силах трансформации веществ в ландшафтах. Так, заметно преувеличена роль угольной кислоты (чрезвычайно химически слабой: при диссоциации

первой ступени  $\text{H}_2\text{CO}_3$  из 10 млн. молекул диссоциирует только одна молекула). И эта кислота будет трансформировать почвенные минералы и коллоиды? Конечно, нет. В таежных экосистемах функции трансформаторов выполняют *более сильные органические кислоты, фульвокислоты и полифенолы.*

Антропогенную кислотность обуславливают аэрозоли серной, азотной и иных кислот, образующиеся в атмосфере из антропогенных выбросов оксидов серы, азота... и выпадающие на растительный покров и поверхность почв. Они выступают не только новым и устойчивым источником протонов, *обуславливая подкисление среды, но и мощным негативным фактором, вызывающим химическую деградацию гумусовых соединений* (как основы почвенного плодородия). Совместно с углеводородами, диоксинами, радионуклидами, тяжелыми металлами кислоты вызывают экологическую деградацию ландшафтов – основу жизнедеятельности биоты Земли.

Биогенная (адаптационная) кислотность отражает особенности функционирования таежной биоты. Она играет исключительную важную роль в трансформации почв таежных экосистем. При традиционном подходе высокая кислотность почв ландшафтов тайги рассматривается как отрицательный факт. **С агрономической точки зрения** это бесспорно, а с экологической – некорректно: высокая кислотность создается биотой. Но это пока не учитывается специалистами. *Они увлечены химическим подходом при исследовании почв агроэкосистем, поскольку пахотные почвы сельскохозяйственных угодий и были основным объектом исследования.* Перейдем к новой (авторской) концепции кислотообразования.

### **Биогенная кислотность таежной экосистемы**

Сообщества живых организмов таежных экосистем (древесная хвойная растительность, кустарнички, мхи, лишайники, почвенные микроорганизмы) эффективно функционируют в суровых биоклиматических условиях благодаря уникальному *механизму биогенного кислотообразования* (И.М. Яшин, 1989,1993). С его помощью живые организмы создали среду обитания – подзолистую почву. Здесь важно не только рассматривать вид экологической кислотности, но и обязательно учитывать экологические аспекты такого макропроцесса, как *гумусообразование* (И.М. Яшин, И.С. Кауричев, В.А. Черников, 1996), поскольку через биогенный и абиотический потоки ВОВ реализуется экологическая (и генетическая) взаимосвязь двух основополагающих процессов в биосфере – фотосинтеза и гумусообразования. За счет устойчивого биогенного обогащения почвенных растворов компонентами ВОВ с кислотными и комплексообразующими функциями (и педогенными фульвокислотами) гумусообразование в подзолистых почвах таежных экосистем протекает *в основном в направлении формирования низкомолекулярных и миграционноспособных соединений с  $\text{MM} \leq 1000$  а.е.м.* Эти соединения и обуславливают широкий спектр реакций

взаимодействия с техногенными соединениями в почвах. В результате формируются различные по составу и подвижности органно-минеральные соединения, содержащие металлы – токсиканты: **Be, Hg, Cd, Sr** и другие, способные поступать в трофические цепи экосистем, сырье, продукты питания и в живые организмы, вызывая заболевания и эндемии.

Компоненты ВОВ таежных ландшафтов обуславливают своеобразные черты генезиса почв подзолистого типа и специфику современных почвенных процессов, в частности, развитие восстановительных реакций без избыточного увлажнения. Поэтому эколого-геохимический прогноз поведения удобрений, мелиорантов и элементов – токсикантов *должен учитывать как биогеохимические функции ВОВ, так и экологические особенности процессов глее-, подзоло- и гумусообразования в таежной экосистеме.*

#### **6.4.1. От теории к практике применения хроматографического анализа в эколого-геохимических изысканиях**

*В Тимирязевской сельскохозяйственной академии* вопросам теории сорбции и хроматографии всегда уделялось большое внимание.



Рис. 19. Профессор И.М. Яшин исследует морфологию дерново-подзола контактно-осветленного супесчаного на двучленах перед установкой сорбционных лизиметров **ранней весной в фации сосняка-лиственничного на плакоре Лесной опытной дачи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева** (автофото И.М. Яшина, 2006).

Фундаментальные исследования в этом направлении были выполнены, в частности, Е.Н. Гапоном и В.В. Рачинским. Результаты этих работ постепенно внедрялись в практику. Поэтому не случайно, что на кафедре почвоведения в 1959 году И.С. Кауричев разработал метод лизиметрических хроматографических колонок (проще – метод сорбционных лизиметров – И.Я.). МСЛ стал широко применяться в различных ландшафтах для оценки масштаба и формы миграции в почвах, например, комплексных железоз-

органических соединений (рис. 20). Со временем спектр решаемых почвенно-экологических задач постепенно расширялся. Возникла необходимость, с одной стороны, обоснования и применения таких типов сорбентов как активированный уголь и синтетические ионообменные смолы, а с другой – разработки других конструкций сорбционных лизиметров для учета *восходящей и боковой миграции* веществ в почвах. Основной вклад в реализацию указанных вопросов внесли лабораторные и полевые стационарные изыскания И.М. Яшина (1972, 1973, 1993, 2004), А.Д. Кашанского (1972, 1978) и А.Д. Фокина (1969, 1975). Оценка сорбционных характеристик сорбентов включала системное исследование сорбционных взаимодействий природных органических веществ с целевыми поглотителями: кинетику, статику и динамику сорбции.

В 1969-1972 гг. И.М. Яшин (1973) выполнил исследования по совершенствованию известной аналитической схемы W. Forsyth (1947) при фракционировании на активированном угле БАУ (высокозольном) и (низкозольном) водорастворимых органических веществ почв таежных экосистем. Автор показал *нецелесообразность* применения в схеме W. Forsyth при десорбции ФК 0,5 н. водного раствора NaOH, 0,1% раствора HCL, а также их диализа и использование высокозольного активированного угля на этапе выделения препаратов фульвокислот с низкой зольностью.

Важно отметить, что W. Forsyth вначале получал *из образца почвы* кислотный и щелочной элюаты (исходя из цели опыта), а потом сорбировал органические вещества на высокозольном угле БАУ. В принципе, этот автор реализовал *химический подход* при изучении ФК, сорбционно закрепленных на почвенной матрице. В свое время такой прием исследования ФК можно назвать инновационным. Однако он имел известные недостатки, которые в 1972-1993 гг. были исправлены в серийных опытах И.М. Яшиным.

Наряду с химическим, существует **экологический подход при оценке природных фульвокислот** (И.М. Яшин, 1993, 2013). Рассмотрим его кратко.

### **6.5. Исследование экологических функций фульвокислот таежных экосистем**

Методологию решения задачи о составе, свойствах и функциях компонентов ВОВ почв подзолистого типа тайги предложил И.М. Яшин (1972,1974). Сама идея и приемы изучения фульвокислот И.М. Яшина были поддержаны И.С. Кауричевым, А.Д. Фокиным и В.А. Черниковым. Это важно отметить, поскольку в то время доминировал *химический подход* при исследовании гумусовых веществ почвы. *А фульвокислоты рассматривались большой группой специалистов (например, немецкими) в качестве продуктов кислотного гидролиза высокомолекулярных гуминовых веществ почвы.*

Новая методология диагностики фульвокислот по И.М. Яшину включала *два этапа*: первый – *полевой* и второй – *лабораторный*. **На первом этапе** сорбционные лизиметры с низкозольным активированным углем

устанавливались под генетические горизонты в почвенных профилях (в катене) для учета мобилизации и водной миграции ВОВ. *Лабораторный* этап заключался в десорбции компонентов ВОВ из всей массы угля в динамике сначала 90 %-м водным ацетоном и водой, а затем – 1% гидрата окиси аммония и водой (после извлечения из почвы колонок с сорбентами) и доставки их в лабораторию. Таким образом, в составе ВОВ выделялись и исследовались *две группы природных соединений*: 1-я – это органические вещества **индивидуальной природы** (водо-ацетонового элюата; эта группа веществ слабо трансформирована микроорганизмами) и 2-я – **специфические органические соединения** (водо-аммонийного элюата) – собственно фульвосоединения – очень химически активные вещества (сюда входят и кислоты и их соли, в частности, *комплексные железо-органические соединения*). Летучие десорбенты (ацетон и аммиак) при 35-40<sup>0</sup>С удалялись на водяной бане, элюаты концентрировались, а индивидуальные органические вещества диагностировались с помощью хроматографического анализа на бумаге с предварительным переводом из солей в кислоты.

Главное достоинство *метода сорбционных лизиметров* – получение фактической информации в реальных почвенно-геохимических ландшафтах: при изучении современных процессов почвообразования, оценке кислотности почв, миграции веществ в составе удобрений, а также при диагностике степени химического загрязнения почвенного покрова углеводородами нефти, тяжелыми металлами, антигололедными компонентами. *Гидрологи применяют лизиметрические устройства, предназначенные для оценки водного баланса почв и грунтов, дополняя их тензиометрами. Почвоведов и экологов больше интересуют миграционные формы продуктов почвообразования и экотоксикантов.*

Основы метода сорбционных лизиметров (МСЛ), обстоятельно рассмотрены в работах И.М. Яшина (1973, 1986, 1993, 2003, 2013), а также в учебном пособии «Теория и практика метода сорбционных лизиметров в экологических исследованиях» И.С. Кауричев, И.М. Яшин, В.А. Черников (1996). Ключевыми аспектами МСЛ являются:

- 1) конструктивные особенности используемых сорбционных лизиметров;
- 2) сорбенты, применяемые при решении конкретных экспериментальных задач;
- 3) методы фракционирования компонентов ВОВ и органно-минеральных комплексов, сорбированных тем или иным (иными) сорбентами;
- 4) идентификация индивидуальных органических веществ в растворах соответствующими методами;
- 5) расчет величин масштаба миграции веществ, коэффициентов мобилизации и миграции.

При исследовании миграции веществ необходимо располагать *собственными или литературными данными о фильтрационных параметрах*



генетических горизонтов почвы. Конструкции сорбционных лизиметров были рассмотрены ранее.

Эффективность функционирования сорбционных лизиметров зависит от сложения почв, а также фильтрации в колонках растворов (рис. 18,20).

*В этой связи в песчаных подзолах водную миграцию продуктов почвообразования целесообразно исследовать с помощью крупнозернистых сорбентов (катионита и анионита) в сорбционных колонках. В суглинистых почвах, напротив, в сорбционных колонках следует располагать слои тонкодисперсных сорбентов, чтобы не было «провальной» фильтрации почвенных растворов. Не соблюдение указанных методических приемов приводит к артефактам и трудно объяснимым результатам.*



Рис. 20. А - студентка-эколог А. Щербаненко исследует дерново-подзол контактно-осветленный супесчаный, развитый на двучленах, **в фации сложного ельника на террасе реки Межа Центрально-лесного биосферного заповедника Тверской области**; В – сорбционные колонки (крупный план) в супесчаном микро подзоле почвы, развитой на двучленных отложениях (фото И.М. Яшина, август, 2015).

Например, **закладка в колонки сухих сорбентов** приводит к формированию над ними в почвах *воздушных пузырей*, препятствующих проникновению почвенных лизиметрических вод в сорбционные лизиметры. *Отсутствие дренажа в колонках* также ухудшает фильтрацию растворов через слои сорбентов. Если под днищем колонки не оставить небольшого пространства, то фильтрация растворов будет затруднена. Есть еще ряд специальных методических нюансов, которые изложены в авторских работах. *Вообще, чтобы получить хороший результат, работу нужно сделать самому.*





Рис.21. Соискатель кафедры экологии РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева Р.А. Атенбеков устанавливает сорбционные лизиметры в почвах **эко-геохимической катены** на окультуренном сенокосе ОАО «Дружба» Переславль-Залесского района Ярославской области для учета водной миграции веществ (фото И.М. Яшина, июнь 2015).

### Вопросы для самоконтроля

1. Что такое коэффициент водной миграции химического элемента?
2. Напишите формулу для расчета коэффициента водной миграции химического элемента
3. От каких факторов зависит коэффициент водной миграции в ландшафтах тайги?
4. Как определить, происходит ли водная миграция веществ в профиле дерново-подзолистой почвы таежной зоны?
5. В чем отличие параметров ПДК и  $k_{\text{миг}}$ : правила статичности и динамичности.
6. С помощью какого метода можно эффективно изучать водную миграцию веществ в почвах тайги?
7. В чем заключаются особенности установки колонок в профиле почвы (см. рис.19)?
8. Какие сорбенты используют в сорбционных лизиметрах?
9. Для чего изучают динамику сорбции компонентов почвенных растворов на сорбентах перед их применением в колонках?
10. Объясните процесс сорбции веществ сорбентами в колонках: поглощение происходит полностью или наблюдается некоторый проскок веществ за слой сорбента?
11. Какие сорбенты применяются для очистки воздуха?

## Глава 7. Эко-геохимические аспекты превращения веществ в почвах

Лизиметрические исследования по трансформации порошков доломита и цеолита<sup>4\*57</sup> (Na, Ca форма) в гор. А<sub>пах</sub> окультуренной дерново-подзолистой почвы Полевой опытной станции МСХА показали весьма низкую интенсивность процесса мобилизации ионов Ca<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> и Cd<sup>2+</sup> из мелиорантов в летний сезон (табл.2).

Табл. 12. Трансформация порошков доломита и цеолита в сорбционных лизиметрах, установленных в гор. А<sub>пах</sub> дерново-подзолистой окультуренной почвы (Полевая опытная станция МСХА; экспозиция: 11 июня – 8 сентября). И.М. Яшин, 2004.

| Варианты опыта   | Объём лизиметрической воды, мл | Концентрация ионов из сорбентов в 0,1 н. HNO <sub>3</sub> элюатах, мг/л |                   |                     | Концентрация ионов в приёмниках сорбционных лизиметров, мг/л |                  |                  | Масштаб миграции ионов, мг/м <sup>2</sup> ± σ <sup>2</sup> ** |                  |
|--|--------------------------------|---|-------------------|---------------------|--|------------------|------------------|---|------------------|
|  |                                | Ca <sup>2+</sup>  | Zn <sup>2+</sup>  | Cd <sup>2+</sup>    | Ca <sup>2+</sup>   | Zn <sup>2+</sup> | Cd <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup>  | Zn <sup>2+</sup> |
| 1. Контроль* (колонки с сорбентами: КУ-2 и уголь)  | 125                            | $\frac{2,1}{0,4}$   | $\frac{0,4}{0,6}$ | $\frac{0,02}{0,03}$ | 1,2  | 0,33             | 0,02             | 41,9 ± 5,4  | 13,5 ± 3,7       |
| 1-й вариант: Колонки с сорбентами (КУ-2 и уголь + 10 мг CdCl <sub>2</sub> );                     | 140                            | $\frac{1,7}{0,2}$   | $\frac{0,9}{0,4}$ | $\frac{175,0}{9,7}$ | 2,4  | 0,44             | 5,43             | 65,8 ± 8,9  | 19,4 ± 4,2       |
| 2-й вариант: трансформация порошка Ca(Mg)CO <sub>3</sub> + 10 мг CdCl <sub>2</sub> (и сорбенты); | 75                             | $\frac{9,2}{2,0}$   | $\frac{2,9}{2,4}$ | $\frac{51,0}{4,0}$  | 0,1  | 1,30             | 0,08             | 83,7 ± 11,7   | 54,1 ± 7,3       |
| 3-й вариант: трансформация цеолита + 10 мг CdCl <sub>2</sub> (и сорбенты).                       | 50                             | 7,3   | 0,4               | 107,3               | 0,7  | 0,30             | 0,04             | 80,7 ± 10,5   | 7,5 ± 2,2        |

*В контроле* (колонки только с сорбентами) масштаб миграции (мг/м<sup>2</sup>) из почвы составил: для Ca<sup>2+</sup> – 41,9; Zn<sup>2+</sup> – 13,5; по Cd вынос не рассчитывали из-за очень низких концентраций этого элемента (табл.2). Основная мигрируемая масса Ca<sup>2+</sup> диагностирована в приёмниках лизиметрических вод – 53,6%; с катионита КУ-2 вытеснено 39,3%, а с угля – 7,1% от общей его массы. Следовательно, кальций преимущественно мигрирует в форме отрицательно заряженных комплексов и почти 40% его массы переносится в форме катионов (простых и сложных), сорбируясь катионитом КУ-2 в H<sup>+</sup>-форме.

<sup>4</sup> В вариантах 3 и 4 расчётный масштаб миграции ионов Ca и Zn следует уменьшить соответственно на величины 65,8 и 19,4 мг/м<sup>2</sup>, отражающие значения контроля (вынос из гор. А<sub>пах</sub>, глубина 13-15 см).

**Примечание:** числитель – десорбировано в статике из катионита КУ-2 (H<sup>+</sup> форма); знаменатель – десорбировано в статике из активированного угля. Поглощение ионов Cd<sup>2+</sup> тонкодисперсными порошками доломита и цеолита рассчитывали по разности между внесённым (10 мг – общим) количеством и содержанием в сорбентах, плюс в приёмниках вод.

\* В контрольном варианте масштаб миграции C<sub>орг</sub> ВОВ в слое 0-15 см под культурой козлятника за период вегетации составил 6,7 ± 0,8 (2,1-9,5) г/м<sup>2</sup>. При этом катионит КУ-2 сорбировал 17,4% C<sub>орг</sub> ВОВ, а активированный уголь – 79,5%. В приёмники вод поступило 3,1% органического углерода от общей миграционной массы ВОВ.

\*\* σ<sup>2</sup> – дисперсия (квадрат среднеквадратичного отклонения) по 2-3 повторностям колонок и 4-6 слоям сорбентов. Данный параметр отражает пространственное варьирование масштаба миграции.

*Во втором варианте опыта*, отличающегося от первого только целевым добавлением в сорбционные колонки водного раствора  $\text{CdCl}_2$ , масштаб миграции в почве для ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$  соответственно составил ( $\text{мг/м}^2$ ): 65,8 и 19,4. При этом преобладающее количество ионов  $\text{Ca}^{2+}$  было также обнаружено в приёмниках лизиметрических вод – 77,3%, поглотилось катионитом КУ-2 – 20,5% и активированным углем – 2,3%.

*Для цинка* выявлены следующие формы миграции в пахотном горизонте дерново-подзолистой почвы (вариант – контроль – % от общей массы): электронейтральные и отрицательно заряженные комплексы (не сорбирующиеся катионитом и углем) – 44,4; положительно заряженные комплексы (по сорбции на катионите КУ-2) – 22,2; прочие (в том числе и устойчивые цинкорганические соединения по сорбции на угле) – 33,4% от общей мобильной массы данных ионов.

Внесённый в сорбционную колонку **кадмий** (в лаборатории в виде водного раствора  $\text{CdCl}_2$ ) количественно поглотился сорбентами: катионит КУ-2 сорбировал 87,5%, а уголь – 4,9% Cd. В приёмники вод поступило 7,6% от исходной массы ионов  $\text{Cd}^{2+}$ . Таким образом, основная масса ионов  $\text{Cd}^{2+}$  в колонке (*без мелиорантов и при небольшой массе ВОВ*) мигрировала с потоком влаги в форме простых катионов.

*В варианте*, где изучалась трансформация **порошка доломита** –  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  – с внесением 10 мг хлорида кадмия в виде водного раствора, происходила следующая обменная реакция:



Поскольку в данной реакции первый реагент заметно преобладал над вторым, имело место количественное осаждение ионов  $\text{Cd}^{2+}$  на карбонатном барьере. Действительно, в азотнокислых элюатах из сорбентов диагностировано **27,5%** внесённой массы (в т. ч. из КУ-2 – **25,5%**). В слое мелиоранта  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  было задержано **72,4%**, а 10 мг ионов  $\text{Cd}^{2+}$ , внесенных в сорбционный лизиметр, способствовали проникновению в приёмник вод ионов данного тяжелого металла.

Расчётный **масштаб миграции кальция**, с учётом трансформации доломита, за летний период составил **83,7 мг/м<sup>2</sup>**. Для ионов  $\text{Zn}^{2+}$  он равен 51,4 мг/м<sup>2</sup> (данные рассчитаны без вычета массы ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$  в контроле).

## 7.1. Химическое загрязнение почвенного покрова

Наиболее чётко особенности загрязнения *почв тяжёлыми металлами* (ТМ) можно выявить по оценке состава твердой фазы снегового покрова. Исследования ряда авторов показали, что при движении от центра промышленного города (г. Москвы) к периферии концентрация ТМ снижается, но всё равно остается в 2-8 раз больше, чем в почве. Одним из приемов нормирования антропогенной нагрузки является предельно-допустимая концентрация (ПДК). Специалисты пытаются учесть степень токсичности химических элементов, что даёт возможность оценить педохимические аномалии и качество продуктов питания, воды. В табл. 3 приведены значения ПДК (валовые формы) для почвы. Какой почвы?

Табл. 3. ПДК тяжелых металлов в почвах\* (из кн. «Методические указания, 1987; Санитарные нормы, 1988)

| № п/п | Химический элемент      | ПДК, мг/кг с учетом фона (Кларка) |
|-------|-------------------------|-----------------------------------|
| 1     | Сурьма (Sb)             | 4,5                               |
| 2     | Марганец (Mn)           | 1500                              |
| 3     | Ванадий (V)             | 150                               |
| 4     | Марганец+ванадий (Mn+V) | 1000+100                          |
| 5     | Свинец (Pb)             | <b>30</b>                         |
| 6     | Мышьяк (As)             | 2,0                               |
| 7     | Ртуть (Hg)              | <b>2,1</b>                        |
| 8     | Свинец+ртуть (Pb + Hg)  | <b>2,0+1,0</b>                    |
| 9     | Медь (Cu)               | <b>55</b>                         |
| 10    | Никель (Ni)             | <b>85</b>                         |
| 11    | Цинк (Zn)               | 100                               |

\* ПДК ряда тяжелых металлов в воде, мг/л: Cr — 0,1, Mn — 1,0; Ni — 0,1; Cu — 1,0; Zn — 0,03; Cd — 0,01; Hg — 0,005; Pb — 0,05; As — 0,05.

**Недостаток ПДК:** неясно, о каких типах почв идет речь и в каких ландшафтах эти почвы находятся? Очень небольшая масса ТМ поступает в почвы агроландшафтов как с минеральными, так и с органическими удобрениями (табл. 4). Из минеральных удобрений наибольшая масса ТМ *поступает с фосфорными удобрениями; а также при известковании с известью и фосфоритной мукой* (при фосфоритовании песчаных почв). Если применяют осадки сточных вод (ОСВ), то их внесение строго нормируют по величине ОДК (остаточной допустимой концентрации) тяжелых металлов.

**Основными загрязнителями агроландшафтов являются пыль, дым и сажа тепловых электростанций (ТЭС), автотранспорт, меловые отходы карьеров,** в частности, в почвах Коломенского района Московской области варьирование содержания ТМ (по данным ПИЦАС «Московский») следующее, мг/кг: Cu (2-48), Zn (2,94), Cd (0,2-1,9), Pb (3-36), Ni (2-27).

Рассмотрим **пример расчета** мобилизации ионов ТМ из антропогенных загрязнителей. При мощности гор.  $A_{\text{пах}}$  20 см, величине расчетной площадки

1 м<sup>2</sup> и плотности почвы  $\rho = 1,25 \text{ г/см}^3$  получим массу почвы: 250 кг на 1 м<sup>2</sup>. В ней содержится (по максимуму), мг/м<sup>2</sup>: 12000 Cu; 23500 Zn; 475 Cd; 9000 Pb; 6750 Ni.

Табл. 4. Среднее содержание тяжёлых металлов в мелиорантах и удобрениях, мг/кг (Почвы Московской области, 2002, с. 375)

| Мелиоранты и удобрения   | Pb          | Zn          | Cu          | Cd        | Ni         | Cr          |
|--|-------------|-------------|-------------|-----------|------------|-------------|
| 1. NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>                             | 0,25        | 0,5         | 1,0         | 0,3       | 0,9        | 0,6         |
| 2. (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>             | 0,6         | 0,4         | 1,0         | 0,9       | 4,3        | 0,6         |
| 3. Са (Н <sub>2</sub> РО <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> , двойной | 38          | 14          | 13          | 3,5       | 17         | 41          |
| 4. Са(Н <sub>2</sub> РО <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> , простой  | 1,3         | 6,0         | 0,8         | 0,25      | 7,5        | 0,0         |
| 5. Са(НРО <sub>4</sub> ) –преципитат                           | 43          | 19          | 14          | 3,5       | 25         | 10          |
| 6. КСl   | 13          | 12          | 4,5         | 4         | 19         | 0,5         |
| 7. Калийная соль (40%)   | 6           | 30          | 10          | 2,5       | 19         | 0,5         |
| 8. К <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                              | 6           | 18          | 1,0         | 1,0       | 0,0        | 0,0         |
| 9. Азофоска  | 10,5        | 31          | 20          | 1         | 11         | 3           |
| 10. Нитрофоска   | 5           | 8           | 11          | 1         | 4          | 3           |
| 11. Аммофос  | 7           | 34          | 30          | 0,6       | 4          | 3           |
| 12. Нитроаммофос   | 5           | 20          | 11          | 0,4       | 5          | 5           |
| 13. Са <sub>3</sub> (РО <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> –фосфорит  | 30          | 81          | 45          | 1         | 74         | 40          |
| 14. Известняковая мука   | 38          | 21          | 6           | 4         | 30         | 37          |
| 15. Меловые отходы   | 45          | 80          | 60          | 2         | 10         | 46          |
| 16. Навоз (с влаж. 75%)  | 3           | 12          | 2           | 1         | 9          | 9           |
| 17. Зола ТЭС   | 0,1         | 675         | 862         | 0         | 108        | 80          |
| 18. Фосфогипс  | 42          | 67          | 49          | 5         | 9          | 69          |
| 19. Зола (окисл. Уголь)  | 77          | 342         | 60          | 16        | 320        | 31          |
| 20. Пиритные огарки  | 4500        | 10.000      | 4000        | не опр.   | Не опр.    | Не опр.     |
| 21. Осадки ст.вод (ОСВ)  | 40-130      | 80-3100     | 40-1600     | 10-180    | 20-360     | 50-1200     |
| <b>22. Допустим. Сод. В ОСВ</b>                                | <b>1200</b> | <b>3000</b> | <b>1200</b> | <b>20</b> | <b>200</b> | <b>1200</b> |

На основе предложенного нами коэффициента мобилизации  $k_{\text{моб}} = m_{\text{ж.ф.}}/m_{\text{тв.ф.}}$  (где  $m_{\text{ж.ф.}}$  — масса ионов ТМ в растворе и  $m_{\text{тв.ф.}}$  — масса ТМ в трансформируемых веществах — твердой фазе; приняв, что ионы ТМ из СаСО<sub>3</sub> мобилизуется в 100 раз менее активно, чем ионы Са<sup>2+</sup> в гор. ЕЛ (он обычно припахивается, особенно при эрозии), получим искомую величину **0,0058% или 5,8 мг ТМ на 100 г почвы.**

А из всей массы ТМ, например Cu в почве масса ионов Cu<sup>2+</sup> в растворе ( $m_{\text{ж.ф.}}$ ) после мобилизации составит: при  $k_{\text{моб}} = 0,0058$ , содержания в  $m_{\text{тв.ф.}} = 12.000 \text{ мг/м}^2$ ,  $m_{\text{ж.ф.}} = k_{\text{моб}} \cdot m_{\text{тв.ф.}} = 0,0058 \cdot 12000 = 69,7 \text{ мг/м}^2$ . При этом нужно учесть вовлечение ионов ТМ как в биогенный, так и в абиогенный потоки, а также новый привнос с аэрозолями (~ 42%) в виде сажи, пыли, дыма.

Для Zn<sup>2+</sup> мобилизация составит 136,3 мг/м<sup>2</sup>; для Cd<sup>2+</sup> — 2,8 мг/м<sup>2</sup>; для Pb<sup>2+</sup> — 52,2 мг/м<sup>2</sup>; и Ni<sup>2+</sup> — 39,2 мг/м<sup>2</sup> (И.М. Яшин, 1993).

Для Москва-реки в Коломенском районе использовали величины  $a_x$  (в межень) 400 мг/л, Кларки ТМ (из о. А.И. Перельмана, 1975),  $m_{\text{ж.ф.}}$  — из о. «Техногенное загрязнение речных экосистем» (2002).

Рассмотрим расчет  $k_{\text{миг}}$  для ионов Pb<sup>2+</sup>:

$$k_{\text{миг}} = \frac{0,07 \cdot 100}{0,0016 \cdot 400} = 10,9 \quad (19)$$



Наиболее часто в водах изучаемых рек диагностируются Cr, Cu, Co, Zn, реже Pb. Концентрации ионов Fe и Mn выше ТМ обычно в 80-100 раз. Получены следующие величины  $k_{\text{миг}}$  по расчетам: для Cr — 2,7; Cu — 213; Co — 7; Zn — 3,3; Ni — 4,3; Hg — 156; Cd — 167; F — 0,1; Pb — 11; Mn — 0,03; Fe — 0,002; Ca — 0,2; Sr — 0,22; As — 74.

Таким образом, в ландшафтах рассматриваемого района активными водными мигрантами являются *Hg, Cd, As, Pb, Cu, Co*. Активными биогенными мигрантами являются Ca, Sr, F, Fe, Mn, Zn, Cr, Ni, которые накапливаются в кормах и продуктах питания (табл. 5).

**Токсичность ионов ТМ** обусловлена довольно широким их распространением в земной коре (хотя и в низких концентрациях), высокой биогенной и водной миграцией и, наконец, способностью аккумулироваться в пищевых цепях и в организме животных, в том числе и человека. «Коварство» ионов ТМ: они загрязняют почвы, воды и растения достаточно медленно (постепенно), а специалисты ориентированы на *высокое содержание* и «сиюминутное» воздействие на биоту по типу «доза-эффект». Такого опыта у исследователей пока не имеется, поэтому здесь возможны неожиданные экологические ситуации, непредвиденные сукцессии биоты и эндемии. Рассмотрим кратко эколого-геохимические особенности ряда ТМ и их воздействие на человека.

Ртуть (ионы  $Hg^{2+}$ ) могут весьма активно аккумулироваться в пищевых цепях экосистем. Микрофлора почвы быстро приспосабливается к ядовитому действию ртути, а водорастворимые органические вещества типа фульвокислот (ФК) трансформируют  $Hg^0$  в *ртутьорганические соединения*. Эти новые продукты трансформации антропогенных веществ отличаются более высокой миграцией и в почве, и в водах, и в пищевых цепях.

По сведениям Г.М. Варшал (1983) в присутствии ФК растворимость водного оксида ртути *возрастает в 20 раз*, т.е. комплексообразование ртути (II) с ВОВ резко увеличивает миграционную способность  $Hg^{2+}$ . Происходит также формирование наиболее опасных для биоты ртуть-органических соединений.

Хром (Cr) попадает в почву при использовании в качестве удобрений осадков сточных вод (ОСВ), поступает с канализационными стоками, а также при внесении шлаков металлургических производств, как мелиорант содержащих Cr.

Свинец (Pb) известен и широко используется людьми с древних времён. Глазурь, которой древние мастера покрывали глиняную посуду, также содержит Pb. Свинцовые водопроводы впервые были построены в Древнем Риме. Производство хрусталя, эмалей, замазок, лаков, красок, спичек, пиротехнических изделий — далеко не полный перечень областей применения свинца. Отсюда ионы  $Pb^{2+}$  и поступали в организм человека. В воздух основная масса Pb выбрасывается автотранспортом, а меньшая — при сжигании каменного угля.

Кадмий (Cd) наиболее активно накапливающийся в растениях табака (до 2 мг/кг), что в 20-60 раз превышает ПДК в продуктах питания. В организме человека Cd накапливается во всех органах, но больше всего — в почках и печени. Cd весьма широко используется в различных сплавах, катализаторах, красителях и стабилизаторах красок, антикоррозийных покрытиях.

### Вопросы для самоконтроля.

1. Назовите основные группы экотоксикантов.
2. Перечислите наиболее токсичные ионы тяжелых металлов.
3. Основные загрязнители агроландшафтов Подмосковья.
4. Механизмы трансформации частиц пыли и золы в таежном лесу.
5. Роль органических кислот в трансформации продуктов антропогенеза.
6. Коэффициент интенсивности водной миграции химического элемента.
7. Роль кислотности в трансформации и миграции тяжелых металлов.
8. Токсичность ионов тяжелых металлов.
9. Причины мобилизации в раствор из твердой фазы химических элементов.
10. Значение гумусовых веществ в трансформации и водной миграции ионов тяжелых металлов.
11. Воздействие компонентов нефтепродуктов на почвы.
12. Воздействие нефтепродуктов на гидробионты.



Рис. 22. Река Межа в Центрально-лесном биосферном заповеднике – начало половодья; протекая по местным базисам эрозии, реки в таежной зоне, вбирают многочисленные мелкие притоки, вода которых обогащена органическими и органоминеральными соединениями, выщелоченными из подзолистых почв и таежной биоты. Среди мигрантов есть и небольшое количество экотоксикантов (тяжелые металлы, фенолы, микотоксины), негативно влияющие на гидробионты, а также экологическую безопасность воды (фото И.М. Яшина, 16.04.2014).

## 7.2. Методы, используемые при очистке и дезинфекции поверхностных вод

Экологи, токсикологи и гидрохимики отмечают, что в водных источниках заметно возросла концентрация различных *возбудителей заболеваний*. Это связано с изменением гидрохимического состава поверхностных природных вод и микробиологическим загрязнением за счет привноса *бытовых стоков и фекальных масс*. Известно, что в бытовых и сточных водах встречаются микроорганизмы, вызывающие инфекционные (и эпидемиологические) заболевания: дизентерию, брюшной тиф, гепатит, лямблиоз, сальмонеллез. Из кишечника и моче – половых путей человека выделяется более 100 видов вирусов, которые проходят через простые очистные сооружения и попадают



Рис. 23. Курорт Анапа: на пляже небольшой морской бухты в дневные часы скапливается большое количество отдыхающих, особенно летом; водообмен мелководной бухты с акваторией моря здесь явно ограничен, поэтому морская вода в ней **оказывается загрязненной микроорганизмами больных людей и экологически опасной**; *не случайно местные жители на лодках уходят в море, и там купаются* (фото И.М. Яшина, сентябрь 2005).

В водоемы (рис. 23). В курортных городах подобные стоки очень часто сбрасываются вблизи пляжей не очищенными от загрязнителей в мелкие морские лагуны. Коммунальные службы, по-видимому, предполагают их естественную дезинфекцию и самоочищение в соленой воде. Однако на мелководье, даже в морской воде, инфекция сохраняется довольно длительное время, достаточное для заражения людей (туристов и отдыхающих, особенно детей) в жаркие летние месяцы курортного бума. *Вместо отдыха, у людей часто возникают болезни*. В этой связи многие люди предпочитают отдых не на море, а на Кавказских Минеральных курортах России (Железноводск, Пятигорск, Кисловодск, Ессентуки). И это правильно. Кавминводы – одна из замечательных курортных зон России.

Установлено, например, что за сутки больной или инфицированный человек, купаясь в теплой морской воде, выделяет 2-7 x 10<sup>8</sup> шт. болезнетворных микробов, а 1 грамм фекалий содержит в среднем 2 млн. цист лямблий. Этот пример наглядно показывает, с одной стороны, насколько важен здесь *экологический мониторинг* за эко-токсикологическим состоянием почв, стоков, свалок и самой морской воды, а с другой – какие высокие требования должны предъявляться к обеззараживанию и очистке не только морских вод мелководных лагун, но и стоков.

### ***Методы, используемые при очистке и дезинфекции природных вод***

Промышленные сточные воды зачастую биологическим путем не очищаются, поэтому существенное значение имеет их локальная физико-химическая обработка до сброса в общегородской коллектор. Бытовые сточные воды обычно хлорируют, озонируют, обрабатывают пероксидом водорода (это экологически «чистый» окислитель), а также подвергают воздействию УФ – света и гамма-излучению.

**Хлорирование** – один из самых распространенных методов дезодорации сточных и бытовых вод. Несмотря на простоту и компактность установок для хлорирования, доступность и дешевизну хлора и его производных (ClO<sub>2</sub>, HOCl) очистка воды активным хлором может иметь ограниченное применение. Связано это с недостаточной глубиной окисления растворимых органических веществ (нативных и искусственных), образованием токсичных хлорорганических соединений, необходимостью применения высоких доз хлора, токсичностью самого реагента – хлора.

**Озонирование** – технологический прием, при котором происходит одновременное окисление органических веществ, растворенных в воде, обесцвечивание, дезодорация, обезвреживание стоков и насыщение воды кислородом. Озон используется также для очистки вод от цианидов, роданидов, сероводорода, мышьяка и иных экотоксикантов, а также от гумусовых веществ, пестицидов, фенолов и углеводородов нефти. Озон эффективен при водоподготовке вод, используемых для пищевых целей. Озон представляет собой модификацию O<sub>2</sub>, но сильно от него отличается: он интенсивно окрашен, токсичен и взрывоопасен. ПДК для озона в рабочей зоне составляет 0,0001 мг/л. Эффективность использования озона резко возрастает в присутствии сорбентов, например, активированного угля.

**Пероксид водорода** – по сравнению с озоном имеет следующие преимущества: он хорошо растворим в воде, устойчив в водных растворах, окисляет широкий спектр органических соединений при различных величинах pH, нетоксичен.

В силу своих технологических преимуществ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> нашел широкое применение в зарубежной практике очистки сточных и бытовых вод. *Использование пероксида водорода отличает дефицит реагента и его высокая стоимость.*

Вообще очистка воды включает ряд последовательных этапов, прежде чем использовать физико-химические методы и само обеззараживание воды:



**первый** – отстаивание, аэрация, озонирование и обработка  $H_2O_2$ ;  
**второй** – коагуляция коллоидов кремния, железа, алюминия, марганца коагулянтами (например, сульфатом железа), а также флокуляция и флотация;

**третий** – центрифугирование, биологическая очистка и использование физических методов обеззараживания воды. Затем наступает **четвертый этап** – фильтрация и ультрафильтрация. Завершается процесс очистки воды пятым этапом – сорбцией растворимых (ионно-молекулярных) форм химических соединений (в том числе и органических лигандов *искусственного генезиса и природных компонентов* – органических и фульвокислот, полифенолов и других сложных веществ, выщелачиваемых атмосферными осадками из лесных подстилок, торфов, смывов с вегетативных органов растений и опада) различными сорбентами: оксидом алюминия, активированным углем, порошком кальцита (или доломита) в специальных абсорберах, в динамическом режиме.

При этом особое внимание уделяется свойствам сорбентов и, прежде всего, *активированных углей* – уникального поглотителя различных классов органических веществ из водных растворов (а также газов и микроорганизмов) по типу обратимой молекулярной сорбции, а также анализу математических уравнений изотерм сорбции – по Лэнгмюру, Фрейндлиху, Генри на этапе подбора сорбентов.



Рис.24. Профессора, доценты и научные сотрудники некоторых ВУЗов Москвы, Владивостока, Краснодара, Воронежа, Томска на научно-педагогической стажировке в университете **ВOKU** в Вене (Австрия) по проекту **TEMPUS ES**: профессор Виллибальд Ллойдскальд объясняет работу одного из новых приборов по автоматической диагностике гранулометрического состава почв; в этой же инновационной лаборатории есть новые приборы для **оценки свойств, безопасности и гидрохимического состава вод**, используемых для пищевых целей (фото И.М. Яшина, **апрель 2013**).



В этой связи рассмотрим использование сорбентов в специальных устройствах – **сорбционных лизиметрах** – для оценки водной миграции различных веществ и химических элементов в почвах тайги и лесостепи. Напомним, что учет миграции веществ с помощью других лизиметрических конструкций (**без сорбентов**) – лизиметры Эбермайера, Шиловой, Дерома – приводят к артефактам. В приемных сосудах таких лизиметров весьма активно протекают биохимические процессы трансформации ВОВ и органоминеральных комплексных соединений.

Появляются газы и соли. *Анализ форм миграции металлов в таком случае становится ошибочным. На стр.233 дается экологическая оценка поверхностных вод Европейского Севера России.*

### **7.3. Особенности применения метода сорбционных лизиметров в эколого-геохимических исследованиях**

Метод сорбционных лизиметров используется для уточнения процессов почвообразования и **химического загрязнения** почвенного покрова, а также оценки масштаба и форм миграции некоторых элементов в почвах. Среди мигрантов (ВОВ) могут быть как ингибиторы, так и стимуляторы жизнедеятельности биоты.

Основные положения данного метода изложены, в частности, в учебном пособии И.С. Кауричева, И.М. Яшина и В.А. Черникова «Теория и практика метода сорбционных лизиметров в экологических исследованиях» (1996.143 с.). Новую информацию можно найти в монографии И.М. Яшина «Мониторинг процессов миграции и трансформации веществ в почвах». М.: РГАУ-МСХА. 2013. – 183 с.

На рис.23 показана установка в почвенном профиле сорбционных лизиметров. Причем преобладающая часть времени у исследователей идет на подготовку сорбционных колонок: приобретение и химическую очистку песка, сорбентов, набивку колонок, их упаковку в коробки и рюкзаки и доставку на отдаленные стационарные площадки. Много рабочего времени уходит также на выкапывание траншеи и полнопрофильного почвенного разреза на стационарах. Но главное – правильно установить сорбционные лизиметры в почве. Это длительный процесс. *Причем он происходит в условиях тайги, когда вспотевшего от напряженной работы человека, «отвлекают» комары, мошка, нередко и морозящие холодные дожди.*

В указанных выше книгах рассматриваются следующие вопросы:

1. методология постановки модельных лабораторных и полевых экспериментов;
2. изучение и выбор стационарных площадок;
3. оценка физико-химических свойств сорбентов;
4. аналитические схемы разделения и диагностики веществ, выделенных из сорбентов;

5. техника подготовки сорбционных лизиметров и их установка в профиле почвы;
6. фактический материал авторов по вопросам трансформации и миграции веществ в почвах и почвенном покрове;



Рис. 25. **А** – не нарушенный профиль подзола контактно-осветленного супесчаного на двучленных отложениях в 12 м от разреза «**В**», у основания большого муравейника (август 2012); **В** - установка сорбционных лизиметров в профиле **трансформированного подзола на вырубке** в таежном лесопарке Петрозаводска (июль 2009): подзолистый и иллювиально-железистый горизонты здесь не только завалированы **ВОВ**, но и заилены коллоидами, мигрирующими из контактно-осветленного горизонта, где ярко выражено оглеение (фото И.М. Яшина).

7. оценка «поля миграции» и иных миграционных параметров;
8. краткая характеристика экологических функций ВОВ с кислотными и комплексобразующими свойствами, использованными для уточнения концепции «Экологическая кислотность» таежной экосистемы.

Каждый из этих вопросов может быть выбран студентами в качестве темы для написания курсовой работы (если она имеется в учебной программе курса). Информация данной темы тесно связана с *практикой применения хроматографического анализа в почвоведении и экологии*, в частности, этапы разработки и внедрения метода сорбционных лизиметров.

**Сорбционный лизиметр** представляет собой **конструкцию**, состоящую из прочной пластмассовой колонки (наподобие цветочного горшка), двух лабораторных вакуумных шлангов и приемника лизиметрических вод (им может быть пластмассовая канистра емкостью 1-2 л). При исследовании

водной миграции ВОВ и органоминеральных соединений в почвах на удаленных от базы стационарах (например, на Соловках, в дельтах рек Северной Двины и Мезени), используют только сорбционные колонки. Их упаковывают в полиэтиленовую пленку и связывают попарно.

Предварительно колонки маркируют лейкопластырем.

На основании теоретической информации о методе сорбционных лизиметров, студентам дается задание: нарисовать в Рабочей тетради по дисциплине «Экогеохимия ландшафта» схему сорбционного лизиметра, объяснить принцип его действия и возможности данного метода.

### **Вопросы для самоконтроля.**

1. Кто автор метода сорбционных лизиметров?
2. В каком году был предложен данный метод?
3. Какие модификации МСЛ вам известны?
4. Какие сорбенты используются в сорбционных лизиметрах?
5. Как можно очистить кварцевый песок для сорбционных лизиметров?
6. Какие недорогие и эффективные сорбенты применяют в сорбционных лизиметрах?
7. Предложите *свой вариант усовершенствования* метода сорбционных лизиметров.
8. Возможен ли проскок веществ за слой сорбента в колонках и к чему он приводит?
9. От каких факторов зависит эффективность функционирования сорбционного лизиметра?
10. В сорбционной колонке эффективно применять один или два слоя однотипного сорбента?
11. В каких случаях применяют гетерогенные слои сорбентов в колонках?
12. Какая аналогия существует между сорбционной колонкой и почвой?
13. Как рассчитывается масштаб миграции вещества с помощью метода сорбционных лизиметров?
14. С помощью каких реагентов проводится химическая очистка кварцевого песка для сорбционных лизиметров?
15. Охарактеризуйте методику десорбции компонентов ВОВ с сорбентов сорбционных лизиметров.
16. Как рассчитать массу сорбента для сорбционного лизиметра?
17. Для каких целей в лаборатории проводят опыты по кинетике, статике и динамике сорбции, в частности, компонентов ВОВ.
18. Какие конструкции сорбционных лизиметров можно применить, кроме «цветочных горшков»?

Ответив правильно на поставленные вопросы, студенты в Рабочей тетради выполняют контрольные задания, указанные ниже.

**Контрольные задания** для выполнения самостоятельной работы по проблеме оценки экологической ситуации (в заданных преподавателем ландшафтах) с помощью метода сорбционных лизиметров.

1. Охарактеризуйте методику химической очистки кварцевого песка (традиционную и по методу И.М. Яшина, 1989,1993).
2. Как «набивают» сорбционную колонку песком и сорбентами? *Нарисуйте схему сорбционной колонки для изучения восходящей миграции веществ. Какую роль в функционировании сорбционной колонки играет чистый кварцевый песок?*
3. Нарисуйте каскадную схему установки сорбционных лизиметров в почвенном профиле.
4. Объясните, какие типы сорбентов и для каких целей применяют в почвенно-экологических исследованиях? В рабочей тетради укажите: Гидрофобные сорбенты - это...

Гидрофильные сорбенты - это...

Ионообменные сорбенты - это ...

Какие сорбенты применяют в сорбционных колонках для сорбции органических кислот из почвенных растворов в таежных экосистемах?

5. Какие сорбенты используют в колонках для сорбции Fe-, Cd-, Zn-, Pb- органических комплексных соединений из почвенных растворов подзолистых почв тайги?
6. Охарактеризуйте методику расчета масштаба миграции веществ в почве с помощью метода сорбционных лизиметров. *Масштаб миграции*, например, углерода ВОВ можно рассчитать на основе следующих параметров: объясните, каких?
7. Какие процессы лежат в основе хроматографического анализа?
8. Кто из специалистов РГАУ-МСХА внес весомый вклад в совершенствование метода хроматографии и его практическое применение в почвоведении, экологии, биохимии, физиологии растений?
9. Охарактеризуйте приоритеты научных исследований профессора И.С. Кауричева и его учеников – профессоров А.И. Карпухина, И.М. Яшина.
10. Какие сорбенты наиболее эффективны для сорбции органических веществ из почвенных растворов подзолистых почв тайги?
11. Какие сорбенты могут быть использованы для очистки поверхностных вод родников и колодцев в селитебных ландшафтах тайги?
12. Какую *опасность для здоровья людей таят коммерческие фильтры* очистки воды?
13. Почему *на коммерческих фильтрах* очистки воды *отсутствуют* необходимые сведения о сорбентах, их емкости поглощения, подготовке к работе (и регенерации) и другие данные?



14. *Полезна ли для здоровья людей и животных вода, тщательно очищенная от катионов и анионов?*
15. На каких установках в промышленном масштабе происходит очистка миллионов литров Московской воды для продажи (хотя ее можно употреблять в пищу без всякой очистки)? Или это просто **коммерция**?



Рис. 26. **Оврагообразование в лесостепной зоне** – один из характерных почвенно-геологических процессов; он сопряжен с засолением черноземов (фото И.М. Яшина, 2012).

16. Объясните процесс оврагообразования, активно проявляющийся в ландшафтах степной, лесостепной и таежной зонах России с позиции водной миграции веществ (рис. 26).



Рис. 27. **Подзона южной тайги** – агроландшафты ОАО «Дружба» Ярославской области **почти не испытывают эрозии** на участках почвенного покрова, защищенных кустарниковой и травянистой растительностью (фото И.М. Яшина, 2015)



17. Охарактеризуйте процессы почвообразования, которые могут быть эффективно исследованы в настоящее время в подзоне южной тайги.
18. Известно, что почва, которую изучают в современный период, сформировалась очень давно; гумусовые вещества, сорбционно закрепленные на почвенной матрице, это «старые» гумусовые вещества. Какие формы гумуса изучаются с помощью метода сорбционных лизиметров? Что это дает с экологической точки зрения?

### **Вопросы для самоконтроля.**

1. Причина формирования оврагов в лесостепной зоне – отсутствие постоянного растительного покрова или другие явления?
2. Оврагообразование – почвенно-геологический процесс, не зависящий от растительного покрова и антропогенеза?
3. Оврагообразование в значительной мере связано с породами и рельефом?
4. Оврагообразование тесно связано с характером выпадающих атмосферных осадков и снежным покровом (режимом таяния)?
5. Назовите мероприятия, заметно затормаживающие оврагообразование.
6. Объясните миграцию мелкозема, сносимого при оврагообразовании.
7. Охарактеризуйте отличия развития оврагов на пашне и в фациях сенокосов.
8. Влияние оврагообразования на качество поверхностных вод.
9. Какую роль играют барьеры миграции в процессе оврагообразовании.
10. Объясните, в каких ландшафтах, и в каких формах рельефа оврагообразование протекает наиболее интенсивно: на речных террасах, в поймах рек, на склонах холмов и увалов, а также на склонах коренных берегов рек?
11. Возможна ли *полная остановка оврагообразования*, или это масштабный процесс, связанный с особенностями геологических пород, суффозией и водной миграцией?
12. Назовите основные процессы почвообразования в черноземах.
13. Назовите процессы почвообразования в подзолистых лесных почвах.
14. Назовите основные процессы почвообразования в пахотных слабо окультуренных подзолистых почвах.
15. Назовите процессы почвообразования в почвах южной тайги.

#### 7.4. Эко-геохимические аспекты эволюции черноземов

*Проблема эволюции черноземов* – одна из актуальных в настоящее время. В известной мере это связано с *высокой ценой на участки черноземов* (хотя стоимость ареалов почв некорректно именуют «землями»; на самом деле земли – это ландшафты). Эволюция и деградация черноземов связана с масштабными антропогенными воздействиями (кислотные дожди, выбросы сажи, частиц золы; некорректная агротехника – «чистые пары») и аридизацией климата. Засухи и устойчивая жаркая погода приводят к пожарам и *восходящей миграции легкорастворимых солей из близко залегающих засоленных пород* в иссушенные и сильно нагретые гумусовые горизонты. Этому «**помогают**» земледельцы, которые необоснованно занимают большие площади под «чистые пары». Поверхность почвы без травянистой растительности нагревается до  $70^{\circ}\text{C}$ , что негативно влияет на микроорганизмы, червей и гумусовые вещества.

Рассмотрим данные вопросы с эко-геохимических позиций. Поскольку аграрии, используя «чистые пары», **видят результат**: на полях черноземов действительно через год нет никаких диких видов растений (их некорректно именуют «сорняками»). Но объяснить данный феномен не в состоянии.

##### **А. Влияние пожаров на эволюцию и деградацию черноземов.**

Проведем в лаборатории простой модельный опыт с образцом чернозема выщелоченного (**гор. А<sub>1</sub>**), имитируя пожары и формирование на поверхности



Рис. 28. Модельный лабораторный опыт по изучению **воздействия ионов натрия** золы растений на *деградацию гумусовых веществ чернозема выщелоченного* и водную миграцию **гуматов и фульватов натрия** в слое песка (фото И.М. Яшина, 2012).

почвы небольшого слоя золы растений. Для этого возьмем пластмассовую **сорбционную колонку** (рис.28), последовательно заполненную сверху-вниз следующими слоями:

- древесная зола;
- кварцевый песок;
- чернозем выщелоченный;
- мощный слой чистого кварцевого песка.

После того как сорбционная колонка подготовлена, небольшими порциями приливают воду на поверхность золы (по 25-35 мл); ждут, пока она впитается и вновь приливают воду. Так приливают 300-400 мл. Зола растений состоит из оксидов Si, Fe, Al, Ca, Na, K. Указанные оксиды при взаимодействии с водой гидратируются и трансформируются в гидроксиды. Например, оксид натрия превращается в щелочь по схеме:  $\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH}$ . Величина pH такой суспензии составляет 13,5. Это сильнощелочная реакция. При наличии некоторого гидростатического давления наблюдается нисходящая миграция щелочного раствора в сорбционном лизиметре. Раствор щелочи достигает в колонке слоя чернозема, смачивает частицы почвы, затем происходит ионообменная реакция: *катионы кальция и магния довольно быстро замещаются ионами натрия*. Реализуется глубокий **щелочной гидролиз** гумусовых веществ: сложные структуры гумуса распадаются не мономеры натриевых солей - **гуматы и фульваты натрия** (они не осаждаются и находятся в форме гидрозолей в растворе). В таком виде данные соли свободно покидают верхний слой чернозема и пропитывают затем песок в сорбционном лизиметре, поступая в приемник вод (рис. 28). Не исключено, что мощные слои выщелоченных черноземов связаны с подобной водной миграцией гуматов и фульватов натрия после степных пожаров.



Рис. 29. **Природная хроматограмма продуктов деградации гумусовых веществ** в профиле чернозема выщелоченного на коренном берегу реки Большой Колышлей вблизи д. Марфино Аткарского района Саратовской области (фото И.М. Яшина, 2012).

В естественных условиях указанные выше процессы не завершаются в профиле черноземов выщелоченных, в частности, в долинах рек Среднего Поволжья. *Наблюдается дальнейшая биогеохимическая деградация миграционных форм гуматов и фульватов натрия с высвобождением ионов железа.* В последующем из ионов  $Fe^{3+}$  формируются коллоиды  $Fe(OH)_3$ , которые осаждаются на частицах песка, расцветивая его в желто-охристые и красноватые тона минералов гетита и гематита. При этом под горизонтов  $A_1$  формируется транзитный белесый элювиальный слой.

Ранее **Н.И. Усов (1947)**, затем и **И.С. Кауричев (1957)** предполагали, что в подобных профилях реализуется *кислотный гидролиз минералов* и происходит *оподзоливание черноземов* по наличию белесого горизонта под гумусово-аккумулятивным горизонтом. Профили выщелоченных черноземов с белесым горизонтом относили к подтипу оподзоленных (рис. 27) при изучении их морфологии. На самом деле было установлено, что подобный морфологический профиль чернозема является следствием более сложных процессов эволюции черноземов выщелоченных в черноземы солонцеватые, а затем и солонцы черноземные. Подобная эволюция сопровождается активной водной миграцией соединений железа, формированием в профиле иллювиально-железистого горизонта и «ожелезнением» поверхностных вод и ухудшением их качества. Одна морфология черноземов, таким образом, не смогла в полной мере объяснить рассматриваемый эко-геохимический феномен эволюции черноземов.

### Вопросы для самоконтроля.

1. К чему приводят масштабные пожары в зоне лесостепи России?
2. Что происходит с почвами после масштабных пожаров и как их теперь правильно называть?
3. Объясните экологическое значение золы растений после пожаров.
4. Какую функцию выполняют **ионы натрия золы** и как они попадают в почвенный раствор?
5. **Какое химическое соединение** образуется при взаимодействии оксида натрия золы с атмосферной влагой?
6. В какой форме могут мигрировать в черноземе гумусовые вещества?
7. Как в опыте проверить форму миграции гумусовых веществ?

**Пожары** являются мощным негативным фактором, вызывающим деградацию растительности, почв и почвенных животных. Пожары могут быть двойного действия: нативного (от удара молнии) и антропогенного – неосторожного или преднамеренного поджога (включая теракты), военные действия. При сгорании биополимеров растительности (лигнина, клетчатки и иных высокомолекулярных органических соединений), в условиях очень высокой температуры, кроме газов, частиц сажи образуются **диоксины**, которые относят к *суперэкоотоксикантам*. Поэтому в городах массовое

сгорание автомобильных покрышек, лаков и красок, обивки салонов легковых автомашин (акции протестов, например, во Франции и т.д.) приводит к масштабному выделению **таких новых видов ядов как диоксины**. Данные яды активно поглощаются людьми *при дыхании*, устроившими такие возгорания (или просто попавшими в зону горения), и накапливаются в их организмах. Через некоторое время эти люди будут поражены тяжелыми заболеваниями. К сожалению, подобную информацию знают только специалисты и военные, остальные люди подобных специальных знаний не имеют.

Наряду с пожарами в эволюции черноземов важная роль принадлежит засоленным породам, которые подстилают почвообразующие аналоги. Рассмотрим данный вопрос подробнее с генетической точки зрения.



Рис. 30. **Профиль солонца черноземного** на 1-й надпойменной террасе реки Большой Кольшлей: учхоз «Муммовское» в Саратовской области (фото И.М. Яшина, 2012).

### **В. Влияние засоленных пород на эволюцию черноземов (рис.30,31).**

В агроландшафтах *лесостепной и степной зон* с участками черноземов, отведенных под «чистые пары», наблюдается активное восходящее пленочно-капиллярное движение почвенных растворов и солей. Движущей силой вертикальной восходящей миграции солей является градиент температуры и влажности, возникающий между засоленной породой и поверхностью почвы - чернозема. Так формируется *солевой профиль* с максимумом солей в пахотном слое, а чернозем выщелоченный эволюционирует постепенно в солонец черноземный (рис. 29). Солевой профиль почвы – это весьма характерная генетическая особенность черноземов на разных этапах их эволюции. В 30-х годах прошлого столетия В.А. Ковда опубликовал две интересные монографии, *связанные с генетической оценкой солонцов и солончаков*. В них довольно полно





**А**

**В**

Рис.31. **А** - полный профиль **солонца автоморфного черноземного** среднесуглинистого на лессовидных карбонатных суглинках, подстилаемых зеленовато-желтыми **засоленными породами** – 1-я надпойменная терраса р. Б. Колышлей в Аткарском районе Саратовской области; **В** – **конечная стадия деградации чернозема выщелоченного в непочвенное образование** на древней надпойменной террасе реки Б. Колышлей; пока неясно, какие механизмы реакций и какие мигранты «очищают» кварцевый песок? (фото И.М. Яшина, 2011А; 2015В).

(для того времени) были охарактеризованы солевые профили и генезис почв степной и сухостепной зон РФ. Сформулированы источники солей в ландшафтах, их миграция и аккумуляция.

Засоленные подстилающие породы влияют на весь облик профиля чернозема. Данный природный процесс уже нельзя остановить. Его можно лишь уменьшить путем травосеяния (почвозащитные севообороты – занятые пары). Так или иначе, **эволюция черноземов** в почвы солонцового ряда однонаправленная и необратимая. Это приводит к снижению урожайности кормов и возделываемых культур на перспективу, а также ухудшению качества поверхностных вод. Здесь нужен экологический мониторинг.

Засоление верхних горизонтов черноземов из подстилающих засоленных пород – процесс стабильный и повторяющийся ежегодно. Прежде всего, он сказывается *на синузии степной растительности*. Отбираются солеустойчивые сухостепные и полупустынные виды – разные виды полыни, не характерные для лесостепи. Причем в биомассе таких растений накапливаются **до 23% легкорастворимых солей**. При пожарах эти соли возвращаются в почву – на поверхность черноземов, а процесс формирования щелочных растворов и деградации гумусовых веществ вновь повторяется (см. рис. 28,29).

**Задание:** охарактеризуйте негативное воздействие **легкорастворимых солей** при их восходящей водной миграции на гумусовые вещества и вторичные минералы чернозема выщелоченного.

**Вопросы для самоконтроля.**

- Какие соли преобладают при континентальном типе засоления почв?
- Какие соли преобладают при приморском типе засоления почв?
- В чем проявляется негативное воздействие солей на черноземы?
- В чем проявляется негативное воздействие солей на культурные растения?
- Охарактеризуйте с экологической и агрономической точек зрения **«чистые» пары** в степной и лесостепной зонах России.
- Охарактеризуйте **двойной негативный эффект** воздействия на черноземы золы растений после пожаров и аккумуляции солей из засоленных пород.
- Покажите на схеме эволюционный ряд черноземов лесостепной зоны.

**Контрольные задания для самостоятельной работы**

- Какие виды растений в зоне лесостепи аккумулируют больше всего солей?
- Перечислите солеустойчивые виды культурных растений.
- Назовите типичные растения в севооборотах лесостепи и степной зоне.
- Как взаимосвязаны эрозия и засоление черноземов в ландшафтах?
- Почему до сих пор используют «чистые» пары?
- Какую экологическую роль играют лесополосы в лесостепной зоне?
- Объясните процессы, протекающие при деградации черноземов выщелоченных (при пожарах) на террасах рек Среднего Поволжья (рис. 28).
- Какая взаимосвязь существует в морфологии почв между дерново-подзолами песчаными в ландшафтах тайги и деградированными черноземами на террасах рек Среднего Поволжья лесостепи?
- Назовите процессы деградации черноземов.
- Укажите движущие силы деградации черноземов.
- Объясните экологическое значение засоления черноземов.
- Объясните термины: стоимость «земли» и стоимость «почвы».



Рис. 32. Из растянутых миграционных зон **гидрогелей гидроксида железа** – см. **фото 31В** – со временем в жарком и сухом аридном климате формируются **прослойки плотных железосодержащих минералов – гетита и гематита** (фото И.М. Яшина, 2014).

## 7.5. Ландшафты и почвы Юрьев-Польского ополья Ярославской области: экологическое состояние и оценка

Почвенный покров Юрьев-Польского ополья Ярославской области был освоен несколько столетий тому назад. *Живописные ландшафты Переславского региона* издавна привлекают туристов, рыбаков и путешественников. Напомним, что Переславль-Залесский район – это родина Александра Невского. Здесь же, в частности, в агроландшафтах ОАО «Дружба» с 2005 г. проводится учебная практика у студентов факультета почвоведения, агрохимии и экологии по дисциплинам «Сельскохозяйственная экология» и «Экология и охрана почв». Преподаватели, аспиранты, магистры и научные работники кафедры экологии РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева проводят в ландшафтах научные исследования, например, по грантам РФФИ. Под руководством профессоров И.М. Яшина и И.И. Васенева осуществляются длительные стационарные наблюдения в лесных, луговых и полевых ландшафтах. Уместно отметить, что в мае 2015 года в ландшафтах учхоза была проведена полевая экскурсия для участников Международного конгресса по охране почв. А в июле 2015 года здесь же проходили полевые выездные занятия Международной летней экологической школы. В этой связи были подготовлены **путеводитель** и демонстрационные почвенные разрезы в двух эко-геохимических катенах с *показом закладки сорбционных лизиметров*. На полевых экскурсиях возникали вопросы, связанные, в частности, с генетической диагностикой почв. Дело в том, что некоторые специалисты выделяют в **агроэкосистемах Юрьев-Польского ополья** и в учхозе «Дружба» высоко бонитетные серые почвы (по стоимости более дорогие в сравнении с дерново-подзолистыми), но научного обоснования *этому феномену в подзоне южной тайги пока не дали*. Поэтому авторы считают уместным написать раздел учебного пособия, посвященный генетической и экологической оценке почв **агроэкосистем Юрьев-Польского ополья**.

На наш взгляд, выделение при картировании **типа серых почв** связано с использованием новой классификации почв России (2004), в которой заложен *субстантивный подход*: «что видим в профиле - это и есть почва». Причем *ландшафтно-генетические особенности региона* и процессы почвообразования учитываются неполно, идеи Докучаевской школы развиваются слабо. Напомним, Яшин И.М. в 1986 г. руководил картированием почв Рыбинского района Ярославской области в составе экспедиции МСХА имени К.А. Тимирязева: серых почв там не выявлено, хотя было обнаружено негативное влияние Рыбинского водохранилища на водный режим почв и их активное оглеение. Возникает вопрос: почему специалисты «обнаружили» новый *тип* почв (серые почвы) в тайге, характерный, например, для лесостепи Рязани на границе с черноземами? Это связано с изменением климата, новыми методами исследований или,

возможно, с экономическими причинами? Подчеркнем, от правильной генетической оценки типов почв зависит их стоимость, налогообложение от прибыли, аренда участков, а также устойчивость и направленность эволюции почвенного покрова. Ранее (2011) мы кратко уже освещали эту проблему. В настоящее время проблема *корректной диагностики почв* заслуживает более подробного изложения и обоснования на основе накопленного фактического материала.

**Стационарные площадки** в агроландшафтах учхоза были заложены в 5-ти катенах (2010-2014 гг.), включавших от 2 до 4 разрезов:

1-я - на эрозионном склоне увала (у пруда д. Михалево), разрезы 1-4;

2-я – у карьера, на сенокосе недалеко от д. Дубки, разрезы 1я-4я;

3-я – на плакоре, недалеко от д. Михалево, на сенокосе, разрезы 5,6;

4-я– в понижении (пашня), у поворота шоссе на д. Кабанское, разрез 6я;

5-я – на плакоре (сенокос у конторы), разрез 16я.

Полно профильные почвенные разрезы охватывали основные участки рельефа: плакоры, склоны и подошвы склонов (рис.33-35,37-39).



Рис.33. Вид на 1-ю «эрозионную катену» (впереди - справа), заложенную в полевом ландшафте на сенокосе, вблизи пруда д. Михалево; слева – у д. Алексино - поле «чистого пара», активизирующего водную эрозию в почвенном покрове (фото Яшина И.М., 2014).

**Использовали полевые методы** изучения почв и ландшафтов – маршрутные исследования, стационарный и метод сорбционных лизиметров, а также лабораторные физико-химические методы анализа почв и растений.

**Рассмотрим морфологические признаки** некоторых почв 3-й катены у д. Михалево, поскольку для р. 5 и 6 выполнен гранулометрический анализ.

**Разрез 5.** Заложен на плакоре увала, на скошенном сенокосе, в 420 м на С-В от д. Михалево и на С от шоссе в 80 м. Абсолютная отметка местности: 217 м над у.м. На поверхности почвы много микро западин и ложбинок стока. Растительность окультуренного сенокоса представлена тимофеевкой луговой, ежой сборной, овсяницей луговой, костром безостым и клевером луговым. Верхние горизонты почвы (полоса вблизи шоссе) *антропогенно эродированы* за счет отсыпки грунта для полотна дороги при



ее строительстве, поэтому карбонаты кальция залегают в профиле нетипично близко к поверхности. По морфологии **это не серая почва**.

|                |           |  |
|----------------|-----------|--|
| A <sub>д</sub> | 0-2 (2)   | Слабо развитая дернина из живых корней: локально куртинки растений, много детрита и растительных остатков.   |
| A <sub>1</sub> | 2-20(18)  | Свежий, серый, легкосуглинистый, комковато-пылеватый, средне уплотненный, корни растений, переход резкий.  |
| B <sub>1</sub> | 20-53(33) | Свежий, палевый с почти черными длинными затеками ВОВ ( <i>признаки водной миграции веществ</i> ), среднесуглинистый, очень плотный, ореховато-призматический, по граням педов темно-серые и буроватые примазки, переход резкий по вскипанию от 10% HCL. |



Рис.34. Профиль **разреза 6 (А)** дерново-сильноподзолистой легкосуглинистой грунтово-глееватой почвы в западинке на склоне увала; гумусовый горизонт здесь очень мощный, с плотной «плужной подошвой» почти черного цвета; **В** – профиль **разреза 5** дерново-слабоподзолистой остаточно-карбонатной легкосуглинистой почвы у д. Михалево, плакор, на сенокосе – рядом с профилированной автодорогой (фото Яшина И.М., 2014).

|                   |             |  |
|-------------------|-------------|--|
| B <sub>2Ca</sub>  | 53-79(26)   | Влажный, светло-палевый, среднесуглинистый, комковато-призматический, очень плотный, мелкая дресва и округлый щебень CaCO <sub>3</sub> , от 10% HCL сильно вскипает дресва и мелкозем при его подсыхании, локально темно-серые затеки. |
| B <sub>3Ca</sub>  | 79-115(36)  | Сырой, светло палевый, тяжелосуглинистый, комковатый, средне уплотненный, много дресвы CaCO <sub>3</sub> , от 10% HCL бурно вскипает дресва и мелкозем <u>уже без его подсыхания</u> , переход постепенный по влажности.               |
| BC <sub>Caг</sub> | 115-141(26) | Мокрый (при стоянии в разрезе появляется вода), буровато-палевый, тяжелосуглинистый, липкий, комковатый, <u>ожелезнение выявляется</u> при подсыхании мелкозема в форме диффузионно размывших пятен и примазок <b>Fe-Mn на педях</b> . |



От 10% -го раствора HCL почва не вскипает по всему профилю.

**Почва:** дерново-слабоподзолистая остаточно-карбонатная грунтово-глееватая легкосуглинистая на лессовидных (покровных) карбонатных суглинках.

### Разрез № 6.

От р.5 на С, прямо к лесу, в 85 м. Нижняя 1/3 очень пологого склона увала северной экспозиции. Абсолютная отметка местности 215 м над у.м. Сенокос окультуренный (скошен). Растительность: тимофеевка луговая, ежа сборная, овсяница луговая, костер безостый, клевер луговой. Состояние поверхности почвы: ярко выражен микрорельеф в виде потяжин и ложбинок стока, сглаженные бугорки; дернина верхних горизонтов почв (по ложбинам) локально заочкачена.

#### Морфологическое описание профиля разреза № 6.

|                   |            |  |
|-------------------|------------|--|
| A <sub>d</sub>    | 0-1 (1)    | Дернина из живых корней: плотная, локально куртинки растений, много детрита и растительных остатков, рядом кротовины, переход резкий, заметны мелкие угольки.  |
| A <sub>1</sub>    | 1-26(25)   | Свежий, серый, легкосуглинистый, комковато-пылеватый, плотный, корни растений, много ходов червей и копролитов на глубине 8-12 см, мелкозем локально перемешан грызунами (кротовины на поверхности почвы), переход резкий по цвету.  |
| EL <sub>g</sub>   | 26-41(15)  | Свежий, интенсивно белесый в сухом состоянии, <b>супесчаный</b> , слабо уплотненный, пластинчатый, по граням педов темно-серые и буроватые примазки, много <b>Fe-Mn</b> мелких конкреций, диффузионно размытых примазок, но они локальные (поэтому мазок в полевом дневнике палево-белесоватый), переход языковатый. |
| EL/B <sub>g</sub> | 41-61(20)  | Влажный, белесо-палевый, среднесуглинистый, мелко глыбистый с плитчатыми педами, очень плотный, дресва мелкая и щебень, но от 10% HCL не вскипает, локально по граням структурных отдельностей четкие темно-серые и бурые затеки и примазки, переход постепенный.  |
| B <sub>1g</sub>   | 61-95(34)  | Сырой, палевый, тяжелосуглинистый, мелко глыбистый, очень плотный и вязкий, от 10% HCL не вскипает, по граням педов буро-серые примазки, много мелких Fe-Mn конкреций ( <i>оглеение по всему горизонту ярко выражено, возможно, раньше это был глеевый горизонт</i> ), переход постепенный по влажности.             |
| BC <sub>g</sub>   | 95-141(46) | Мокрый ( <i>с 141 см сочится вода</i> ), буровато-палевый с четким сизоватым оттенком, тяжелосуглинистый, липкий, комковато-мелкоглыбистый, <b>ожелезнение</b> выявляется при подсыхании мелкозема в форме диффузионно размытых пятен и примазок на педах. От 10% HCL не вскипает.                                   |

**Почва:** дерново-сильноподзолистая профильно глееватая легкосуглинистая на покровных бескарбонатных лессовидных суглинках.

Анализируя морфологию почвы **разреза 6**, отметим, если бы в аграрных и других ландшафтах учхоза «Дружба» были распространены **серые** почвы с очень мощным гумусовым горизонтом на карбонатно-кальциевой почвообразующей породе, то подобного *яркого подзолообразования* в почве не наблюдалось, а в понижениях рельефа формировались бы те же **серые, но оглеенные почвы, трансформируемые затем в дерново-глеевые аналоги; процесс подзолообразования в серых почвах**, например Тульской области,

резко затормаживается вследствие карбонатно-кальциевого барьера миграции и усреднения органических кислот катионами кальция.

Табл. 5 Химические свойства почв катен учхоза «Дружба» Ярославской области  
(отбор проб почвы в июле 2014 г.)

| Горизонт и глубина отбора образцов, см   | рН <sub>KCl</sub> | Орган. в-во, по Тюрину, % | мг-экв на 100 г почвы |                  |                  | Подвижные формы                             |                |
|--|-------------------|---------------------------|-----------------------|------------------|------------------|---|----------------|
|  |                   |                           | Нг                    | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> | K <sup>+</sup> |
| <b>1-й Стационарный склоновый участок</b> у пруда, недалеко от д. Михалево: <b>разрезы 1-4.</b>  |                   |                           |                       |                  |                  |   |                |
| <b>Р. 1. Подошва склона</b> увала на сенокосе (рядом с базисом эрозии). Дерново-слабоподзолистая <b>намытая</b> среднесуглинистая на бескарбонатных покровных суглинках.     |                   |                           |                       |                  |                  |   |                |
| <b>A<sub>пах</sub> 0-22</b>  | <b>5,1</b>        | <b>1,8</b>                | 2,3                   | 12,6             | 4,4              | <b>238</b>                                  | <b>122</b>     |
| A <sub>1</sub> 22-28   | 5,4               | 1,7                       | 2,0                   | 10,2             | 3,0              | 140   | 105            |
| <b>A<sub>1</sub> 22-31 (2-я повт.)</b>   | <b>5,3</b>        | <b>2,5</b>                | 2,3                   | 12,7             | 3,1              | 195   | 140            |
| <b>EL/B 38-48</b>  | 5,0               | 0,8                       | 2,2                   | 14,5             | 5,4              | 62  | 149            |
| B <sub>1</sub> 59-69   | 5,3               | <b>1,2</b>                | <b>1,8</b>            | 13,6             | 5,2              | <b>225</b>                                  | <b>212</b>     |
| <b>A<sub>1</sub><sup>пор</sup> 69-75</b>   | 5,3               | 1,0                       | <b>1,8</b>            | 14,0             | 5,5              | <b>179</b>                                  | <b>213</b>     |
| <b>A<sub>1</sub><sup>пор</sup> 69-75 (2-я повт.)</b>   | 5,3               | 1,0                       | 1,8                   | 14,4             | 5,6              | 165   | 197            |
| B <sub>2</sub> 80-90   | 5,7               | 0,7                       | 1,2                   | 14,1             | 5,4              | <b>286</b>                                  | <b>235</b>     |
| <b>BC 90-100</b>   | <b>6,7</b>        | 0,6                       | 0,5                   | 16,3             | 5,5              | 206   | 205            |
| <b>Р.2. У лесополосы (западина на склоне).</b> Дерново-слабоподзолистая среднесуглинистая грунтово-глееватая на бескарбонатных покровных суглинках.                          |                   |                           |                       |                  |                  |   |                |
| <b>A<sub>1</sub> 10-20</b>   | <b>5,4</b>        | 1,9                       | 2,3                   | 10,7             | 2,4              | 128   | 149            |
| <b>EL/B 40-50</b>  | 4,8               | 0,8                       | 2,7                   | 13,9             | 4,8              | <b>62</b>                                   | 130            |
| B <sub>1</sub> 75-85   | <b>4,0</b>        | 0,9                       | 4,2                   | 13,1             | 5,8              | <b>52</b>                                   | 113            |
| <b>BC 90-100</b>   | <b>4,1</b>        | 0,8                       | 3,8                   | 13,8             | 6,4              | 110   | 119            |
| <b>Р.3. Сенокос. Склон увала</b> В экспозиции. Дерново-сильноподзолистая грунтово-глееватая легкосуглинистая на бескарбонатных покровных суглинках.                          |                   |                           |                       |                  |                  |   |                |
| <b>A<sub>пах</sub> 0-22</b>  | <b>4,8</b>        | 2,7                       | 3,7                   | 9,7              | 2,1              | 113   | 77             |
| A <sub>1</sub> 23-32   | 5,0               | 1,8                       | 2,5                   | 8,9              | 1,8              | 110   | 68             |
| <b>EL 31-40</b>  | 4,9               | 1,3                       | 2,1                   | 9,0              | 2,2              | 143   | 104            |
| <b>EL/B 50-60</b>  | 4,7               | 0,7                       | 2,5                   | 14,0             | 4,7              | 100   | 103            |
| B <sub>1</sub> 70-80   | <b>5,1</b>        | 0,8                       | 2,2                   | 16,3             | 5,9              | 83  | 105            |
| <b>Р. 4. Плакорный участок</b> на склоне. Дерново-слабоподзолистая <b>среднесмытая</b> среднесуглинистая на бескарбонатных покровных суглинках.                              |                   |                           |                       |                  |                  |   |                |
| <b>A<sub>пах</sub> 0-22</b>  | <b>5,3</b>        | 1,6                       | 2,2                   | 10,4             | 2,4              | <b>251</b>                                  | <b>525</b>     |
| B <sub>1</sub> 24-34   | 4,7               | 0,8                       | 2,6                   | 9,5              | 2,3              | <b>238</b>                                  | <b>1164</b>    |
| B <sub>2</sub> 43-53   | 4,1               | 0,7                       | 3,6                   | 10,6             | 2,9              | 292   | <b>783</b>     |
| BC 71-81   | <b>4,8</b>        | 0,6                       | 1,9                   | 14,0             | 4,7              | 304   | 138            |
| <b>2-й стационарный участок</b> на сенокосе недалеко от шоссе и небольшого пруда. <b>Р. 5-7.</b>   |                   |                           |                       |                  |                  |   |                |
| <b>Р.5. Плакор увала,</b> сенокос рядом с шоссе у д. Михалево. Дерново-слабоподзолистая остаточного-карбонатная легкосуглинистая на бескарбонатных покровных суглинках.      |                   |                           |                       |                  |                  |   |                |
| <b>A<sub>1</sub> 2-12</b>  | <b>4,5</b>        | 2,4                       | 4,4                   | 11,0             | 3,7              | <b>50</b>                                   | 113            |
| B <sub>1</sub> 23-33   | <b>4,3</b>        | 0,8                       | 3,6                   | 13,9             | 5,3              | 119   | 121            |
| <b>B<sub>2</sub>ca 43-53</b>   | 6,4               | 0,6                       | 0,8                   | 15,5             | 4,9              | 141   | 58             |
| <b>B<sub>3</sub>ca 88-98</b>   | <b>6,7</b>        | 0,5                       | 0,4                   | 16,6             | 5,3              | <b>63</b>                                   | <b>50</b>      |
| <b>BCca 125-135</b>  | <b>6,9</b>        | 0,9                       | 0,4                   | 17,6             | 5,5              | <b>62</b>                                   | <b>50</b>      |
| <b>Р. 6. Западина</b> на сенокосе недалеко от д. Михалево (малый пруд). Дерново-сильноподзолистая грунтово-глееватая легкосуглинистая на бескарбонатных покровных суглинках. |                   |                           |                       |                  |                  |   |                |
| A <sub>1</sub> 9-19  | <b>4,6</b>        | 2,8                       | 5,5                   | 7,9              | 1,4              | <b>52</b>                                   | <b>41</b>      |
| EL 28-38   | <b>4,5</b>        | 2,7                       | 4,2                   | 5,9              | 1,0              | <b>132</b>                                  | 25             |
| EL/B 46-56   | 4,0               | 1,1                       | 4,5                   | 8,8              | 3,4              | 118   | 56             |
| B <sub>1g</sub> 80-90  | 5,2               | 2,1                       | 3,3                   | 14,9             | 6,0              | 66  | 99             |



Рис.35. Профессор из США Дик Арнольд в 2010 году посетил вместе с заведующим кафедрой экологии РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева Васеневым И.И. учебную практику в учхозе «Дружба»; на снимке Дик Арнольд интересуется методом сорбционных лизиметров и сорбентами - в руках у американского профессора промышленный образец порошка оксида алюминия для хроматографии компонентов ВОВ (фото Яшина И.М., 2010).

В лесных ландшафтах южной тайги, по понижениям, распространены болотно-подзолистые почвы с очень мощными подзолистым и глеевым горизонтами. При сведении леса подзолистый горизонт нередко остается, что и наблюдается в почвах учхоза. Мощный гумусовый горизонт создается здесь в результате окультуривания подзолистых и дерново-подзолистых почв за счет известкования, травосеяния, внесения удобрений - не как в лесостепной зоне – под лесами. Это ключевой факт. Поэтому в классификации почв деятельность агрономических служб агрохолдингов, фермерских и иных хозяйств должна находить отражение в виде уровней окультуривания почв: слабо-, средне- и высококультуренные почвы. Если же почву назвать, например, «агрозем», то утрачивается роль специалистов, занятых не только возделыванием культур, их хранением и переработкой, но и повышением (поддержанием) уровня плодородия почв, созданием экологически безопасного земледелия. Что касается термина «серые почвы», то он был предложен еще В.В. Докучаевым<sup>5</sup>, а его ученик Н.М. Сибирцев добавил слово «лесные», что не совсем правильно: на пашне ведь нет леса. Серые почвы формируются под широколиственными лесами в лесостепной зоне и нередко в Заокских ландшафтах Подмосковья на карбонатно-кальциевых породах. При раскорчевке лесной растительности мощный гумусовый горизонт серых почв не деградирует, он остается и под пашней. Этот факт обязательно нужно знать и учитывать при диагностике. Однако и здесь не все так просто и понятно. Неясно, например, почему в таежных лесах биогенный круговорот сопряжен с ярко выраженным

<sup>5</sup> В.В. Докучаев помог своему ученику Н.М. Сибирцеву (уроженцу Архангельска) в разработке первого учебника по почвоведению, однако в соавторы своего учителя Н.М. Сибирцев не пригласил. В.В. Докучаев организовал также **первую в Российской империи** кафедру почвоведения; в настоящее время на этом месте находится известный сельскохозяйственный институт в польском городе Пулавы.

*подзолообразованием*: этому биогеохимическому потоку Фокин А.Д. (1975, 1986) отводит решающую роль в оподзоливании почв, а водная миграция имеет подчиненное значение. В широколиственных лесах также имеется мощный биогенный поток химических элементов, *вовлекаемых в биомассу*, но яркого подзолообразования почв не наблюдается. *В чем причина такого феномена пока неясно*, а ведь это один из ключевых вопросов почвоведения.

Перейдем к рассмотрению химических свойств почв учхоза «Дружба» на примере 1-й «эрозийной катены». Дерново-слабоподзолистая намытая почва, приуроченная к подошве склона, отличается слабокислой реакцией среды по всему профилю (рН варьирует в пределах 5,1–5,3 и лишь на глубине 80-100 см увеличивается до 5,7-6,7), органическое вещество характеризуется *заметной подвижностью в осенне-весенний период*: на это указывает невысокое содержание общего гумуса и его почти равномерное распределение по почвенному профилю, а корни проникают неглубоко.



Рис. 36. Модельный опыт в учхозе «Дружба» Ярославской области по фракционированию гумусовых веществ гор. Апах дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы с помощью водного раствора щавелевой кислоты и воды. Затем изучали биотестирование выделенных групп органических веществ на растениях люпина (фото И.М. Яшина, 2010).

В модельном лабораторном опыте (рис. 36), проведенном под руководством профессора И.М. Яшина в 2010 году, из образца почвы, взятого из гор. Апах, водой выщелачивалось за сутки 15-18%  $C_{орг}$  от общего содержания органического углерода. Водный раствор 0,1н. щавелевой кислоты был заметно активнее – десорбция составила 23-25%  $C_{орг}$  от общего углерода в почвенном образце (с математической точки зрения эта разница недостоверная). Причем, вытесненные из почвы оксалат-ионами компоненты ВОВ проявили стимулирующее действие на растения люпина в модельном опыте. Вот это важно. При наличии ионов  $Ca^{2+}$  гумус мало подвижен. Рассмотрим химические свойства дерново-подзолистых почв.



Гидролитическая кислотность по изученным профилям, как правило, невысокая (исключение составляют р.5 и 6, где она достигает 4,4-5,5 мг-экв. на 100 г. почвы). Кислотность благоприятствует мобильности органического вещества дерново-подзолистых почв. Содержание доступных форм фосфорной кислоты в дерново-подзолистых почвах тесно связано с кислотностью почв: аналоги со слабокислой реакцией (р.1) характеризуются повышенным содержанием мобильных фосфатов.

При оглеении и усилении кислотности до рН менее 5,0 наблюдается дефицит в почвах анионов фосфорной кислоты вследствие формирования труднорастворимых осадков  $AlPO_4$ ,  $FePO_4$ . При близком залегании к поверхности почв  $CaCO_3$  (р.5) содержание доступных форм фосфатов также заметно уменьшается из-за образования труднорастворимых форм  $Ca_3(PO_4)_2$ . В этих условиях катионы кальция являются конкурентами ионам калия при их поступлении в растения. На одном из участков отмечено очень высокое содержание обменно поглощенного калия (р. 4), что, по-видимому, связано с неравномерным внесением калийных удобрений (это артефакт). *Особого внимания заслуживает оценка кислотности в разрезе 5.* Здесь, при близком залегании к поверхности почвы  $CaCO_3$  (от 10% HCL бурно вскипают как дресва и окатанный щебень, так и почвенный мелкозем, что **очень важно**), а



**А**

**В**

Рис.37. **А** - студент-эколог РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева **Кашаев Артур** устанавливает сорбционные лизиметры в профиле дерново-слабоподзолистой легкосуглинистой почвы во время учебной практики по экологии в учхозе «Дружба» (разрез 2 на 1-й «эрозионной катене» у балки нами рассматривается в качестве фонового); **В** – почвенный разрез, заложенный в микро западинке на склоне того же поля (в 85 метрах) диагностируется как дерново-сильноподзолистая среднесуглинистая почва на покровных суглинках (фото Яшина И.М., 15.07.2014).



верхние генетические горизонты данной почвы имеют сильноокислую реакцию среды (**pH 4,5-4,3**). Почему же нижние горизонты, насыщенные ионами кальция, не оказывают положительное влияние и не компенсируют в почвенно-поглощающем комплексе гор.  $A_1$  и  $B_1$  высокое содержание ионов водорода и алюминия? Это связано с одной из главных почвенно-экологических особенностей ландшафтов южной тайги – активной внутри профильной миграцией водорастворимых органических веществ (ВОВ) с кислотными и комплексообразующими свойствами. В условиях низкого содержания в почвах таежных экосистем гумуса и элементов питания биота сформировала эффективный биогенный механизм адаптации к весьма суровым условиям существования. Такой механизм нами назван как «биогенная кислотность» (И.М. Яшин, И.С. Кауричев, В.А. Черников, 1986). Поэтому векторы миграции ионов кальция вверх из гор.  $B_{2Ca}$  за счет гидротермического градиента и вертикально вниз ионов водорода (в форме органических кислот из дернины и гумусового горизонта при промывном водном режиме) оказываются по масштабу **неравнозначными**: заметно

Табл. 6 Химические свойства почв учхоза «Дружба» Ярославской области (отбор проб почвы в июле 2010 г.)

| № разреза  | Горизонт и его мощность, см              | Образец (см) | pH <sub>ккл</sub> | Н <sub>г</sub> | Сумма обменных оснований |                  | Подвижные формы, мг/кг                      |                |
|--|--|--------------|-------------------|----------------|--------------------------|------------------|---|----------------|
|  |  |              |                   |                | Ca <sup>2+</sup>         | Mg <sup>2+</sup> | H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> | K <sup>+</sup> |
|  |  |              |                   |                | мг-экв. на 100 г.        |                  |   |                |
| Агроландшафт сенокосный (у карьера – подошва склона <i>микро повышение</i> ); почва: освоенная дерново-слабоподзолистая легкосуглинистая на покровных суглинках                      |  |              |                   |                |                          |                  |   |                |
| 1-я  | <b>A<sub>p</sub> 0-30</b>                | 10-20        | 5,2±0,3           | 2,6±0,7        | 12,7±0,4                 | 2,7±0,1          | 35±7,3                                      | 118±12,1       |
| Агроландшафт сенокосный (у карьера – подошва склона, <i>микрoзападина</i> ); почва: окультуренная дерновая грунтово-глееватая намытая легкосуглинистая на покровных суглинках        |  |              |                   |                |                          |                  |   |                |
| 4-я (1-повт.)  | <b>A<sub>1</sub> 3-34</b>                | 10-20        | 5,4±0,2           | 2,4±0,9        | 10,5±2,1                 | 2,0±0,8          | 193±12,7                                    | 326±7,7        |
|  | <b>A<sub>1</sub></b>                     | 20-30        | 5,4±0,3           | 2,3±0,4        | 11,0±2,2                 | 2,2±0,5          | 133±8,3                                     | 166±4,9        |
|  | <b>A<sub>1</sub></b>                     | 30-40        | 5,1±0,2           | 2,9±0,6        | 10,9±1,8                 | 2,2±0,3          | 78±5,4                                      | 98±3,3         |
|  | <b>A<sub>1</sub><sup>пов</sup> 34-63</b> | 50-60        | 5,1±0,4           | 2,5±0,3        | 13,0±2,4                 | 2,4±0,7          | 80±4,2                                      | 48±1,8         |
|  | <b>B<sub>g</sub> 63-81</b>               | <b>70-80</b> | 4,8±0,1           | 4,1±1,1        | 13,1±1,7                 | 4,3±1,1          | 147±5,9                                     | 151±8,3        |
| Агроландшафт сенокосный (у карьера – подошва склона, <i>микрoзападина</i> ); почва: окультуренная дерновая грунтово-глееватая легкосуглинистая на покровных бескарбонатных суглинках |  |              |                   |                |                          |                  |   |                |
| 4-я (2повт)  | <b>A<sub>1</sub> 3-34</b>                | 3-13         | 5,3±0,3           | 4,6±0,9        | 20,9±4,4                 | 5,8±0,5          | 61±2,8                                      | 134±5,1        |
|  | <b>A<sub>1</sub></b>                     | 13-23        | 6,0±0,4           | 1,7±0,4        | 10,4±1,3                 | 2,0±0,2          | 173±9,5                                     | 139±4,4        |
| Агроландшафт полевой (посев ячменя у д. Марфино) – <i>блюдецобразная западина</i> ; почва: освоенная дерновая грунтово-глееватая легкосуглинистая на покровных суглинках             |  |              |                   |                |                          |                  |   |                |
| 6-я  | <b>A<sub>p</sub> 0-26</b>                | 10-20        | 6,0±0,2           | 2,0±0,2        | 15,1±1,7                 | 3,8±0,9          | 359±3,1                                     | 250±8,9        |
|  | <b>G 37-59</b>                           | 44-54        | 4,8±0,4           | 2,4±0,2        | 17,3±2,2                 | 5,1±0,4          | 30±1,2                                      | 100±3,1        |
| Агроландшафт сенокосный (у конторы учхоза) – плакор увала; почва: окультуренная дерново-слабоподзолистая легкосуглинистая на покровных бескарбонатных суглинках                      |  |              |                   |                |                          |                  |   |                |
| 16-я   | <b>A<sub>1</sub> 4-37</b>                | 4-14         | 6,0±0,3           | 1,9±0,1        | 14,2±1,4                 | 3,8±0,3          | 489±7,2                                     | 197±7,9        |
|  | <b>A<sub>1</sub></b>                     | 20-30        | 6,0±0,3           | 1,8±0,2        | 12,1±0,9                 | 3,3±0,2          | 366±2,9                                     | 171±4,1        |
|  | <b>B<sub>1</sub> 37-62</b>               | 43-53        | 4,8±0,4           | 2,9±0,3        | 13,1±0,7                 | 4,2±0,1          | 24±0,5                                      | 115±3,9        |

преобладает миграция компонентов ВОВ и органоминеральных комплексных соединений вглубь почвы. Это еще одно прямое доказательство, что в условиях южной тайги Ярославской области – даже на карбонатно-кальциевых породах - **формируются не серые почвы**, а остаточные карбонатные дерново-подзолистые почвы с кислой реакцией веществ гор. А<sub>1</sub>.

Подкисление отмечено нами **и в черноземах**, в пределах плужной подошвы гор. А<sub>1</sub>, на фоне общего подщелачивания (осолонцевания) профиля. *Этот факт требует дальнейшего изучения и обоснования.*

*При освоении таежных (лесных) почв под пашню биогенное кислотообразование, которое было давно задано таежной древесной растительностью и плесневыми грибами-кислотообразователями (как важнейший фактор функционирования и адаптации таежной биоты), не исчезает, а принимает иные формы.* Ведущую роль в кислотообразовании в почвах агроэкосистем играют плесневые грибы и в меньшей мере бактерии. В почвах агроландшафтов *оглеение становится ведущим процессом* наряду с кислотным гидролизом минералов и выщелачиванием веществ. Под сенокосами (поле у карьера) дерново-подзолистые почвы в 2010 году отличались низкой степенью окультуренности. Имели слабокислую реакцию, низкое содержание гумуса (1,5 – 2,3%). Содержание доступных форм фосфора и калия было весьма неравномерное по профилям почв и в пространстве. В учхозе удобрения долгое время не использовали (склад удобрений разрушен), почвенно-агрохимические материалы и карты также не применяли, увлекались лишь травосеянием. Напомним, что уровень плодородия почв сельскохозяйственных угодий зависит от рационального внесения удобрений и известкования почв в условиях тайги (табл.6).



Рис. 38. Профиль дерново-слабоподзолистой легкосуглинистой почвы на покровных бескарбонатных суглинках (разрез **16я**, см. табл. 2); плакор увала, у конторы; несмотря на мощный (вновь созданный) гумусово-аккумулятивный горизонт, на боковой стенке разреза (справа) заметно, что *подзолистый процесс не исчезает, а углубляется в иллювиальный гор. В*, причем иссушение данного горизонта **в знойное лето 2010 г.** позволило четче диагностировать эту генетическую особенность: во влажное лето *ВОВ маскируют подзолистые «языки»* (фото Яшина И.М., 2010).

Установлено, что дерновые почвы мезо понижений и блюдцеобразных западин учхоза являются наиболее плодородными. Их и принимают ошибочно за серые почвы, если руководствоваться только морфологией почв, не учитывая ландшафтно-генетические особенности. *Лимитирующим фактором* в дерновых почвах является близкое залегание грунтовых вод, оглеение нижних слоев профиля, масштабная мобилизация в раствор ВОВ с кислотными свойствами, избыток закисных форм Fe, Mn, способствующих осаждению фосфатов.

Гумусовые горизонты дерновых почв (р.6я) имеют низкую кислотность, хорошо обеспечены доступными формами фосфатов (360 мг/кг) и обменно поглощенного калия (250мг/кг). *Глеевые горизонты* отличаются среднекислой реакцией (рН = 4,8) и очень низким содержанием доступных фосфатов (30мг/кг) из-за их осаждения на минералах в форме труднорастворимых фосфатов алюминия и железа. *Окультуренные дерново-подзолистые почвы* встречаются в учхозе небольшими контурами и чаще вблизи населенные пункты – Дубки, Михалево и Алексино. Например, почва

Табл. 7. Гранулометрический состав дерново-подзолистых почв учхоза «Дружба» (отбор проб почвы проведен в июле 2014)

| Горизонт,<br>глубина отбора<br>образцов, см  | Размер частиц мелкозема (мм) и их содержание в % (метод пипетки, по Н.А. Качинскому) |               |               |                |                 |        |                 |                 |
|--|--|---------------|---------------|----------------|-----------------|--------|-----------------|-----------------|
|  | 1,0-<br>0,25   | 0,25-<br>0,05 | 0,05-<br>0,01 | 0,01-<br>0,005 | 0,005-<br>0,001 | <0,001 | <b>&lt;0,01</b> | <b>&gt;0,01</b> |
| <b>Р. 1. Подошва склона увала на сенокосе (рядом с прудом). Дерново-слабоподзолистая намытая среднесуглинистая на бескарбонатных покровных суглинках.</b>                    |  |               |               |                |                 |        |                 |                 |
| <b>А<sub>пах</sub> 0-22</b>  | 0,6  | 23,4          | 39,9          | 10,7           | 11,0            | 14,4   | <b>36,2</b>     | 63,8            |
| A <sub>1</sub> 22-28   | 0,7  | 13,3          | 53,1          | 11,0           | 10,2            | 11,6   | <b>32,8</b>     | 67,2            |
| A <sub>1</sub> 22-31 (2-я повт.)   | 0,6  | 29,0          | 38,1          | 9,7            | 11,2            | 11,3   | <b>32,3</b>     | 67,7            |
| <b>EL/B 38-48</b>  | 0,2  | 8,5           | 43,1          | 7,7            | 9,2             | 31,4   | <b>43,8</b>     | 51,7            |
| <b>B<sub>1</sub> 59-69</b>   | 0,4  | 11,3          | 40,3          | 9,3            | 10,1            | 28,7   | <b>48,1</b>     | 51,9            |
| A <sub>1</sub> <sup>пог</sup> 69-75  | 0,3  | 8,0           | 44,5          | 7,7            | 12,0            | 27,6   | <b>47,3</b>     | 52,7            |
| A <sub>1</sub> <sup>пог</sup> 69-75 (2-я повт.)  | 0,2  | 9,5           | 42,3          | 9,8            | 7,2             | 31,0   | <b>48,0</b>     | 52,0            |
| <b>B<sub>2</sub> 80-90</b>   | 0,2  | 7,8           | 46,8          | 8,7            | 10,9            | 25,6   | <b>45,3</b>     | 54,7            |
| <b>BC 90-100</b>   | 0,4  | 11,9          | 42,0          | 8,1            | 14,9            | 22,8   | <b>45,8</b>     | 54,2            |
| <b>Р. 6. Западина на сенокосе недалеко от д. Михалево (малый пруд). Дерново-сильноподзолистая грунтово-глееватая легкосуглинистая на бескарбонатных покровных суглинках.</b> |  |               |               |                |                 |        |                 |                 |
| A <sub>1</sub> 9-19  | 2,2  | 13,6          | 57,6          | 12,0           | 8,7             | 6,0    | <b>26,7</b>     | 73,3            |
| <b>EL 28-38</b>  | 3,0  | 27,9          | 50,3          | 9,8            | 3,9             | 5,1    | <b>18,8</b>     | 81,2            |
| <b>EL/B 46-56</b>  | 0,6  | 18,0          | 35,4          | 15,9           | 8,1             | 22,1   | <b>46,0</b>     | 54,0            |
| <b>B<sub>1g</sub> 80-90</b>  | 0,9  | 12,7          | 39,7          | 8,9            | 9,7             | 28,0   | <b>46,7</b>     | 53,3            |

разреза 16я. Такие почвы имеют благоприятные агроэкологические свойства, низкую кислотность и высокое содержание доступных форм элементов питания в верхних горизонтах. Один из контуров этих почв на карте расположен недалеко от конторы, у автобусной остановки. Однако окультуривание почвы (внесение извести, удобрений в предыдущие 50-60 лет) *затрагивает только верхние горизонты почв*, с глубиной химические свойства сравнительно слабо изменяются в сравнении с почвами лесных

экосистем: резко увеличивается кислотность и существенно уменьшается содержание доступных форм фосфатов в нижних иллювиальных слоях В<sub>1</sub>. Обратимся к результатам гранулометрического состава изучаемых почв по двум разрезам почв – 1 и 6 (табл.7).

Эти сведения актуальны, поскольку, во-первых, позволяют уточнить сложение профилей почв (*однородное или двучленное*), во-вторых, углубить представления о структуре и физических свойствах почв. Известно, например, что почвы с двучленным сложением на территории Европейского Севера имеют в пределах первого метра резкое изменение гранулометрического состава: *супеси и легкие суглинки в профиле сменяются средними и тяжелыми суглинками* (через градацию).

Сложение одной из почв (*разрез 6*) подчиняется данной закономерности. При этом горизонты А<sub>1</sub> двучленных профилей агроландшафтов учхоза включают припаханные горизонты А<sub>1</sub>, Е<sub>g</sub>, В<sub>f</sub> микро подзола, который был техногенно деградирован. Двучлены интересны в том отношении, что они являются прекрасными водоупорами и широко распространены в ландшафтах РФ. Там, где залегают почвы на двучленных породах, всегда присутствует *переувлажнение и оглеение почвенных профилей*. В этих почвах активизируются процессы денитрификации, водной миграции ВОВ, появляются закисные формы железа и марганца, ухудшаются физические свойства, отмечается высокое содержание обменного алюминия, токсичного для растений, а из газов – СН<sub>4</sub> и Н<sub>2</sub>S.

**Двучленность почв в агроландшафтах учхоза** обычно нарушена из-за *природной и антропогенной эрозии*, а к дневной поверхности подходит плотный иллювиальный горизонт В. Постепенно такие почвы утрачивают уровень плодородия и производительную способность, при этом гранулометрический состав становится тяжелосуглинистым. Активизируют водную эрозию почв в учхозе также и «чистые пары» на склонах (рис. 33), а дополняет ее обработка почв (боронование, культивация, фрезерование, зяблевая вспашка) *при избыточной влажности* пахотного слоя. Происходит налипание частиц почвы на лемеха, лапы культиваторов и стаскивание мелкозема к краю поля: так уменьшается мощность пахотного слоя и его гумусированность. Высказанные соображения подтверждаются сведениями о распределении фракций «физической глины» (частицы почвы менее 0,01мм) в профиле **p.1** (табл.7). В верхних горизонтах данной почвы состав мелкозема среднесуглинистый, а с глубины 34 см – тяжелосуглинистый (водоупор). Данная почва - намытая (погребенный горизонт залегают глубже 50 см в профиле) и по контуру на карте сопряжена с вышележащей по склону *смытой дерново-слабоподзолистой почвой*. При крупномасштабной почвенной съемке (один разрез на 20га) подобные детали нередко упускаются: на почвенной карте обычно указывается только степень эрозии - смытости. Поэтому маршрутные исследования почв дополнялись стационарными наблюдениями и работой на «ключках». Они позволяют *уточнить генезис почв* и, в частности, констатировать, что почв **«со вторым**

гумусовым горизонтом<sup>6</sup>» в учхозе не существует: это *обычные намытые почвы*, тяготеющие к западинам и подошвам склонов увалов.

*Субстантивный подход* «проигрывает» Докучаевской концепции полевой диагностики почв с динамичными почвообразовательными процессами, например, в зонах тайги и лесостепи. «*Что видим в профиле, то и есть почва*» - этот подход неполный – его нужно уточнять оценкой ландшафтной ситуации. Так, по нашим данным, в долине реки Сев. Двины распространены *аллювиальные почвы* (в пойме), подзолы песчаные на борových террасах и подзолистые суглинистые почвы на плакорах; болота развиты и в пойме, и на плакорах.



Рис. 39. Слева (А) - профиль дерново-слабоподзолистой легкосуглинистой почвы в верхней трети склона увала (разрез 4, посев вико-овсяной смеси на зеленый корм-2010 год); при окультуривании почв в подзоне южной тайги подзолистый процесс не исчезает совсем, а углубляется ниже пахотного горизонта; справа (В) – та же почва **через 4 года** на сенокосе: заметна припаханность, увеличение мощности подзолистого горизонта на левой боковой стенке разреза (фото Яшина И.М., 2010; 2014).

**Усложним задачу.** В условиях средней тайги РФ можно найти дерново-карбонатные почвы в пределах «Каргопольской суши» Архангельской области, похожие морфологически на черноземы, развитые на элювии известняков в Саратовской области. Однако реализация их производительной способности и биологическая активность будут разные – они функционируют в неодинаковых условиях климата. Это главное. Морфология – первый этап исследования почв. Начинать изучение почв нужно с ландшафтных позиций – *геоэкологической оценки* территории; понимать, где залегают в пространстве те или иные типы и группы почв.

<sup>6</sup> Трактовать почвы со «**вторым гумусовым горизонтом**» - нужно внимательно, учитывая залегание почв по рельефу и их историю (почвы в прошлом неоднократно зарастали лесом и вновь осваивались).



Ведь ландшафты покрыты *комплексами, вариациями и иными комбинациями почв*, что весьма актуально для их агроэкологической характеристики. Продолжим рассмотрение результатов гранулометрического состава почвы разреза 6. Перераспределение частиц ила и физической глины в составе мелкозема (р.6 в западинке) имеет элювиально-иллювиальную направленность, типичную для почв тайги. В современном подзолистом горизонте  $E_g$  (*очевидно, этот горизонт, состоит из собственно подзолистого и контактно-осветленного в почвах на двучленах, объединенных при распахке лесных почв*) наблюдается оглеение, разрушение почвенных минералов, формирование комплексных Fe, Al-органических соединений и их перераспределение в профиле. Эти особенности соответствуют классической трактовке оподзоливания почв в условиях агроландшафтов подзоны южной тайги. **Однако до сих пор не ясно**, почему именно на такой глубине протекает кислотный гидролиз и формируется подзолистый горизонт, а не сразу под дерниной, как в лесу - под лесной подстилкой? На эту важную генетическую деталь оподзоливания почв агроландшафтов почвоведы почему-то не обращали должного внимания.

На наш взгляд, **подобный генетический феномен оподзоливания** в пахотных дерново-подзолистых почвах связан с процессом *хроматографии* (сорбции-десорбции и фракционированием при *динамической миграции*) ВОВ и иных соединений в минералах (и гумусовых веществах) горизонтов  $A_{пах}$  и  $A_1$  при промывном водном режиме. При взаимодействии и водной миграции органоминеральных солей гетерополярного типа с почвенными коллоидами и минералами **гор.  $A_1$**  происходит разрушение молекул солей и ионообменное *поглощение высвободившихся катионов*. **Свободные от катионов органические кислоты осуществляют гидролиз минералов на глубине их наибольшего формирования** и активности – глубже гор.  $A_{пах}$  и  $A_1$ . Наряду с фульвокислотами дополнительным источником органических кислот могут быть *продукты жизнедеятельности плесневых грибов* (микотоксины, алифатические органические кислоты, антибиотики), *накапливающиеся в горизонтах «плужной подошвы» горизонта  $A_{пах}$*  при оглеении и дефиците свободного кислорода. Причем, *агротехническое почвоуглубление и травосеяние не устраняют данную проблему полностью*: оподзоливание устремляется глубже  $A_{пах}$  даже в очень мощных (окультуренных пахотных слоях) – в иллювиальный горизонт – рис. 39А. *Для изучения этого явления и используются сорбционные лизиметры.*

Возможно, указанный механизм фракционирования ВОВ и ионообменной сорбции веществ реализуется и в *подзолистых почвах лесных фаций тайги*. Вероятно, благоприятные циклы формирования и аккумуляции под лесной подстилкой гумусовых веществ (типа гуминовых веществ) сопряжены с процессами фракционирования ВОВ, ионной сорбции-десорбции и выщелачивания. В результате и образуется белесый подзолистый горизонт и хроматограмма веществ иных горизонтов подзолистых почв. Особенно четко эти процессы, связанные с расцветиванием песка и супеси

соединениями железа, можно наблюдать в подзолах на двучленах, а также в подзолах на древнем аллювии и флювиогляциальных отложениях.

При почвенно-агрохимическом и агроэкологическом картировании почв предлагаем усовершенствовать методику отбора почвенных образцов. Индивидуальные образцы рекомендуем отбирать в верхней, средней и нижней частях пахотного горизонта с «шагом» 7-10 см, в приконтке. Такой подход позволит более точно узнать базовые физико-химические свойства веществ пахотного слоя, и более полно изучить их динамику.

На основании полученной новой информации можно констатировать:

Исследована морфология почв агроландшафтов учхоза «Дружба» Ярославской области за период 2010-2015 гг. в 4-х почвенно-экологических катенах (7 разрезов). Морфологические признаки изученных почв указывают на их приуроченность к дерново-подзолистым аналогам в той или иной мере оглеенным и эродированным (смыто-намытым). Оподзоливание и оглеение почв заметно усиливаются по небольшим понижениям в рельефе.

Химические свойства дерново-подзолистых почв учхоза «Дружба» свидетельствуют об их ненасыщенности основаниями и кислой реакции среды. *Даже при близком залегании к поверхности  $\text{CaCO}_3$  высокая кислотность верхних горизонтов сохраняется (рН 4,3-4,5),* очевидно, за счет масштабной мобилизации и водной миграции ВОВ с кислотными свойствами.

Содержание органического вещества в дерново-подзолистых почвах учхоза низкое (0,7-2,8% гумуса), отличается равномерным распределением по профилю и склонностью к водной миграции ВОВ.

Лимитирующие экологические факторы в агроландшафтах почв учхоза – плужная подошва, повышенная кислотность, низкое содержание органического вещества, а также использование «чистых паров», активизирующих дегумификацию и смытость пахотных слоев почв.

При выделении в почвенном покрове учхоза «Дружба» контуров высоко бонитетных серых почв необходимо ландшафтное и почвенно-экологическое обоснование данного генетического типа. *Диагностика серых почв только по их морфологии некорректна – это начальный этап изучения почвы, как и любого другого типа.*

Правильное определение типов почв важно для кадастровой оценки почвенных ресурсов и налогообложения. Дальнейшее улучшение (сохранение) почвенного плодородия агроландшафтов учхоза неразрывно связано со скорейшим *обновлением почвенно-агрохимической документации,* постройкой нового хранилища для удобрений и их применением с помощью ГИС технологий (по информации на электронных картах) с помощью современной техники в севооборотах.

Напомним, речь должна идти не о «земле», а о почвах и почвенных ресурсах. К сожалению, эти вопросы решают *не почвоведы, а землеустроители.* Они имеют недостаточную профессиональную подготовку по почвоведению.

## 7.6. Эко-геохимическая оценка опустынивания ландшафтов

В современный период южные регионы России испытывают активную аридизацию климата. Не исключено, что она будет *усиливаться в степной и сухостепной зонах*. В этой связи известный интерес представляют сведения о процессе опустынивания, который уже ярко проявляется, в частности, в Средиземноморской зоне земного шара.

Сведения, которые будут рассматриваться в учебном пособии по экогеохимии ландшафта, были получены И.М. Яшиным в период 1979-1980 гг., когда он работал научным сотрудником в почвенно-экологической экспедиции «Союзсельхоззагранпоставка» в Ливии. И.М. Яшин является одним из соавторов 3-х томной монографии по почвам Ливии, изданной в 1980 году на английском языке, на Мальте под редакцией академика ВАСХНИЛ Л.Л. Шишова. Трехтомник включает характеристику почв, ландшафтов и растительности 3-х регионов Ливии: Триполитанию, Сиртику и Бенгазийские ландшафты (недалеко от Египта).

Анализ фактических данных по средиземноморским ландшафтам Ливии поможет студентам глубже познать **экологические процессы опустынивания**, которые, возможно, довольно скоро проявятся в южных регионах России.

**Опустынивание** – глобальный экологический процесс деградации экстремально аридных ландшафтов Земли. Актуальность и важность изучения *опустынивания* не вызывает сомнений, поскольку с ним связано интенсивное, масштабное и нередко необратимое разрушение экосистем и ландшафтов аридных зон Земли, которые некогда были цветущими оазисами.

Опустынивание типичное природное явление на континентах с субтропическим и тропическим сухим климатом. Оно приводит к необратимому разрушению почв, деградации фауны и флоры, истощению и засолению водных источников и, как следствие, существенному падению производства продуктов питания и сырья, ухудшению благосостояния населения, неустойчивости (кризисам) экономики. Поэтому опустынивание – важнейшая социально-экономическая проблема.

Поскольку опустынивание – комплексный природный процесс, реализующийся стадийно, к его изучению необходимо привлекать *методы различных научных дисциплин: географии, почвоведения, геоботаники, гидрогеохимии, ландшафтоведения, метеорологии, экологии* и др.

*Наиболее перспективно комплексное применение почвенно-экологических методов в системе мониторинга опустыненных ландшафтов.*

### 7.6.1. Методология оценки опустынивания

Специалисты по-разному трактуют термин «опустынивание». Так, В.А. Ковда считает, что «...опустынивание – это процесс резкого уменьшения продуктивности семиаридных и субгумидных ландшафтов до уровня продуктивности (естественных – *И.Я.*) пустынь», Б.Г. Розанов диагностирует опустынивание как «...распространение и интенсификацию пустынной экологической ситуации, т.е. процесс, при котором продуктивность полузасушливых или полувлажных территорий снижается до уровня, характерного для пустынь, под воздействием природных факторов и (или) деятельности человека» (1986). По мнению сотрудников Института пустынь АН Туркменистана, ...опустынивание – процесс, ведущий к сокращению биологической продуктивности экосистем, что, в свою очередь, вызывает сокращение запасов кормов на пастбищах, уменьшение урожая сельскохозяйственных культур и ухудшение условий жизни людей». А.П. Лавров отрицает развитие опустынивания на культурных орошаемых почвах в экстрааридных условиях, если человек не покидает эти районы. Н.Г. Харин и Г.С. Каленов (1986) исследовали специфику антропогенного опустынивания в современной дельте Аму-Дарьи, в зоне первой очереди Каракумского канала и других регионах. Авторы отмечают, что одним из видов антропогенного опустынивания является нерегулируемый характер отгонного животноводства. А. Рапп, как и другие шведские экологи, придерживается термина «**дезертизация**», определяя его как «проникновение условий пустынь в аридные и семиаридные районы». Леуэр считает термины «дезертификация» и «дезертизация» неравнозначными. Первый означает деградацию растительного и почвенного покрова в пределах любых природных зон, последний – расширение площади типичных пустынных ландшафтов в пределах аридных зон Земли. Авторы проекта SOLAR, как и Леуэр, близки в трактовке терминов «дезертификация» и «дезертизация».

Более удачен термин «опустынивание»: это сложный стадийный процесс изменения биологической продуктивности и состава растительности, коренной и необратимой трансформации почвенного покрова – резкого ослабления «связей» в структурной организации почв (на разных уровнях), изменения направленности и интенсивности зональных процессов почвообразования, существенного ухудшения уровня почвенного плодородия (а также и других природных ресурсов) и, как следствие, превращения экосистемы в пустыню под влиянием климата, нерационального антропогенного воздействия или их сочетания в любой биоклиматической зоне Земли.

В Ливии деградация почвенного и растительного покрова, водных ресурсов и других составляющих биосферы, проявляющаяся в виде *очагового опустынивания*, связана с нерациональным размещением водопойных колодцев, нерегулируемой заготовкой топлива, строительством дорожно-транспортной сети и индустриальных объектов без последующей

рекультивации, проведением геологоразведочных работ, разработкой полезных ископаемых, добычей нефти и строительных материалов (камень, щебень, песок), сооружением промышленных объектов, ирригационной сети, строительством населенных пунктов и т.д.

Пока еще не сложилось полное научное представление об опустынивании различных зон Земли – направленности, скорости, необратимости и формах его проявления. Эти вопросы находятся на стадии всестороннего изучения и анализа. В то же время достоверно установлены масштабы рассматриваемого природно-антропогенного явления, затрагивающего территории более 100 стран мира. На земном шаре за период с 1940 по 1990 гг. около 8,1 млн. км<sup>2</sup> когда-то продуктивных экосистем (пашня, луга, леса) превращены в результате антропогенного воздействия в пустыню. Каждый год появляется 61 тыс. км<sup>2</sup> новых пустынных ландшафтов (Т. Миллер, 1993). *Примерно 1/3 почв земного шара находится под угрозой опустынивания.*

В Африке опустынивание диагностировано на площади, превышающей 18 млн. км<sup>2</sup>. Только за последние 50 лет в районах, граничащих с южной Сахарой, образовалось более 650 тыс. км<sup>2</sup> опустыненных ландшафтов. Опустынивание суши распространяется со скоростью около 25 км<sup>2</sup> в год.

#### **7.6.2. Состояние и опустынивание субтропических экосистем (на примере Средиземноморских ландшафтов Ливии)**

С средиземноморской зоне Ливийской Джамахирии опустынивание проявляется с разной скоростью и направленностью. Почвенно-экологический материал по основным земледельческим и пастбищным районам страны (Триполитанская зона, Центральный пастбищный массив вблизи залива Сирт и Бенгазийская зона – Киренаика – к северо-востоку от Центрального массива) позволяет заключить, что ландшафты этих территорий отличаются самобытностью биоклиматических, растительных, почвенно-экологических и водных ресурсов. Они испытывают, например, различную по характеру, специфике и длительности воздействия антропогенную нагрузку, поэтому податливость, степень развития и характер процессов опустынивания существенно различаются.

**Анализ природных условий объекта исследований.** Средиземноморская зона Ливии с севера ограничена побережьем Средиземного моря, с юга – пустыней Сахара, что и обуславливает своеобразие аридизации территории и специфику современного почвообразования. Прилегающим к Сахаре пространствам грозит опасность быстрого опустынивания. Здесь велико влияние естественных факторов и физических процессов: высокая аридность, разреженность растительного покрова, сильная интенсивность дефляции, наличие значительных массивов обнаженных каменистых и скалистых поверхностей и т.д. С точки зрения экологов – это наиболее уязвимые для опустынивания ландшафты. Земли ряда оазисов вряд ли целесообразно относить к районам современного опустынивания.



Одной из причин аридизации климата средиземноморских ландшафтов, прилегающих к экстремально аридной тропической пустыне Сахаре, где испаряемость превышает 5200 мм в год, является их высокое альbedo, поэтому атмосфера над указанными пространствами сильнее охлаждена, чем в иных регионах. Разогретая поверхность почв, песка, камней и скал способствует усилению нисходящих потоков воздуха и увеличению его сухости. В этом отношении характерна территория г. Аль-Азизи, где температура воздуха летом достигает **65,2°C (абс. максимум на Земле)**.

Атмосферные осадки выпадают крайне неравномерно в отдельные годы, в разные сезоны и в пространстве, поэтому количество влаги в тех или иных пунктах заметно колеблется. Так, по данным метеорологических станций, расположенных на территории нагорья Джебель аль-Ахдар (Абьяр – на юго-востоке и Такнис – на южном макросклоне нагорья), количество атмосферных осадков в Такнисе уменьшилось с 301 (1928-1940 гг.) до 255 мм (1956-1976 гг.), в Абьяре – с 289 (1925-1940 гг.) до 239 мм (1959-1978 гг.).

По литературным сведениям о климате Ливии, при увеличении абсолютной высоты на плато Джебель аль-Нефус среднегодовая температура воздуха снижалась, а количество осадков увеличивалось. Орографический градиент температуры равен 2,4°C, осадков – 99 мм (метеорологические станции Хомса и Гарьяна). При увеличении абсолютной высоты на плато Джебель аль-Ахдар *орографический градиент температуры составляет 3,8°C, а осадков – 345,1 мм* (метеорологические станции Бенгази и Шахата).

Следствием многообразия факторов, формирующих климат указанных выше объектов, является четкая дифференциация типов биоклимата как в широтном, так и в меридиональном направлении. В Триполитании, например, были выделены три типа средиземноморского субтропического климата:

- 1) **семиаридный** (нагорье и прибрежная зона), количество осадков – более 300 мм, среднегодовая температура – 18...19,5°C, коэффициент аридности по Мортону – 10...15;
- 2) **аридный** (останцовая равнина, населенный пункт Хомс, Аль-Азизия), количество осадков – 200...300 мм, среднегодовая температура – 20,5°C, коэффициент аридности – до 10;
- 3) **экстрааридный** (или сахарский) – типичен для южной и юго-восточной части нагорья Джебель аль-Нефус, количество осадков – 500...150 мм, среднегодовая температура – 20,5°C.

Пастбищный (Центральный) массив – Сиртика – отнесен к экстрааридному типу климата, поскольку эта территория приурочена к краевой части Ливийской пустыни; Киренаика – Бенгази, Мардж – к субгумидному, семиаридному и ариднему.

Для **Средиземноморской зоны Ливии** характерен весьма активный ветровой режим. Около 200 дней в году дуют ветры, скорость которых превышает 3 м/с. Характерны сухие, горячие ветры, дующие из Сахары

(«гибли») и несущие большое количество пыли. Поэтому здесь протекают интенсивные дефляционные процессы.

Разнообразие биоклиматических условий в рассматриваемых объектах средиземноморской зоны Ливии определяет специфику образования почв, географию, генезис и их плодородие, а также разную податливость экосистем к опустыниванию.

**Субгумидный климат плато Джебель аль-Ахдар (вблизи от Египта)** обуславливает своеобразие структуры почвенного покрова Киренаики – формирование и организацию в пространстве таких почв, как феррисиаллитные, темные слитые, рендзины, коричневые сиаллитные, которые в достаточной мере обеспечены влагой. Общие закономерности широтной и вертикальной зональности почв Киренаики определяются прежде всего характером биоклимата и орографией местности. В данной природной обстановке процесс естественного опустынивания затрагивает не только ландшафты южного макросклона Джебель аль-Ахдара, но и другие пространства.

С особенностями климата Триполитании связано формирование *аридного типа почвообразования* с широким распространением зональных красновато-бурых аридных почв, главный образ, легкого механического состава. Варьирование климатических показателей также находит отражение в широтной смене почв, своеобразии их комбинаций и инверсии, проявляющихся в сопряженных элементах рельефа равнины Джеффара и нагорья Джебель аль-Нефуса. Наряду с увеличением аридности климата в нагорьях Джебель аль-Нефус и Джебель аль-Ахдар происходит нелинейная смена почв и растительных ассоциаций (в виде выступов, «затеков»), которая связана с элементами и формами рельефа. Поэтому границы широтной смены зональных типов почв на крупномасштабных почвенных картах имеют фестончатый вид. Явление «миграции» и взаимопроникновение почвенных зон могут рассматриваться как следствие активизации опустынивания.

Большое разнообразие форм рельефа, пестрота залегания почвообразующих пород, неоднородность характера процессов выветривания и почвообразования на фоне разных типов биоклимата средиземноморской зоны Ливии определяют *зонально-провинциальную дифференциацию почвенного покрова* в пределах основных морфоструктур рельефа, сильную его комплексность, полигенетичность. В результате дефляции активизируется перенос и переотложение значительных масс пыли и песка из одних ландшафтов в другие. Поэтому почвенные профили, в частности в Триполитании, отличаются легким механическим составом, часто слабо или совсем не дифференцированы на генетические горизонты; подобная трансформация почв затрудняет их полевую диагностику и заметно уменьшает продуктивность агроландшафтов.

**Взаимосвязь рельефа с почвенным покровом** наблюдалась на различных таксономических уровнях – от макроформ рельефа до типов почв, от

микрорельефа до родов и видов почв. Установлено, в частности, что крупные формы рельефа, обуславливающие абсолютные отметки местности, ориентировку основных орографических пространств и их экспозицию, определяют положение почвенных географических зон Ливии. В Киренаике (Бенгазийский массив), например, проявляется четкая зональность почвенного покрова: на северном макросклоне нагорья Джебель аль-Ахдара формируются и распространены красные феррсиаллитные почвы, которые при движении к югу сменяются коричневыми сиаллитными и локально-темными слитыми (они занимают наибольшие высоты регионального водораздела нагорья); последние уступают место красновато-бурым аридным, а на южной окраине объекта господствуют бурые аридные полупустынные (субтропические) почвы, наиболее податливые антропогенному опустыниванию. Неоднородность рельефа и пород внутри крупных морфоструктур, а также масштаб почвенно-экологического картографирования не позволяют выявить частные закономерности пространственной организации почв и особенности их взаимосвязи в почвенных структурах. Для этого необходима детальная (М 1:500–1:2000) почвенная съемка отдельных (характерных) ландшафтов. Тем не менее исследования позволили обнаружить определенную взаимосвязь между типами рельефа и структурами почвенного покрова – комбинациями зональных типов, подтипов и т.д. почв с не почвенными образованиями.

Выявлена адекватность типов рельефа (с высокой динамикой развития геоморфологических процессов) своеобразным не почвенным образованиям: на морских пляжах и береговых дюнах развиты приморские пески; на останцовой равнине, в нагорьях (в пределах аккумулятивных равнин) формируются континентальные пески. В русловых фациях аллювия, пролювиальных шлейфах, осыпных конусах выноса нагорья залегают грубо текстурные каменистые образования, а в районе эскарпа, клифа и расчлененных денудацией плато широко распространены скальные обнажения.

Взаимосвязь в **пространстве почв и непочвенных** образований – одна из характерных особенностей почвенного покрова северной Ливии. Исходя из соотношения указанных компонентов в почвенной комбинации, приуроченной к конкретному мезорельефу, можно уточнить интенсивность опустынивания конкретного ландшафта.

В натуральных экспедиционных и маршрутных ливийских исследованиях 1977-1980 гг. авторами была также отмечена характерная роль мезорельефа в перераспределении мелкозема в системе: водораздел – склон – понижение, способствующая локализации на склонах разной крутизны и экспозиции интразональных почв – лито солей, а в понижениях – зональных аналогов с мощным, но в разной степени дифференцированным профилем. По мере возрастания эрозионно-денудационной расчлененности рельефа от плоской

приморской равнины к глубоко расчлененному нагорью заметно возрастают степень эродированности почв, их каменистость и скелетность.

Проявлению опустынивания на выровненных пространствах гамад и сериров северной Ливии способствует дефляция; вынос мелкозема и песка предопределяет развитие своеобразных почв – литосолей даже на равнинах.

**Влияние литогенного фактора** на почвообразование можно проследить на эоловых отложениях равнины Джеффара. Формирующиеся, например в Триполитании, на рассматриваемых породах зональные красновато-бурые аридные почвы наследуют их механический состав, водно-физические и химические свойства. На начальном этапе почвообразования профиль таких почв нередко не дифференцирован на генетические горизонты, почва отличается высокой фильтрацией, повышенной порозностью аэрации, малыми запасами продуктивной влаги и крайне низким эффективным плодородием. В то же время эти почвы, как правило, не засолены и характеризуются высокой степенью конденсации парообразной влаги на глубине 60...80 см. По мере усиления процессов выветривания и почвообразования влияние исходного состава породы на почву ослабевает.

В связи с изложенным на территории Триполитании и центральной зоны Ливии распространены песчаные и супесчаные разновидности, а в Киренаике – преимущественно суглинистые и глинистые почвы, что важно учитывать при оценке опустынивания. При прочих равных условиях в процессе опустынивания в более худшем положении оказываются экосистемы, сформированные на суглинистых и глинистых почвах, несмотря на то, что эти разновидности более устойчивы к эрозии, чем пески, супеси. В последних даже при длительных засухах на глубине около полуметра обнаруживается влажный песок; суглинистые почвы, обладая хорошей капиллярностью, весьма интенсивно теряют влагу, активно засоляются и сильно уплотняются. Поэтому растительность на них при засухе, как правило, быстро погибает, а эти почвы трансформируются в такыроподобные образования – один из компонентов пустынных ландшафтов.

**Экосистемы Триполитании** неоднозначны по устойчивости и податливости к опустыниванию. Наиболее стабильны к климатической деградации ландшафты южного макросклона нагорья Джебель аль-Нефуса, которые приспособились к экстрааридному климату в результате длительного развития. При рациональном природопользовании (*proper land use*) экосистемы могут функционировать еще длительное время не разрушаясь. На равнине Джеффара отмечено локальное (пятнистое) *возникновение отдельных очагов опустынивания*, связанное с сильным засолением почв, деградацией растительности, педогенным корообразованием, дефляцией и плоскостной эрозией. Более глубокому опустыниванию Джеффары препятствуют близость Средиземного моря, легкий механический состав пород и почв, а также процессы ветровой эрозии, способствующие заносу мелкоземом опустыненных (солончаковых,

коровых и каменистых) очагов ландшафта и их экранизации. Пески можно закреплять и осваивать более успешно, чем участки солончаков, каменистые или глинистые пространства пустынь.

Констатируется: наиболее целесообразно вкладывать средства в *систематическое и всестороннее изучение и охрану окружающей среды* (почв, растительности, природных вод и других компонентов биосферы), нежели необратимо терять ценные земельные угодья и затем вкладывать огромные капиталы на рекультивацию и мелиорацию почв, ставших бесплодными или малопродуктивными из-за нерационального или неправильного природопользования.

**Сочетание комплекса современных и реликтовых условий** среды Ливии способствовало развитию в ландшафте и почвах плитообразных солевых кор (панцирей) переменного химического состава, неоднородного сложения и различной пространственной выраженности; оно также определило красноцветность почв, отсутствие или очень слабое проявление солонцеватости (главным образом в почвах Киренаики) на фоне усиливающейся аридизации суши.

Анализ зарубежных литературных данных показал, что **региональные и маршрутные исследования** в странах Средиземноморского бассейна, Ближнего Востока без комплексных почвенно-экологических изысканий не позволяли раскрыть **функциональное значение кор в ландшафтах**, поэтому ряд особенностей почвообразования и характер структуры почвенного покрова пока освещены неполно (Дюран, 1958; Дюшофур, 1970).

Коры являются не только современными педогенными типоморфными образованиями, но и реликтом.

В условиях Ливии и, очевидно, в ландшафтах многих стран средиземноморского бассейна **корообразование** может рассматриваться как один из характерных почвенно-геохимических процессов и важных эдафических факторов при оценке качества почвенного покрова. Его своеобразие свидетельствует о вековом (по длительности) и дискретном (по пространственному проявлению) циклах движения водорастворимых соединений (солевых масс) от зон их образования (нагорья, увалы, холмы и т.д.) к бессточным континентальным морским бассейнам. Следовательно, в результате обще регионального процесса карбонатизации почв и грунтов продукты выветривания и почвообразования лишь частично отчуждаются из биосферы и захороняются в морских и океанических бассейнах; значительная их масса удерживается почвами и химическими соединениями кор. Таким образом, коры в средиземноморских ландшафтах являются **мощным геохимическим барьером** на пути миграции водорастворимых солей. Изучение состава, свойств кор и коровых горизонтов почв позволяет глубже понять процессы пространственно-временной трансформации почвенного покрова, раскрыть особенности циклов почвообразования, эрозии, ряда экзогенных явлений в конкретной орографической ситуации. С



формированием и развитием кор тесно связаны эрозия и образование пространственных почвенных структур. Массивы кор бронируют толщи мелкозема, залегающие под ними, что приводит к резкому уменьшению масштабов и зон распространения эрозии. В этом проявляется определенная ресурсосберегающая функция кор. Термин «**кора**» не идентичен понятию «**кора выветривания**». Кора выветривания, как известно, – это поверхностная часть литосферы, минералогический состав которой, физические и физико-химические свойства существенно изменены вследствие процессов субэдрального выветривания. Кору динамичны в своем развитии. В природных условиях Триполитании наблюдается «рост» коры за счет осадкообразования продуктов выветривания на ее поверхности при плоскостной эрозии; «омоложение» состава кор (нижних их слоев), особенно в придолинных участках вади (высохшие русла рек, теряющиеся в песках и не впадающие в Средиземное море), происходит при временном боковом внутрпочвенном потоке воды и солей. В зональных типах почв (красновато-бурых аридных, коричневых сиаалитных, солончаках и гидроморфных) формирование коровых прослоек и горизонтов тесно сопряжено с циклами перераспределения солей по элементам рельефа и периодическим образованием минерализованных грунтовых вод. Результаты сравнительного анализа данных о валовом составе кор и коровых горизонтов почв свидетельствуют об их генетической близости и доминировании среди химических соединений оксида кальция. В почвах коровые горизонты обогащаются  $\text{SiO}_2$ , а также полуторными окислами, т.е. продуктами почвообразования. Проявления корообразования учитывались при классификации и диагностике почв Ливии (И.М. Яшин, Л.Л. Шишов, 1984).

Периодичность, низкая интенсивность и небольшая емкость биохимических почвенных процессов, бедный видовой состав растительных сообществ, незначительная масса растительного опада и локализация растительности в пространстве, преобладание минерализации органических веществ над гумификацией обуславливают очень медленное гумусообразование, низкий уровень гумусированности почв. **Процессы почвообразования протекают преимущественно в условиях высокой насыщенности карбонатами кальция** при наличии и пульсации водорастворимых солей, контрастном гидротермическом режиме (резком преобладании испаряемости над поступлением осадков, высокой годовой температуре и ярко выраженной ксеротермической фазе). Указанные почвы характеризуются низкой буферностью в нейтральной или щелочной среде, гумус минерализуется быстро, фосфор, железо и марганец менее доступны растениям, чем в почвах с кислой реакцией среды. В вегетативных органах диких и культурных растений (особенно из семейств крестоцветных и реже бобовых), которые произрастают на почвах Средиземноморья, можно обнаружить значительное количество солевых и ионных форм кальция, а также калия.

Помимо корообразования, специфичной эколого-географической чертой изучаемого объекта северной Африки является **красноцветность почв**, а нередко и почвообразующих пород. Красный цвет зональных почвенных горизонтов – это не только результат проявления рубефикации в современный период (чему весьма благоприятствует средиземноморский климат), но и следствие влияния прошлых фаз почвообразования (не исключается их полицикличность и древность). Отмечается определенная корреляция между количеством щелочно-земельных оснований и характером трансформации форм железа. Чем больше потери карбонатов во влажный период года и чем глубже протекает процесс образования оксидов железа (окристаллизованных форм), тем интенсивнее красный цвет средиземноморских почв. Однако разнообразие условий рубефикации в разных ландшафтах и типах почв Ливии обуславливает неодинаковую направленность и скорость превращения соединений железа. Поэтому диагностика почв, в которых заметно преобладают оксиды железа, представляет собой весьма сложный процесс. Например, в Киренаике был выделен тип красных феррсиаллитных почв. С особенностями почвообразования в этом регионе связано формирование целого ряда почв, относящихся к данному типу (типичных, конкреционных, коровых, гидратированных, гидроморфных и укороченного профиля), причем родовые отличия проявлялись в неодинаковой степени насыщенности основаниями (и реакции среды), засоленности, резком обеднении профиля карбонатами и ряде других. Свообразием особенно выделялись подтипы гидроморфных карбонатных солонцевато-засоленных феррсиаллитных почв тяжелого механического состава. Очевидно, **процесс феррсиаллитизации**, типичный для наиболее влажных районов Средиземноморья, протекает в несколько стадий, сопряженных с влажной и прохладной зимой и жарким, очень сухим летом. Выщелачивание карбонатов атмосферными осадками – первый и неперенный этап феррсиаллитизации (в полевых условиях отмечаются профили почв, резко дифференцируемые по содержанию карбонатов). В почвенной среде, все же насыщенной катионами  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ , подвижность полутора оксидов и кремнезема незначительная, и эти соединения участвуют в основном в новообразовании глин. **Железо** в окислительных условиях, при длительном периоде дегидратации и высоких температурах переходит преимущественно в оксидные соединения, которые в виде пленок покрывают новообразованные глины, придавая им устойчивость и красный цвет. Однако скорость неосинтеза глин, их стабильность, возможность миграции во влажный период железокремниевых золь и глинистых частиц в рассматриваемом почвообразовательном процессе еще не изучены. Не установлено также влияние аккумуляции солей на характер и степень осолонцовывания данных почв. Выяснение этих и некоторых других вопросов позволит разграничить продукты почвообразования в современных условиях и реликты прошлых

эпох, а также уточнить экологическую ситуацию в условиях усиливающейся аридизации климата.

**Большинство прогнозов засух до 2030 г. неблагоприятно.** Ожидается период общего уменьшения количества осадков на всем континенте. В этой связи государства аридных зон Земли, как отмечалось на сессии ЮНЕП, должны мобилизовать усилия на создание резервов кормов, продовольствия, растительного сырья и осуществление мер по накоплению и сохранению в почве влаги, рациональному использованию воды и растительного покрова. Однако решение указанных проблем чрезвычайно сложно. По-видимому, основной вопрос сейчас состоит не только в комплексном изучении опустынивания как экологического явления, но и главным образом в реализации имеющихся знаний в конкретных ландшафтных и социально-экономических ситуациях. Не следует упускать из вида и другие первоочередные проблемы многих стран Африки и Ближнего Востока: обеспеченность продовольствием, жильем, энергией, внедрение образовательных программ по экологии.

В этой связи «...для многих стран мира, особенно для развивающихся стран Азии, Африки и Латинской Америки, борьба с опустыниванием – это программа социально-экономического развития в целом на базе современной научно-технической революции» (Б.Г. Розанов).

Наиболее экстрааридные условия развития экосистем наблюдаются на южных макросклонах нагорий Джебель аль-Нефус (Триполитания) и Джебель аль-Ахдар Киренаика), а также в Центральной зоне (Сиртика) Ливийской Джамахирии. Каждый из этих регионов своеобразен и неповторим. В то же время протекающий здесь **буроземно-полупустынный субтропический процесс почвообразования имеет ряд общих особенностей:** сильная заторможенность гумусонакопления, слабое вторичное глинообразование (сиаллитизация) средней части почвенного профиля, рубефикация и карбонатизация мелкозема, частичное соленакопление. Осолонцевание нетипично, хотя и отмечается в некоторых районах близ Сахары на глинистых и тяжелосуглинистых почвах. Аккумуляция солей обусловлена не только залеганием этих почв на засоленных породах, но и их поступлением биологическим путем, а также за счет эолового привноса. Во влажный сезон от солей частично освобождается верхняя часть почвенного профиля.

В профиле рассматриваемых почв отсутствует корка, в них содержится значительное количество карбонатов в форме конкреций и псевдомицелия, при этом водорастворимые соли в большинстве случаев сосредоточены глубже 120...150 см. В районах, прилегающих к Сахаре, иногда отмечались конкреционные известковые прослойки и солонцовые горизонты, по-видимому, реликты прошлых более влажных фаз почвообразования.

**Бурые полупустынные субтропические почвы** по сравнению с почвами пустынь Ливийской Джамахирии более удобны для земледелия, хотя ряд их неблагоприятных генетических особенностей – выпотной водный режим,

нередко небольшая мощность профиля, сильные скелетность и каменистость поверхности, засоление, интенсивная карбонатизация профиля – заметно осложняют освоение и интенсивное сельскохозяйственное использование. В то же время устойчивость экосистем к опустыниванию различна как в пределах одной зоны (например, Триполитании), так и в разных регионах страны. В частности, исследования Н.Г. Харина и Г.С. Каленова показали, что в Центральной зоне Ливии на бурых полупустынных слабо дифференцированных почвах формируются экосистемы с разреженной растительностью, состоящей преимущественно из ксерофитных кустарников и полукустарничков. Причем эти экосистемы в зависимости от мощности профилей почв видоизменяются, образуя своеобразный эколого-генетический ряд: *Hammada schmittiana*, *Anabasis articulata* → *Hammada schmittiana* → *Traganum nudatum*. Не исключено, что подобные климаксовые экосистемы отражают специфику трансформации растительности при опустынивании, сопровождающуюся отбором наиболее устойчивых растительных сообществ при существенном изменении не только морфологии, но и состава, свойств, а также солевого и водного режимов почв.

Результаты комплексного почвенно-экологического исследования ландшафтов показали, что в условиях усиливающейся аридизации климата в Ливии и антропогенной нагрузки на земледельческие и пастбищные экосистемы наряду с генетическими особенностями почв и растительности необходимо учитывать мощность мелкоземистой толщи, которая позволяет более объективно оценить качество (бонитет) и производительные возможности почвенного покрова. Это особенно важно для полупустынь и аридных территорий Средиземноморья. Поэтому при почвенном картографировании трех различных природно-географических объектов страны **выделены неразвитые профили почв** (мощность мелкозема до кровли плотных пород – 5...30 см), слаборазвитые (30...50 см), среднеразвитые (50...80 см), глубокоразвитые (80...120 см) и мощные (более 120 см).

**Состояние компонентов антропогенных экосистем Ливии** (пашни, пастбища, лесопосадки, пальмовники, карьеры, свалки, скотобойни) регулируется человеком. Однако оно реализуется на фоне глобального опустынивания ландшафтов не только средиземноморской территории Африки, но и огромных пространств, прилегающих к пустыне Сахара. Следует шире внедрять приемы рационального природопользования. В разных регионах Африки (страны Сахельской зоны, центр Африки) опустынивание проявляется в разных масштабах и с неодинаковой скоростью деградации компонентов биосферы. В Ливийской Джамахирии в течение последних 20 лет активно проводятся работы по борьбе с подвижными песками. Под угрозой опустынивания в стране находится более четверти миллиона гектаров земли в районах Сиртики, Триполитании, а также в Киренаике. К 1980 г., например, только в Центральной зоне было

погребено песками более 24 тыс. га почвенного покрова. Площади наиболее подвижных морских песков в основном сосредоточены в Триполитании (10,7 тыс. га) и Сиртике (12,8 тыс. га), в Киренаике их значительно меньше – 3,8 тыс. га. Образуя прибрежные дюны и барханы, морские пески слабо закрепляются растительностью и приходят в движение при скорости ветра более 3,5 м/с. Приморские пески наносят огромный материальный и экологический ущерб, засыпая оазисы, продуктивные пастбища, обрабатываемые земли, постройки, дороги. Стихийное тысячелетнее использование природных ресурсов Ливии привело не только к их трансформации, истощению, но и нередко к необратимому изменению.

**Нерегулируемый выпас скота**, в частности в Сиртике, способствовал изреживанию и видовому обеднению растительного покрова, исчезновению ценных в кормовом отношении видов (*Gumnocarpus decander*, *Neasa micronata*, *Echiochilon fruticosum*) и преобладанию кустарниковых видов (*Thymelaea hirsuta*, *Salsola tetrandra*, *Suaeda mollis*, *Hammada scoparia*). Выпас скота обусловил уменьшение растительного опада, поступающего в почву. Локальные очаги растительности наряду с рельефом, породами способствовали пространственно-временной дифференциации процессов почвообразования, варьированию состава и свойств почв при уменьшении роли биологического фактора в генезисе и эволюции почвенного покрова. В этих условиях снижается содержание гумуса и азота в почвах, ухудшаются почвенная структура, водно-физические и химические свойства.

**В Сиртике в 1977-1980 гг.** выявлено 360 тыс. га эродированных почв, продуктивность которых заметно ниже, чем не деградированных массивов. Наиболее характерные признаки опустынивания территории Ливии представлены в табл. 8. Сочетания признаков опустынивания в иных географических условиях могут быть другими.

Целесообразны **стандартизация методов интерпретации опустынивания**, оценка направленности и степени развития процесса опустынивания на перспективу. Полезную и необходимую информацию могут дать специальные карты опустынивания ландшафтов, приуроченные к крупным орографическим системам: нагорьям, приморским низменностям, массивам, граничащим с Сахарой. Наличие карт в совокупности с мониторингом, т.е. постоянным наблюдением за состоянием окружающей среды (растительностью, почвенным покровом, водными ресурсами), повысит эффективность природоохранных мероприятий (защитное облесение, фитомелиорация пастбищ, введение пастбище оборотов, стабилизация подвижных песков и т.д.).

**Опустынивание можно оценить** по величине *сносимой ветром массы почвы с 1 га за год*, увеличению *протяженности оврагов на 1 км*, уменьшению *биологической продуктивности и гумусовому состоянию*. Следует также учитывать рост площадей, занятых не почвенными образованиями, в пределах конкретной формы, рельефа за некоторый интервал времени. Не исключена возможность использования и почвенно-



Табл. 8. Урожайность пастбищ Сиртики в зависимости от степени эродированности почв (ц сухой массы на 1 га), Шишов Л.Л., 1981

| Часть массива    | Состояние пастбищ  |                    |                        |                    |                        |                    |
|------------------|--------------------|--------------------|------------------------|--------------------|------------------------|--------------------|
|                  | Не деградированные |                    | Средне деградированные |                    | Сильно деградированные |                    |
|                  | общий урожай       | потребляемая масса | общий урожай           | потребляемая масса | общий урожай           | потребляемая масса |
| Восточная        | 3,4                | 1,0                | 1,9                    | 1,0                | 1,7                    | 0,9                |
| Центральная      | 2,8                | 1,0                | 1,4                    | 0,8                | 0,9                    | 0,4                |
| Западная         | 2,0                | 0,9                | –                      | –                  | –                      | –                  |
| Всего по Сиртике | 2,6                | 1,0                | 1,7                    | 0,9                | 1,4                    | 0,7                |

геоботанической информации, позволяющей оценить глубину, скорость и необратимость опустынивания конкретных компонентов биосферы при периодических (10...15 лет) почвенно-экологических изысканиях (табл. 8,9). В Ливии лишь 4% земель пригодны для сельскохозяйственного использования. Экстенсивные методы ведения хозяйства при все возрастающей аридизации суши нельзя считать оправданными и приемлемыми. Интенсивные пастбищное животноводство и земледелие могут быть эффективными, если они основываются на рациональном природопользовании.

**Анализ эко-геохимических особенностей опустынивания** в средиземноморских ландшафтах Ливии (и сопредельных территориях – Египет, Тунис) позволяет сделать следующие выводы:

1. Эко-геохимическая оценка **опустынивания аридных территорий** земного шара должна проводиться с учетом результатов комплексного анализа природных, антропогенных, экологических и почвенных процессов, что позволит наиболее полно раскрыть природу этого явления и найти эффективные меры борьбы с ним.
2. В современный период аридные ландшафты средиземноморской зоны Ливии и других соседних государств (Туниса, Египта, Алжира) активно опустыниваются *при неблагоприятном проявлении природных и антропогенных процессов*, приводящих к пятнисто-очаговой деградации почв, растительности, природных вод и других ресурсов.
4. Экологические процессы опустынивания характеризуются изменением видового состава растительных сообществ и заметным уменьшением их продуктивности, расширением площадей, занятых не почвенными образованиями и корами, увеличением овражно-балочной сети и площади сухих русел вади, понижением уровня грунтовых вод и повышением их минерализации, несоответствием современных растительных сообществ экосистем и развивающихся почв, загрязнением природных вод нефтепродуктами и экотоксикантами.

Табл. 9. **Некоторые показатели опустынивания территории Ливии**  
(Л.Л. Шишов, И.М. Яшин, 1988)

| Масштаб и показатели опустынивания  | Территория проявления опустынивания* |
|---|--------------------------------------|
| <b>I. Природные процессы (глобальный масштаб опустынивания)</b>   |                                      |
| Уменьшение общего количества осадков  | 1...3                                |
| Неравномерность выпадения осадков в пространстве по годам и сезонам   | 1...3                                |
| Увеличение числа и продолжительности засух  | 1...2                                |
| Возрастание количества пыльных бурь   | 1...2                                |
| Возникновение пожаров   | 3,1                                  |
| Усиление поверхностного стока из-за возрастания числа ливней  | 1,3                                  |
| <b>II. Антропогенные процессы (локально-региональный масштаб)</b>   |                                      |
| Промышленное и дорожное строительство, нефтедобыча  | 1...3                                |
| Вырубка древесно-кустарниковой растительности   | 1...3                                |
| Разрушение почв и растительного покрова вокруг нерационально размещенных водопойных колодцев, несоблюдение пастбищеоборота, отсутствие взаимосвязи земледелия с животноводством, излишняя пастбищная нагрузка на экосистемы изученных зон страны, несовершенные методы мелиоративного восстановления почв и борьбы с оврагами | 3                                    |
| <b>III. Экологические процессы (зональный масштаб)</b>  |                                      |
| Трансформация видового состава растительных сообществ и уменьшение их продуктивности  | 1...3                                |
| Расширение площадей, занятых непочвенными образованиями (песками, груботекстурными каменистыми отложениями, скальными выходами пород)   | 1,2                                  |
| Рост овражно-балочной сети и системы сухих русел-вади   | 4,3                                  |
| Проведение палов  | 3,1                                  |
| Понижение уровня залегания грунтовых вод  | 3,1                                  |
| Несоответствие современных растительных сообществ и развивающихся почв  | 3,1                                  |
| <b>IV. Почвенные процессы (зонально-провинциальный, нередко ландшафтный масштаб)</b>  |                                      |
| Загрязнение природных вод нефтепродуктами   | 2                                    |
| Динамичное варьирование мощности профилей почв, усиление их скелетности, каменистости   | 1...3                                |
| Опесчанивание и карбонатизация почв   | 1,3                                  |
| Внутрипочвенное соленакопление  | 1,3                                  |
| Осолонцовывание почв, расположенных в субгумидных зонах субтропиков   | 3                                    |
| Современное корообразование   | 1,3                                  |
| Снижение роли биологического фактора в почвообразовании, дегумификации почв   | 1...3                                |
| Активация абиогенных (физических) процессов выветривания  | 1...3                                |
| Несоответствие почв (их морфологии, состава ряда свойств) современным почвообразовательным процессам  | 1...3                                |
| Эволюция почвенного покрова и типов почвообразования при доминировании в конкретных почвенных структурах таких почв, как коры, литосоли, бурые полупустынные, или преобладание в их составе непочвенных образований   | 1...3                                |

\* 1 – Триполитания; 2 – Сиртика; 3 – Киренаика

**4. В почвенном покрове наблюдаются динамичное варьирование мощности профилей почв, усиление их скелетности и каменистости, опесчанивания и**

карбонатизация, внутрипочвенное соленакопление, осолонцовывание зональных почв, современное корообразование, снижение роли биологического фактора в почвенных процессах, все большее доминирование абиогенных (физических)

процессов выветривания, несоответствие морфологии, состава и свойств ряда зональных почв (рендзины, феррсиаллитные, коричневые сиаллитные) современным почвообразовательным процессам, эволюции почвенного покрова в сторону преобладания среди компонентов структурной организации почв не почвенных образований, а также **кор, литосолей и солончаков**.

5. Опустынивание способствует «**миграции почвенно-климатических зон**, их активному обновлению более аридными почвами и экосистемами, в частности на южных макро склонах нагорий Джебель аль-Нефуса и Джебель аль-Ахдар.

6. Опустынивание ландшафтов неблагоприятно сказывается и **на социально-экономическом положении народов** (в частности, проживающих в зоне Сахеля) и приводит к необратимой деградации компонентов экосистем. Это один из самых ярких и наглядных экологических примеров нерационального природопользования аридных и экстрааридных экосистем на Земле.

### Вопросы для самоконтроля

1. Какую роль играют почвенные процессы в ландшафтах при оценке трансформационных потоков экотоксикантов, мелиорантов и удобрений?
2. В чем сущность процесса подзолообразования? Какова роль глее- и подзолообразования в функционировании агроэкосистем таежной зоны?
3. Назовите основные критерии диагностики почвы.
4. Охарактеризуйте ландшафтно-генетические особенности основных типов почв географических зон Земли.
5. Почему в экологии и в агроэкологии почвам и почвенному пространству отводится основополагающее значение?
6. Перечислите главные типы почв средиземноморского бассейна. Чем вызвано здешнее опустынивание ландшафтов?
7. Кратко объясните сущность следующих процессов: рубефикация, оглинивание, сиаллитизация и корообразование.
8. Какие процессы обуславливают аккумуляцию солей в почвах аридных и экстрааридных зон Земли?
9. Охарактеризуйте методологию оценки опустынивания ландшафтов.
10. Назовите природные факторы и признаки опустынивания ландшафтов в экстрааридных зонах Земли.
11. Почему следует проводить агроэкологическую оценку земель в аридных зонах наряду с изучением генезиса почв и почвенного покрова?

## 7.7. Экологические риски и их диагностика на примере почв Ливии

В связи с военными действиями в начале 21-го века ландшафты и почвенный покров Ливии был локально трансформирован или уничтожен. Поэтому на примере подобных ландшафтов можно проследить экологические риски и экологическое состояние почв, занятых субтропическими культурами.

Но вначале кратко остановимся на тенденции, связанной с попыткой переосмысления понятия «почва» (Дмитриев Е.А., 1996). По-видимому, тогда военные действия, природные катастрофы, вызывающие деградацию почв и почвенного покрова, по мнению этих авторов, не будут столь неожиданными и радикально негативными. Подобная трактовка почв связана с развитием в почвоведении теории систем (Карпачевский Л.О., 1993). На наш взгляд, любая точка зрения **может иметь место**, но она должна четко обосновываться фактами, а не базироваться на философских рассуждениях.

Анализ литературы показывает, что почву можно представить как один из видов самостоятельных естественноисторических тел, систем, субстратов, ситонов. Согласно Таргульяну В.О. (1983, 1985) «**ситон** – это любой поверхностный слой любого твердофазного субстрата, косный или биокосный, одно- или многофазный, образованный при инситном взаимодействии среды и субстрата». Будучи ситоном, почва в то же время может рассматриваться как часть коры выветривания. В свою очередь *ситоны, трансситоны и трансоны* образуют *экзоны*. Если экзогенные процессы не успели полностью трансформировать исходный субстрат (породу) в экзон, то часть пространства, занимаемая ситоном, останется неизменной и этот субстрат будет определять особенности ситона. Для **экзона** существует достаточно строгая диагностика: это «...любые различающиеся индивидуумы экзосферы, будь то дискретные тела или «отрезки континуума». На этом новации не заканчиваются. Есть и другие точки зрения.

Признаки, формирующие **критерии диагностики почвы**, по мнению Е.А. Дмитриева (1996), следующие:

– *специфическая горизонтная организация*, с одной стороны, присуща не только почвам, но и другим природным образованиям (например, абиотичным ситонам), а с другой стороны, есть почвы, такой организации не имеющие;

– *наличие органических веществ* и даже гумуса не может гарантировать принадлежности природного образования к почвам (? – **И.Я.**), хотя в последних такие вещества всегда присутствуют;

– *для почв первичным источником органического вещества является продукция автотрофов* (в подавляющем большинстве случаев – фотоавтотрофов), но спорной оказывается обязательность как наличия такого источника, так и автохтонность первичной продукции;

– плодородием в большей или меньшей мере обладают все почвы, но не всякая система (какая система? – **И.Я.**), имеющая плодородие, обязательно есть почва;

– почва обеспечивает произрастание растений, но подобную функцию могут выполнять не только почвы (почва хранит информацию! – **И.Я.**);

– почва всегда биотична, но заселенность живыми существами не есть только ее свойство;

– в процессах почвообразования всегда принимают участие гетеротрофы, но, с одной стороны, гетеротрофы не обязательно связаны с почвами, а с другой – нет единства мнений и о том, может ли функционирование гетеротрофов в отсутствие автотрофов привести к образованию почвы;

– автотрофы обычно являются одними из ведущих агентов почвообразования, но начинают появляться сомнения в том, что их участие обязательно;

– должны ли автотрофы быть представлены только высшими растениями, как это утверждают некоторые исследователи, или образование почвы может проходить при наличии любых автотрофов, например, хемоавтотрофов?

– начало почвообразования обычно связывается с появлением биологического круговорота, но работы последнего времени позволяют усомниться в его обязательности для почвы;

– хорологически почвы приурочены (или были приурочены) к земной поверхности суши или дна водоемов, но не любая такая поверхность оказывается поверхностью почвы.

Из приведенного перечня видно, что в зависимости от принятия тех или иных условий набор природных (и не только природных) тел, которые будут причислены к почвам, может существенно меняться. Это мнение достаточно спорное и довольно необоснованное. Оно свидетельствует о неполной доказательности почв: их генезиса, эволюции и деградации.

Таким образом, можно дать следующее определение почвы: «Почвы – царство естественных поверхностно-планетарных экзонов; естественные поверхностно-планетарные экзоны (нередко субэкзоны)..., образующиеся (или образовавшиеся) при непосредственном участии автотрофных организмов, обеспечивающих изменение не только интенсивности, но и направленности геохимических потоков элементов и веществ в конкретных условиях экзогенеза», точнее – биогеохимического круговорота веществ (**И.Я.**). На наш взгляд, это наукоподобное изречение. Почва – компонент экосистем. Это и нужно помнить.

Перейдем к рассмотрению почв некоторых географических зон с севера на юг.

**В суббореальном поясе** распространены молодые почвенные образования: *черноземы и каштановые почвы*. Южнее – полупустынные и пустынные – более древние, часто трансформированные. «Молодость» черноземов в некоторых ландшафтах подтверждается луговой стадией



эволюции. Более древние аналоги диагностированы на Урале, в Центральном Казахстане и других районах. Общей генетической чертой почв этого пояса является *гуматный тип гумуса и слабое выветривание почвенных минералов*, насыщенность щелочноземельными основаниями, а также мощный почвенный профиль – от 1,5 до 4 м. Соленакпление наблюдается лишь в южных ландшафтах этого пояса. Выветривание протекает в *слабощелочной среде*, в условиях активной аэрации и слабой дренированности.

Дифференциация почвенного профиля черноземов слабая и заметно возрастает при развитии солонцеватости. Почвы группируются по трем фациям:

1) субконтинентального климата (черноземы мицеллярно-карбонатные и конкреционно-карбонатные, а также каштановые),

2) континентального климата (черноземы и каштановые большей частью солонцеватые с аккумуляцией  $\text{CaSO}_4$  и бурые полупустынные),

3) крайне континентального климата (черноземы промерзающие и маломощные, а также каштановые и бурые полупустынные мучнисто-карбонатные).

Каштановые почвы континентальной фации отличаются укороченным профилем и заметной щебнистостью. В *бурых полупустынных почвах* количество гумуса небольшое (1..2%), гумусообразование заторможенное вследствие низкой биомассы растений и соленакпления.

В России и за рубежом черноземы являются лучшими почвами в агроландшафтах. Известно высказывание по этому поводу В.В. Докучаева: «Чернозем – царь почв». В то же время развитие черноземов без притока свежих растительных остатков (а, значит, и ВОВ) приводит к их постепенной деградации и снижению эффективного плодородия. Ранее нами были рассмотрены экологические риски в черноземах, связанные с пожарами и засоленными породами. Нужны посевы многолетних трав, использование сидератов и минимальная обработка почв.

**В субтропическом поясе** Ливии, в частности, в Средиземноморье распространены самые разнообразные почвы. Их удобно классифицировать в пределах двух подзон: *сухих и влажных субтропиков*. Первые характерны для средиземноморской зоны Евразии, вторые типичны для *западной Грузии – ландшафты Батуми*.

**В зоне сухих субтропиков** наиболее широко представлены *коричневые и серо-коричневые почвы, красные и красновато-бурые аридные* и др. Интенсивность почвообразования, состав и свойства почв средиземноморских ландшафтов рассмотрим на примере коричневых почв Ливии (И.М. Яшин, Л.Л. Шишов и др., 1986). Они были изучены нами в Триполитании на плато Джебель аль-Нефуса (абс. отметки 350...725 м и более над у.м.) и в Киренаике (Бенгазийская территория) – к западу от Египта – на плато Джебель аль-Ахдар (абс. отметки 400...800 м над у.м.).

Рассмотрим их диагностику и генезис.

**Коричневые сиаллитные почвы Ливии** формируются в условиях переменного влажного субтропического климата средиземноморского или муссонного типа при периодически промывном водном режиме. По температурным параметрам почвы относятся к теплым сезонно-охлаждаемым. Преобладающий тип растительности на целинных участках – разреженные (мало сохранившиеся) жестколистными вечнозелеными лесами из финиковой пальмы *Phoenix dactylifera*, каменного и пробкового дуба *Quercus ilex* *Q. suber*, дикой маслины *Olea oleaster* и кустарников: ююбы *Ziziphus jujube* mill., диких фисташек *Pistacia atlantica*, вереска *Erica arborea* и др.

*Под пологом низкорослых ксерофитных лесов типа маквиса и шибляка* в той или иной мере развит злаковый травянистый покров. На освоенных массивах коричневых почв произрастает травянисто-пастбищная растительность с участием полыней, а на пахотных – возделываются ценные плодовые культуры – *цитрусовые, персик, виноград, маслина*.

*Почвообразующие породы* представлены, как правило, четвертичными континентальными рыхло осадочными отложениями, подстилаемыми преимущественно юрскими и верхнемеловыми известняками. *Рыхло осадочные почвообразующие породы - плейстоценовые, в основном пролювиальные образования; голоценовые – аллювиально-пролювиальные, а современные – делювиальные, аллювиально-пролювиальные и эоловые отложения.* Для таких пород характерны значительная карбонатность (опесчаненность и скелетность в **Триполитании**, оглиненность в **Киренаике**), выветренность, хорошая дренированность и нередко эоловая переработанность отложений.

Для рельефа средиземноморской части Ливии свойственно сочетание двух основных геоморфологических форм – приморских равнин и нагорий. Особенность геоморфологии территории определяют (наряду с другими факторами почвообразования) вертикальную зональность почв, инверсию почвенных зон и сложную мозаику структур почвенного покрова.

Коричневые сиаллитные почвы в субтропических ландшафтах Ливии встречаются в виде обширных однородных массивов, но чаще в ассоциации с зональными *красновато-бурыми аридными, коричневыми литосолями, феррисиаллитными и другими почвами*, при этом образуются сложные сочетания элементарных почвенных структур.

В современный период развитие *субтропических коричневых почв* определяется совокупностью почвенных процессов, так называемым коричневоземообразованием. Для процесса коричневоземообразования Ливии характерны: образование, аккумуляция, частичная минерализация и полимеризация гумуса – следствие послеледникового процесса остепнения субтропиков; обескарбонирование поверхностной толщи почвы и формирование типичного иллювиально-карбонатного или даже конкреционно-корового горизонта; некоторая **рубификация** верхних почвенных горизонтов; метаморфическое оглинение (сиаллитизация)

средней уплотненной и обескарбоначенной части профиля с утяжелением механического состава и красноватым оттенком; отсутствие в профиле легкорастворимых солей и часто признаков солонцеватости.

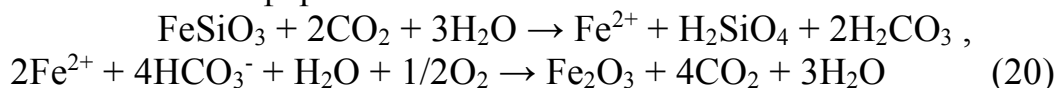
Перечисленные процессы почвообразования протекают в условиях *средиземноморского типа климата* при наличии двух контрастных гидротермических периодов: сухого и жаркого (*ксеротермического*) с мая по октябрь; умеренно влажного и теплого (*мезотермического*) с ноября по апрель. С последним связан активный биохимический этап коричневоземообразования, который затормаживается в ксеротермическую фазу и характеризуется иной направленностью – циркуляцией в почве солей и других соединений. Во влажный и относительно теплый зимний период из почвы полностью выщелачиваются легкорастворимые соли, карбонаты щелочноземельных оснований на глубину 30...50 см и более, образуя горизонт с новообразованиями в виде карбонатной плесени и псевдомицелия.

Наличие травянистого покрова в значительной мере определяет специфику коричневоземообразования. Естественный растительный покров на коричневых почвах *Ливии в последние годы существенно изменился* и трансформировался в процессе длительного антропогенного, биоклиматического (*опустынивание*) и эрозионного воздействий за последние столетия. В травянистых ценозах сухих субтропиков биологический круговорот характеризуется интенсивностью и большой емкостью (жизненный цикл трав 1...3 года). Растительный опад имеет высокую зольность (3...13%) и *повышенное содержание кальция и общего азота*. В составе фитомассы трав на долю корней приходится **45...85%** (до 97% к общей массе). Сильная разветвленность корневых систем обуславливает активизацию микрофлоры, биохимических процессов в большом объеме почвы и, в частности, гумусообразование с последующим закреплением органических продуктов *in situ* в почве, насыщенной основаниями.

*На темп и направленность гумификации растительных остатков* в коричневых почвах большое влияние оказывают также особенности климата, состав и свойства субстрата, непродолжительное и периодическое увлажнение почвы, ее высокая среднегодовая температура, повышенное содержание в почве общего азота, щелочноземельных катионов, обменного калия и илистых частиц. Чередование оптимальных условий увлажнения с резким недостатком влаги и сильным прогреванием почвы летом приводит к смене активной жизнедеятельности микроорганизмов ее депрессией. Такая природная обстановка также предохраняет гумусовые вещества от быстрого абиотического и биологического разложения. В жаркие сухие периоды гумусовые компоненты почвы полимеризуются и дегидратируются, приобретая еще большую устойчивость и слабую миграционную способность.

Поверхностное иссушение почвы обуславливает подтягивание пленочной влаги за счет градиента температур и частичный возврат в верхние горизонты карбонатов и растворенных веществ (прежде всего солей) из более глубоких слоев.

Определенную роль в генезисе **коричневых сиаллитных почв играет трансформация соединений железа**. Во влажный сезон года потеря карбонатов связана с активизацией химических процессов гидратации и гидролиза железосодержащих минералов, с участием органических лигандов, при этом высвобождается значительное количество слабо окристаллизованных форм железа:



В указанной реакции участие принимают неактивные молекулы угольной кислоты. В реальных условиях взаимодействуют органические кислоты.

В ксеротермическую фазу иссушения почвы гидроксиды и новообразованные органно-минеральные соединения дегидратируются, окисляются и в разной степени кристаллизуются, необратимо пептизируются, придавая почве своеобразную окраску. Эти физико-химические явления и составляют сущность процесса **рубefикации**. *Рубefикация*, следовательно, наступает после обескарбоначивания слоев почвы. Процесс рубefикации железа в коричневых почвах происходит лишь частично.

Для коричневых сиаллитных почв характерно активное внутрпочвенное выветривание – *оглинивание, сиаллитизация* – первичных и образование вторичных минералов. Новообразованные минералы представлены гидрослюдами, каолинитом, смектитом, иллитом. **Оглиненные иллювиальные горизонты называются текстурными, или метаморфическими**, и обозначаются **V<sub>t</sub>**. Оглинивание – биохимический процесс, сопровождающийся высвобождением различных соединений железа в иллювиальных слоях, в изучаемых почвах оно сопряжено с **рубefикацией**.

Для коричневых сиаллитных почв Ливии характерны следующие генетические признаки и свойства: глубокое внутрпрофильное проникновение почвообразовательных процессов и весьма значительная мощность почвенной толщи (1,5..2,5 м), уменьшающаяся на пологих склонах (0,8...1,3 м); слабая и средняя гумусированность (0,3...2,8%), заметно уменьшающаяся у почв легкого гранулометрического состава; оглиненность всего профиля; коричневая окраска всего профиля, обусловленная перераспределением форм железа; наличие выраженного иллювиально-карбонатного горизонта, что свидетельствует о протекании процессов выщелачивания и превращений мобильных форм химических соединений; нейтральная или слабощелочная реакция среды; насыщенность

основаниями; высокое природное плодородие при их бедности фосфатами (0,1...0,9 мг на 100 г доступного фосфора), табл. 10.

Табл. 10. Физико-химические свойства коричневых сиаллитных почв Ливии (И.М. Яшин, 1980)

| Горизонт,<br>глубина взятия<br>образцов, см   | Гу-<br>мус,<br>% | pH <sub>вод</sub> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Доступные формы |      | СО <sub>2</sub><br>карбо-<br>натов,<br>% |
|---|------------------|-------------------|------------------|------------------|-----------------|------|--|
|   |                  |                   | мг·экв/100 г     | мг/100 г         | Р               | К    |  |
|   |                  |                   |                  |                  | мг/100 г        |      |  |
| <b>Киренаика. Профиль 11434. Коричневая сиаллитная типичная карбонатная глинистая</b> |                  |                   |                  |                  |                 |      |  |
| А <sub>р</sub> Ca 0...18  | 1,6              | 8,0               | 22,2             | 2,6              | 0,2             | 37,7 | 12,6                                     |
| В <sub>1</sub> Ca 25...35   | 1,3              | 8,1               | 23,6             | 3,0              | 0,2             | 21,2 | 14,2                                     |
| В <sub>2</sub> Ca 45...55   | 0,9              | 8,3               | 23,0             | 3,7              | 0,3             | 18,8 | 14,9                                     |
| В <sub>3</sub> Ca 70...80   | 0,3              | 8,6               | 21,9             | 3,8              | 0,1             | 11,8 | 19,1                                     |
| ВС <sub>Ca</sub> 110...120  | 0,3              | 8,4               | 12,9             | 3,7              | 0,0             | 11,8 | 24,8                                     |
| С <sub>Ca</sub> 150...160   | Нет              | 8,2               | 1,5              | 2,8              | Нет             | 11,8 | 25,6                                     |
| 200...210   | -«-              | 8,2               | 9,2              | 2,8              | -«-             | 9,4  | 26,8                                     |
| RCa 210...220   | -«-              | 8,3               | 3,5              | 1,0              | -«-             | 9,4  | 39,4                                     |
| <b>Кинарейка. Профиль 18739. Коричневая сиаллитная слитая карбонатная глинистая</b>   |                  |                   |                  |                  |                 |      |  |
| А <sub>р</sub> Ca 0...19  | 2,4              | 8,2               | 25,1             | 2,5              | 0,5             | 61,0 | 13,5                                     |
| А <sub>1</sub> Ca 19...35   | 2,0              | 8,4               | 25,1             | 2,2              | 0,1             | 42,0 | 13,7                                     |
| В <sub>1</sub> Ca 50...60   | 1,4              | 8,5               | 22,0             | 3,1              | 0,1             | 25,0 | 16,9                                     |
| В <sub>2</sub> Ca 70...80   | 0,5              | 8,7               | 18,9             | 4,3              | 0,1             | 18,0 | 27,5                                     |

|   |     |     |      |     |     |      |      |
|---|-----|-----|------|-----|-----|------|------|
| В <sub>3</sub> Ca 110...120   | 0,4 | 8,7 | 14,3 | 3,4 | 0,1 | 16,0 | 25,9 |
| ВС <sub>Ca</sub> 140...150  | 0,2 | 8,7 | 12,4 | 1,9 | 0,1 | 15,0 | 23,1 |
| С <sub>Ca</sub> 225...235   | Нет | 8,7 | 12,4 | 4,0 | Нет | 15,0 | 26,4 |
| RCa 235...245   | -«- | 8,5 | 2,8  | 0,6 | -«- | 7,5  | 38,2 |
| <b>Триполитания. Профиль 12949. Коричневая сиаллитная типичная карбонатная супесчаная</b> |     |     |      |     |     |      |      |
| А <sub>р</sub> Ca 0...16  | 0,4 | 8,3 | 7,2  | 1,3 | 0,9 | 18,6 | 4,7  |
| В <sub>1</sub> Ca 18...28   | 0,4 | 8,3 | 8,3  | 1,6 | 0,2 | 11,2 | 5,7  |
| В <sub>2</sub> Ca 70...80   | 0,3 | 8,2 | 7,7  | 1,6 | Нет | 4,6  | 9,7  |
| В <sub>3</sub> Ca 110...120   | 0,2 | 8,2 | 6,4  | 2,6 | -«- | 3,2  | 8,0  |
| С <sub>Ca</sub> 290...300   | Нет | 8,3 | 3,8  | 3,2 | -«- | 6,0  | 5,6  |
| <b>Триполитания. Профиль 30615. Коричневая сиаллитная типичная выщелоченная почва</b>     |     |     |      |     |     |      |      |
| А <sub>р</sub> Ca 0...15  | 0,1 | 7,8 | 3,3  | 0,3 | 0,1 | 29,7 | Нет  |
| В <sub>1</sub> Ca 20...30   | 0,2 | 8,1 | 2,8  | 0,3 | 0,1 | 18,4 | -«-  |
| В <sub>2</sub> Ca 70...80   | 0,1 | 8,2 | 2,8  | 0,5 | Нет | 7,1  | -«-  |
| ВС <sub>Ca</sub> 110...120  | 0,1 | 8,3 | 3,3  | 0,4 | 0,1 | 21,2 | 0,9  |
| С <sub>1</sub> Ca 160...170   | Нет | 8,3 | 3,9  | 0,5 | 0,1 | 15,5 | 0,9  |
| ПС <sub>2</sub> Ca 230...240  | -«- | 8,4 | 3,7  | 0,6 | 0,1 | 9,9  | 9,9  |
| ПС <sub>3</sub> Ca 290...300  | -«- | 8,4 | 3,5  | 0,6 | 0,1 | 8,5  | 13,8 |

Благоприятные агрогенетические и физико-химические свойства коричневых почв позволяют выращивать на них однолетние зерновые (ячмень, пшеница), овощные (томат, перец, баклажан, огурец, капуста, салат, морковь, бобы, горох, лук, арбуз, дыня, кабачок, тыква) культуры. По количеству азота и гумуса, его гуминоподобному составу можно судить о более интенсивном закреплении продуктов гумификации в суглинистых разновидностях и подтипе слитых коричневых сиаллитных почв, чем в супесчаных аналогах (табл. 10).

В горизонте А<sub>1</sub> среднее содержание гумуса варьирует в пределах 1,1...5,8%, резко уменьшаясь в песчано-супесчаных почвах за счет более интенсивной минерализации растительного опада и гумуса почвы.

Наблюдается постепенное уменьшение количества гумуса по профилю почвы. Узкое отношение С:N (5...9) в гумусе указывает на его гуматность.

На этих почвах возделываются: арахис и плодовые культуры (персик, абрикос, миндаль, апельсин, лимон, мандарин, маслина, инжир, виноград). Возможности производства картофеля и моркови в пределах Киренаики ограничены из-за тяжелого механического состава почв. На суглинистых разновидностях рекомендуется возделывание таких плодовых культур, как абрикос, персик, инжир и виноград, а на почвах с более тяжелым механическим составом предпочтительно выращивать семечковые плодовые культуры.

**Цитрусовые культуры** требуют более дифференцированного учета агрофизических свойств почв: **апельсин и мандарин** лучше произрастают на супесях, а **лимон** предпочитает песчаные почвы. Особенно чувствителен к нарушению водного баланса, возникающему при суховеях, апельсин. К почвенной засухе наиболее устойчив мандарин, **лимон занимает промежуточное** положение. Для уменьшения неблагоприятного действия горячих и сухих ветров «гибли» и дефляции почвы цитрусовые сады следует защищать лесополосами.

В условиях орошаемого земледелия необходимо учитывать механический состав и мощность мелкоземистого слоя коричневых почв, характер подстилающих пород. На легких почвах с мощным и глубоко развитым профилем в связи с их слабой влагоемкостью поливные нормы устанавливаются из расчета увлажнения 0...100 см слоя и поддержания нижнего предела влажности на уровне 70% от наименьшей влагоемкости. Нормы полива, как показали опыты, на песчаных разновидностях должны составлять 300...350 м<sup>3</sup>/га, супесчаных и легкосуглинистых – 600...800, почвах со слабо развитым профилем – до 200 м<sup>3</sup>/га.

В условиях низкогорного рельефа, где земледелие развивается очагами, закладка виноградников и персиковых садов должна сопровождаться террасированием склонов и залужением междурядий.

Для **красновато-бурых аридных почв**, приуроченных к равнине Джеффара (8...80 м над уровнем моря), характерны красновато-желтая окраска генетических горизонтов, слабая гумусированность, бесструктурность или непрочная комковатая структура верхних горизонтов, преимущественно легкий гранулометрический состав, наличие в профиле карбонатных новообразований в форме псевдомицелия, прожилок, конкреций, постепенный переход генетических горизонтов, остаточная слоистость.

Согласно разработанной нами классификации почв Ливии в зависимости от степени дифференциации профиля на генетические горизонты и наличия карбонатных коровых образований выделен ряд подтипов красновато-бурых аридных почв: дифференцированный, дифференцированный коровый, слабо дифференцированный коровый и карбонатный недифференцированный, недифференцированный коровый (Л.Л. Шишов, 1980).



Табл. 11. Некоторые химические свойства красновато-бурых аридных почв Ливии (И.М. Яшин, 1980).

| Глубина<br>взятия<br>образца,<br>см  | pH <sub>вод</sub> | CO <sub>2</sub><br>карбо-<br>натов,<br>% | Уд.<br>электро-<br>про-вод-<br>ность,<br>ммос/ см* | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup><br>гипса,<br>% | Гу-<br>мус,<br>% | N (лег-<br>когид-<br>роли-<br>зуемый) | Доступные<br>формы |      |
|--|-------------------|--|--|--|------------------|---------------------------------------|--------------------|------|
|  |                   |  |  |  |                  |                                       | P                  | K    |
|  |                   |  |  |  |                  |                                       | мг/100 г           |      |
| 1  | 2                 | 3  | 4  | 5  | 6                | 7                                     | 8                  | 9    |
| <b>Красновато-бурая аридная почва:</b>   |                   |  |  |  |                  |                                       |                    |      |
| дифференцированная карбонатная супесчаная (профиль 1304-4)                             |                   |  |  |  |                  |                                       |                    |      |
| 0...24   | 8,3               | 2,62                                     | 0,10   | 0,20   | 0,71             | 8,06                                  | 0,99               | 22,4 |
| 30...40  | 8,1               | 3,72                                     | 0,17   | 0,11   | 0,45             | 7,00                                  | 0,67               | 24,5 |
| 70...80  | 8,4               | 2,70                                     | 0,10   | 0,16   | 0,15             | 7,50                                  | 0,22               | 28,4 |
| 110...120  | 8,5               | 1,86                                     | 0,11   | 0,15   | 0,11             | 6,69                                  | 0,14               | 12,1 |
| дифференцированная слабообразованная карбонатная песчаная (профиль 21949-1)            |                   |  |  |  |                  |                                       |                    |      |
| 0...21   | 8,0               | 1,29                                     | 0,11   | 0,14   | 0,50             | 2,44                                  | 0,26               | 36,3 |
| слабодифференцированная карбонатная песчаная (профиль 2437-1)                          |                   |  |  |  |                  |                                       |                    |      |
| 0...20   | 8,5               | 5,06                                     | 0,08   | 0,18   | 0,16             | Сл.                                   | Нет                | 8,5  |
| 30...40  | 8,4               | 4,14                                     | 0,14   | 0,25   | 0,18             | То же                                 | То же              | 12,1 |
| 70...80  | 8,4               | 18,22                                    | 0,08   | 0,20   | 0,07             | -«-                                   | -«-                | 7,3  |
| 110...120  | 8,5               | 4,93                                     | 0,10   | 0,14   | 0,07             | -«-                                   | -«-                | 4,8  |
| слабодифференцированная карбонатная супесчаная (профиль 1005-1)                        |                   |  |  |  |                  |                                       |                    |      |
| 0...25   | 8,1               | 1,86                                     | 0,16   | 0,14   | 0,47             | 9,50                                  | 0,30               | 26,7 |
| 30...40  | 8,4               | 1,46                                     | 0,09   | 0,84   | 0,31             | 9,19                                  | 0,14               | 22,5 |
| 70...80  | 8,5               | 3,72                                     | 0,12   | 0,10   | 0,17             | 8,37                                  | 0,30               | 26,4 |
| 110...120  | 8,3               | 0,93                                     | 0,14   | 0,21   | 0,14             | 4,12                                  | 0,14               | 26,1 |
| слабодифференцированная глубокообразованная карбонатная песчаная (профиль 712-1)       |                   |  |  |  |                  |                                       |                    |      |
| 0...12   | 8,1               | 1,86                                     | 0,11   | 1,03   | 0,43             | 7,31                                  | 1,09               | 22,1 |
| 30...40  | 8,3               | 3,66                                     | 0,08   | 0,73   | 0,36             | 8,69                                  | 0,54               | 10,4 |
| 70...80  | 8,8               | 1,50                                     | 0,09   | 0,81   | 0,22             | 1,62                                  | 0,07               | 4,9  |
| слабодифференцированная среднеразвитая карбонатная супесчаная (профиль 710-1)          |                   |  |  |  |                  |                                       |                    |      |
| 0...19   | 8,4               | 2,06                                     | 0,09   | 0,06   | 0,44             | 0,94                                  | 1,09               | 20,3 |
| 30...40  | 8,4               | 1,83                                     | 0,16   | 0,07   | 0,27             | 1,50                                  | 0,26               | 14,6 |
| 50...60  | 8,7               | 4,51                                     | 0,21   | 0,16   | 0,18             | 1,19                                  | Нет                | 10,5 |
| слабодифференцированная слабообразованная карбонатная песчаная (профиль 721-1)         |                   |  |  |  |                  |                                       |                    |      |
| 0...14   | 8,5               | 1,49                                     | 0,10   | 0,33   | 0,24             | 3,31                                  | 0,04               | 20,6 |
| 20...30  | 8,5               | 8,46                                     | 0,19   | 0,35   | 0,20             | 1,19                                  | Нет                | 8,8  |
| слабодифференцированная карбонатная гипсоносная засоленная супесчаная (профиль 1014-3) |                   |  |  |  |                  |                                       |                    |      |
| 0...19   | 8,3               | 1,58                                     | 0,31   | 0,18   | 0,47             | 3,75                                  | 0,11               | 24,3 |
| 25...35  | 8,0               | 4,41                                     | 0,89   | 0,72   | 0,45             | Нет                                   | 0,04               | 36,4 |
| 70...80  | 8,2               | 7,61                                     | 2,28   | 19,69  | 0,32             | 2,62                                  | нет                | 38,9 |
| 110...120  | 8,2               | 4,31                                     | 1,00   | 0,73   | 0,28             | 1,87                                  | то же              | 24,6 |
| 150...160  | 8,2               | 24,06                                    | 1,50   | 0,83   | 0,18             | 1,37                                  | -«-                | 24,1 |
| слабодифференцированная карбонатная засоленная супесчаная (профиль 1015-3)             |                   |  |  |  |                  |                                       |                    |      |
| 0...20   | 7,8               | 1,22                                     | 1,20   | 1,92   | 0,40             | 4,12                                  | 0,73               | 26,5 |
| 30...40  | 8,0               | 1,65                                     | 0,38   | 0,74   | 0,34             | 4,50                                  | 0,30               | 28,8 |
| 70...80  | 8,2               | 1,94                                     | 0,29   | 1,15   | 0,12             | 3,00                                  | 0,14               | 30,7 |
| 110...120  | 8,2               | 2,29                                     | 0,19   | 0,58   | 0,18             | 2,50                                  | нет                | 36,4 |
| 160...170  | 8,2               | 3,56                                     | 0,27   | 0,56   | 0,13             | нет                                   | то же              | 32,1 |

\* Параметр – Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>.

Степень выраженности почвообразовательных процессов, а также дифференциация профиля на горизонты у красновато-бурых аридных почв становятся менее четкими при переходе от дифференцированных к недифференцированным почвам. **Подтипы коровых почв** отличаются меньшей мощностью профиля (30...120 см), наличием горизонта коры **CR<sub>Ca</sub>**,

отсутствием горизонта почвообразующей породы  $C_{Ca}$ , а иногда и переходных (иллювиальных) горизонтов  $B_{2Ca}$  и  $B_{3Ca}$ . По мощности мелкоземистого слоя над коровым горизонтом выделены разряды почв (табл. 11) со слабо развитым профилем (мощность мелкоземистого слоя 30...50 см), среднеразвитым (50...80 см), глубоко развитым (80...120 см) и мощным профилем (более 120 см).

**Особенностью почвенного покрова Триполитании**, в частности низменности Джеффара, простирающейся к югу от г. Триполи до эскарпа плато Джебель аль-Нефуса, является его сложный (комплексный), динамичный и *полигенетический характер*, обусловленный спецификой рельефа и рельефообразующих факторов, орографической неоднородностью территории, пестротой залегания почвообразующих пород, а также эрозией (эоловыми процессами и периодическим делювиальным смывом). В пространственной организации почв важная роль принадлежит соподчиненной взаимосвязи и перераспределению рыхлых четвертичных отложений на водоразделах – склонах – понижениях. Например, **красновато-бурые аридные почвы**, залегающие по понижениям и развитые на эоловых песчано-супесчаных наносах (со слабо или недифференцированным профилем), отличаются значительной мощностью, рыхлым сложением, высокой фильтрацией, повышенной порозностью аэрации, низкой влагоемкостью невысокими запасами продуктивной влаги, отсутствием аккумуляций солей, небольшой интенсивностью биологического круговорота веществ. **На водоразделах** (точнее – плакорах), как правило, формируются менее мощные дифференцированные красновато-бурые аридные почвы, в той или иной мере эродированные. Указанные генетические особенности красновато-бурых аридных почв четко прослеживаются как в пределах основных геоморфологических структур Джеффары (*приморской, останцовой равнины и пролювиально-делювиального подгорного шлейфа Джебель аль-Нефуса*), так и на южном макросклоне нагорья Джебель аль-Нефуса.

Современные особенности развития **красновато-бурых аридных почв Триполитании** сопряжены с сиаллитным типом почвообразования, ослаблением процесса остепнения и, как следствие, затухания гумусообразования: *активизацией опустынивания* (усиление накопления солей в почвах и грунтах, понижение уровня грунтовых вод, педогенное корообразование, интенсификация эрозии), красноцветностью почвенного мелкозема, отсутствием солонцеватости. В пространственно-временном аспекте **при картографировании** были выделены автономные ареалы красновато-бурых аридных почв, но чаще на объекте изысканий распространено ассоциативное взаимодействие групп почв, образующих на отдельных элементах рельефа своеобразные структурные организации. Так, в пределах приморской равнины, в нижних частях склонов выположенных

Табл. 12. Химический состав водной вытяжки красновато-бурых аридных почв и грунтовых вод (И.М. Яшин, 1980).

| Глубина<br>взятия<br>образца, см  | Концентрация ионов, ммоль/л      |                               |                 |                 |                               |                  |                 |
|---|----------------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|------------------|-----------------|
|   | Сумма с<br>учетом K <sup>+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Na <sup>+</sup> |
| Дифференцированная карбонатная супесчаная (профиль 1304-4)                                |                                  |                               |                 |                 |                               |                  |                 |
| 0...24  | 11,0                             | 4,4                           | 1,1             | 1,0             | 2,0                           | 0,8              | 0,9             |
| 30...40   | 11,5                             | 3,8                           | 1,1             | 1,6             | 2,0                           | 0,8              | 0,9             |
| 70...80   | 10,5                             | 4,1                           | 1,7             | 0,8             | 1,5                           | 1,2              | 0,9             |
| 110...120   | 9,3                              | 3,8                           | 0,8             | 0,6             | 1,2                           | 0,4              | 2,2             |
| Слабодифференцированная карбонатная гипсоносная<br>засоленная супесчаная (профиль 1014-3) |                                  |                               |                 |                 |                               |                  |                 |
| 0...19  | 23,0                             | 3,6                           | 3,1             | 8,8             | 4,0                           | 0,8              | 0,9             |
| 25...35   | 71,9                             | 2,0                           | 7,9             | 26,8            | 23,9                          | 3,2              | 3,5             |
| 70...80   | 225,5                            | 2,0                           | 24,0            | 87,8            | 73,1                          | 10,3             | 25,7            |
| 110...120   | 87,6                             | 2,6                           | 28,2            | 15,2            | 14,0                          | 4,1              | 21,7            |
| 150...160   | 129,1                            | 3,3                           | 55,0            | 10,6            | 10,0                          | 9,5              | 38,1            |
| Слабодифференцированная карбонатная засоленная<br>супесчаная (профиль 1015-3)             |                                  |                               |                 |                 |                               |                  |                 |
| 0...20  | 119,1                            | 2,5                           | 4,2             | 54,4            | 50,0                          | 3,7              | 1,7             |
| 30...40   | 27,4                             | 2,0                           | 2,0             | 10,1            | 8,5                           | 2,1              | 0,9             |
| 70...80   | 23,2                             | 3,3                           | 2,0             | 6,9             | 4,5                           | 3,2              | 1,3             |
| 110...120   | 21,3                             | 2,6                           | 2,3             | 4,3             | 2,7                           | 2,4              | 0,9             |
| 160...170   | 22,7                             | 3,4                           | 3,1             | 3,8             | 3,0                           | 2,4              | 0,9             |
| <b>Приморская равнина, Мисурата, к востоку от г. Хомса</b>                                |                                  |                               |                 |                 |                               |                  |                 |
| Грунтовые<br>воды – глубина<br>залегания <b>20 м</b>                                      | 997,7                            | 50,0                          | <b>445,4</b>    | 40,6            | 40,1                          | 63,8             | <b>357,8</b>    |
| <b>Плато Джебель аль-Нефуса, зона эскарпа и водоразделы</b>                               |                                  |                               |                 |                 |                               |                  |                 |
| Подземные воды<br>– глубина<br>залегания<br>150...200 м                                   | 367,8                            | 52,5                          | <b>10,4</b>     | 36,5            | 34,9                          | 41,1             | <b>87,0</b>     |

**Примечание.** Щелочность от CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> в анализируемых образцах не обнаружена (за исключением подземных вод на плато Джебель аль-Нефуса); концентрация водорастворимого калия в почвах варьирования от 0,3 до 6,1 ммоль/л.

холмов и увалов можно наблюдать комплексы и пятнистости красновато-бурых аридных эродированных, коровых, засоленных, загипсованных почв, а также кор и не почвенных образований. Подобные комбинации почв позволяют заключить, что **соленакопление** (как почвенно-геохимический процесс) в почвах и грунтах Джеффары обусловлено вековым по длительности и дискретным по проявлению *потоком водорастворимых солей от эскарпа к Средиземному морю*. Своеобразие процессов транспортировки, аккумуляции и трансформации солевых масс во времени и пространственной организации почв в пределах Джеффары и определяет мозаику формирования засоленных почв и педогенных кор. Существенное количество солей может поступать в почву и грунтовые воды путем **импульверизации** вблизи морского бассейна, массивов солончаков и засоленных почв с поверхностным характером накопления. Критерием выделения засоленных почв являлась удельная электрическая проводимость почвенной суспензии, **равная 0,30 ммс/см**, при соотношении массы почвы и воды 1:5.

**Большинство плантаций маслины и citrusовых** расположено на незасоленных почвах. Электропроводимость почвенной суспензии в зоне развития, например, корней маслины на красновато-бурых аридных почвах изменялась от 0,8 до 0,21 ммс/см, а на коричневых сиаалитных – 0,06 до 0,15 ммс/см. Наряду с незасоленными были выявлены и засоленные участки почв. Так, у красновато-бурых аридных аналогов электропроводимость почвенной суспензии варьировала от 0,341 до 1,20 ммс/см, максимум – 2,28 ммс/см свойствен гипсоносным горизонтам данного типа почв.

Солевая диагностика почв *средиземноморского бассейна Земли*, как и других аридных зон суши, весьма актуальна при агроэкологической оценке той или иной территории географического ландшафта. Путем солевой диагностики были установлены тип и степень засоления, качественный состав солей и характер их распределения по почвенному профилю (табл. 12).

**Засоленные почвы** плодоносящих плантаций маслины Триполитании можно подразделить на хлоридный, хлоридно-сульфатный и сульфатный кальциево-магниевый типы засоления. Выделены почвы, имеющие поверхностную (профиль 1015-3), среднюю (профиль 1014-3) и глубокую аккумуляцию водорастворимых солей. В составе солей доминируют *нетоксичные компоненты*.

В составе солей грунтовых вод приморской равнины Триполитании содержатся компоненты, типичные для морской воды: на долю ионов натрия и хлора, например, приходится соответственно 35,9 и 44,6% общей суммы ионов. Существенно повышена и доля токсичных ионов.

**Среди плодовых растений, возделываемых в Ливии**, маслина является одной из культур, устойчивых к засолению. Максимальным содержанием водорастворимых солей в суглинках для маслины принято считать **0,2...0,5%**. Результаты изучения архитектоники корневой системы и надземной части маслины, произрастающей на засоленных почвах легкого гранулометрического состава, свидетельствуют об устойчивости ее к более высоким уровням водорастворимых солей в зоне развития корней. Деревья плодоносят и не имеют видимых признаков угнетения кроны при содержании в корнеобитаемом слое более **1,0% солей** (профиль 1014-3). Однако в составе водорастворимых солей преобладал гипс, а содержание токсичных солей оказалось невысоким. На метровом срезе зафиксировано до 500 корней, но они были сосредоточены преимущественно в слоях почвы с наименьшим содержанием солей. По биометрическим показателям кроны существенных различий между деревьями, произрастающими на незасоленных и слабозасоленных почвах, не выявлено.

Исследуемые почвы относятся, как правило, к не загипсованным. Содержание  $SO_4^{2-}$  гипса варьирует по профилю красновато-бурых аридных почв в пределах 0,06...1,92%, а на некоторых плантациях – 4,21...5,35%. Выделены также участки, где содержание  $SO_4^{2-}$  гипса в отдельных

горизонтах составляет 19,89...20,05%. В последующие этапы эволюции почв путем химической трансформации соединений здесь образуется плотный гипсоносный слой (**коровый горизонт**), который практически непроницаем для корней. В то же время подобный сорбционно-водонепроницаемый экран способствует периодической аккумуляции почвенной влаги.

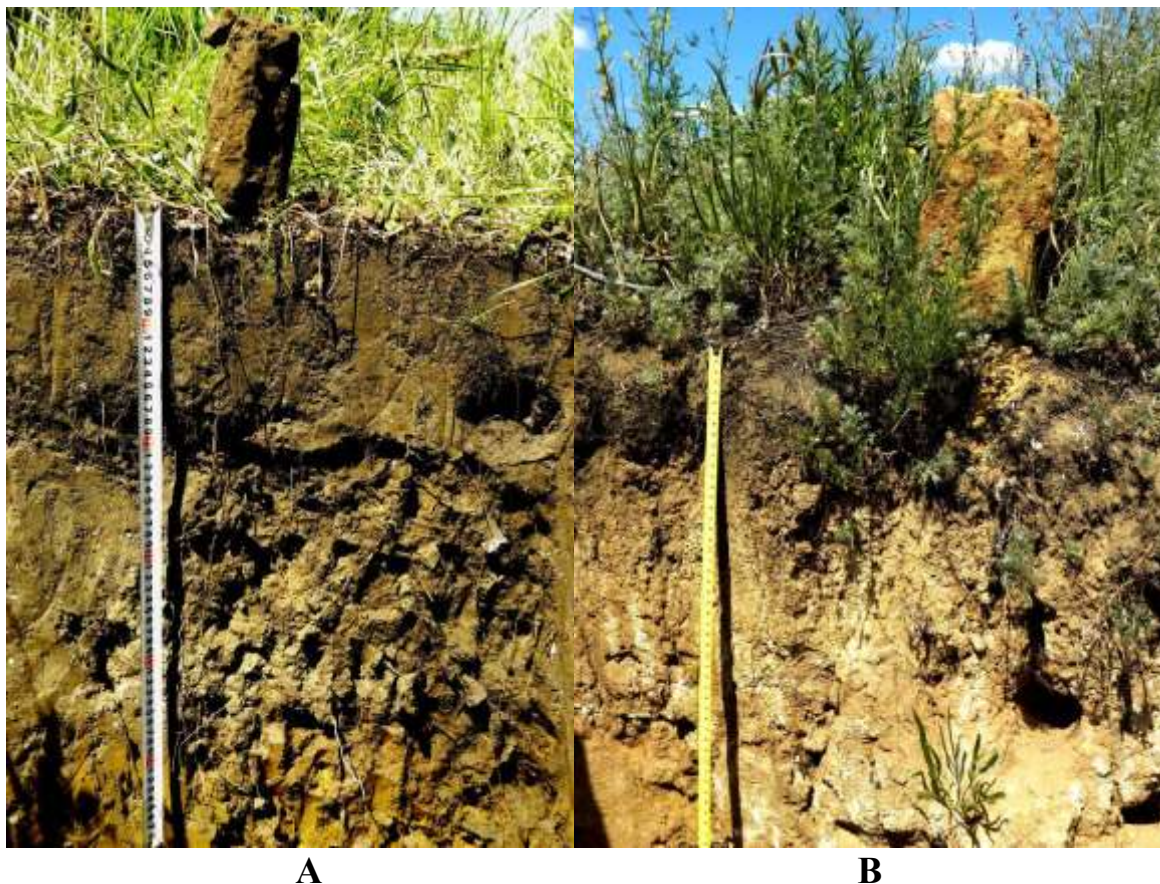


Рис. 39а. **А** – профиль **чернозема солонцеватого среднесуглинистого**; **В** – профиль **солонца автоморфного легкосуглинистого** на террасе реки **Б. Колышлей** с реликтовой типчаково-полынной сухостепной растительностью; для наглядности вверх фото показаны **крупно столбчатая структура солонцовых горизонтов, имеющих очень низкую водопроницаемость и слитость** (фото И.М. Яшина).

**При раскопках корневой системы маслины** выявлено слабое развитие корней в слое мелкозема, расположенном над гипсоносным горизонтом, где на метровом срезе отмечено 158 корней. Деревья плодоносили, но крона была слабо облиственной. Площадь поперечного сечения штамба составляла 183,9 см<sup>2</sup>, площадь проекции кроны – 4,5 м<sup>2</sup>, высота деревьев – 2,3 м. На некоторых участках корни проникали через уплотненный горизонт по ходам землероев или трещинам в нижние слои почвенного профиля. На метровом срезе развивалось до 433 корней. Деревья плодоносили, их надземная часть не имела видимых признаков угнетения, хотя листья были мелкие. Площадь поперечного сечения штамба составляла 344,9 см<sup>2</sup>, площадь проекции кроны – 7,1 м<sup>2</sup>, высота деревьев – 3,4 м.

При обследовании плантаций маслины выявлены участки, где деревья были сильно угнетены, что обусловлено наличием **коровых горизонтов**

или плотных **коровых прослоек** на различной глубине. На таких участках корневая система деревьев развивается лишь в надкоровой толще почвы, так как коровый горизонт имеет чрезвычайно высокую плотность, очень низкую порозность и практически непроницаем для корней. Результаты химических анализов показали, что плотность коры составляла 2,35...2,38 г/см<sup>3</sup>, общая порозность – 11,3...11,5%, наименьшая влагоемкость – 4,0...5,2% к объему почвы, аэрация – 6,1...7,5%. В то же время **коровый горизонт** в ландшафте выполняет экологическую и геохимическую функции: удерживает часть водорастворимых химических соединений (при их педогенной миграции), препятствуя выносу их из сферы выветривания и почвообразования в Средиземное море и вовлечено в эрозионные процессы залегающей под корой толщи мелкозема.

У **маслины на красновато-бурых аридных почвах** при залегании корового горизонта на глубине 120 см на метровом срезе зафиксировано до 316...326 корней. Деревья плодоносили, надземная часть не была угнетена. Площадь поперечного сечения штамба составляла 737...834 см<sup>2</sup>, площадь проекции кроны – 9,6...24,6 м<sup>2</sup>, высота деревьев – 3,8...6,0 м.

Необходимо подчеркнуть, что современная эколого-геохимическая характеристика ландшафтов Ливии позволяет рационально и эффективно подходить к решению и важнейших социально-экономических вопросов, которые связаны, в частности, с продовольственной проблемой.

Среди **экологических рисков** в почвах Ливии отметим следующие:

1. *Соленакопление* и щелочной гидролиз минералов (этот вопрос нами рассматривался ранее при оценке *деградации черноземов России*);
2. *Опустынивание* ландшафтов, способствующее активной и глубокой деградации почвенного покрова, растительности и ухудшению качества поверхностных вод в колодцах;
3. Формирование специфических почвенных новообразований в виде *кор* и *коровых горизонтов* карбонатно-кальциевого и кальциево-гипсового состава;
4. Рубефикация мелкозема;
5. Слитообразование иллювиальных почвенных горизонтов;
6. Активное загрязнение поверхностных вод;
7. Химическое загрязнение почв нефтепродуктами, а также продуктами горения нефти и взрывчатых веществ в период военных действий;
8. Осолонцевание красновато-бурых аридных почв;
9. Дефляция почвенного покрова – ветровая эрозия;
10. Импульверизация солей на приморские ландшафты и почвы.



## 7.8. Моделирование почвенно-экологических процессов

Почвенно-экологические процессы в экосистемах весьма сложные, и не всегда их удается изучить. Чаще всего исследуются какие-то звенья процессов. В этой связи на помощь экспериментаторам приходит моделирование. Методология моделирования – это отдельный вопрос. Здесь же отметим, что следует придерживаться некоторых важных принципов, о которых будет сказано ниже.

Опытные данные свидетельствуют, что полевые и лабораторные эксперименты в экологии и почвоведении эффективны лишь тогда, когда они задуманы и реализованы на основе научной теории (или концепции).

Процесс создания (построения) модели называется моделированием. Так, идеальное моделирование носит теоретический характер, а результаты имеют в основном познавательное значение. Стратегия моделирования состоит в попытке путем упрощения получить некую модель (образ оригинала), свойства и поведение которой можно эффективно исследовать различными приемами. Модель должна оставаться сходной с оригиналом, а результаты изысканий можно применить к оригиналу. Подчеркнем, что чашки Петри для этих опытов не пригодятся.

Недостатки метода математического моделирования связаны в основном с ограниченностью информационной базы при построении и интерпретации моделирования тех или иных процессов. При этом не всегда удается отличить ошибки измерений (осреднения) от ошибок, обусловленных модельными закономерностями. Если модель недостаточно адекватно описывает те или иные процессы в экосистеме, то она подлежит улучшению или замене. *Критерием адекватности служит натурный эксперимент.* Он и определяет, когда закончится процесс улучшения модели. По типу реализации модели могут быть реальными и знаковыми. Первые в малом масштабе отражают существенные черты оригинала. Например, аквариум отражает известные особенности водных экосистем, лизиметр с почвой и растительностью также является моделью некоторого почвенного индивидуума (педона) как подсистемы ландшафта.

В отличие от реальной, знаковая модель с помощью знаков (символов) позволяет условно описать экосистему – оригинал. Здесь выделяют *концептуальные и математические* модели. Концептуальная модель позволяет охарактеризовать природный процесс, явление (или всю экосистему) с помощью научных доказательств, сопровождаемых таблицами, графиками. Например, подобными моделями могут служить экологическая концепция биогенной кислотности таежной экосистемы и концепция таежного гумусообразования (И.М. Яшин, И.С. Кауричев, В.А. Черников, 1986,1996).

При изучении процессов динамики в почвах, фитоценозах, природных водах и экосистемах в целом весьма эффективны методы математического

моделирования. Необходимо отметить известную модель «хищник – жертва» А. Лотка и В. Вольтера. Модели могут быть *стохастическими (вероятностными) и детерминированными*. В последних значения переменных величин, обуславливающих состояние объекта, определяются однозначно (с точностью до ошибок определения). В стохастических – для каждой переменной даются распределения возможных значений. Используют показатели математического ожидания, среднее квадратическое отклонение и др.

Более подробно приемы математического моделирования излагаются в спецкурсе кафедры экологии «Системный анализ и моделирование».

### **Математическое моделирование процессов трансформации растительных остатков в почвах таежной зоны и формирование системы гумусовых веществ**

Математическое моделирование – интересное, но достаточно сложное для восприятия занятие. Оно требует известной профессиональной подготовки.

Вначале небольшое вступление. Имеющиеся сведения показывают, что компоненты экосистемы – почвы, биота, природные воды и воздух – это *чрезвычайно сложно само организованные системы*. Они состоят из огромного числа ионов, молекул, органоинеральных веществ с различными величинами молекулярных масс и разными свойствами. Благодаря постоянному взаимодействию огромного количества молекул с участием биоты и коллоидов, в экосистемах и почвах происходит *самоорганизация химических соединений*: из хаоса ионов и молекул постепенно формируются новые вещества, так называемые диссипативные структуры.

*Они отражают разные уровни организации веществ в ландшафтах: черноземы в степной зоне, где участились засухи, засоление почв и пожары; подзолистые почвы в ландшафтах тайги, где реализуется процесс биогенного кислотообразования для «добычи» битой элементов питания, а в составе гумуса преобладают агрессивные фульвокислоты.*

Со временем экосистемы самосовершенствуются, в них функционируют такие уникальные природные тела как почвы, которым присущи важные экологические функции (фациальные и глобальные), в частности, поддержание устойчивости Биосферы Земли, обеспечение безопасности живых организмов и качества жизни биоты с помощью биогеохимического круговорота веществ. В почвах агроландшафтов ситуация иная: биогеохимический круговорот нарушен, генетические горизонты оказываются ежегодно трансформированными при их обработках, в почву вносятся массы удобрений – *новых веществ – весьма химически активных*.

Изучение процессов, протекающих в экосистемах, не всегда доступно для точного эксперимента. Нередко исследуются не сами процессы, а их продукты. В этом случае эффективным становится совместное применение, в частности, методов экспериментального и математического

моделирования, а также использование современных физико-химических методов анализа: радиоактивных изотопов, метода сорбционных лизиметров (МСЛ) и хроматографии. Практике применения указанных методов при экспериментальном моделировании трансформации растительного опада в подзолистых почвах тайги и оценке математических моделей посвящен настоящий раздел учебного пособия.

Объектами исследований были стационарные площадки были расположены в Архангельской области - в Вилегодском и Няндомском районах, а также в Подмосковье – в смешанном лесу и на вырубке учхоза «Михайловское». В 1981-1993 и 1999-2005 гг. были изучены генетические свойства подзолистых почв, состав гумуса, водные потоки миграции ВОВ между подзолистой почвой и таежной биотой [3, 18].

Использованы три группы методов экологических исследований: первая – полевые – маршрутные исследования и закладка почвенно-экологических катен (включая лизиметрические опыты), вторая - лабораторные (в том числе и современные физико-химические: хроматографию, радиоактивные индикаторы) и третья – математическое моделирование [18, 19].

С помощью метода сорбционных лизиметров, в которых в качестве сорбента использовался низкозольный активированный уголь «карболен», органические иониты и оксид алюминия, изучен компонентный состав и масштаб миграции ВОВ в профилях изучаемых почв в годовом и сезонных циклах водной миграции. Для различных растительных остатков (хвоя ели, мхи и лишайники, кора древесных пород) был экспериментально установлен коэффициент мобилизации  $K_{\text{моб}}$  ВОВ<sup>7</sup>: их возможный (абсолютный) масштаб мобилизации из твёрдой фазы растительного опада (или лесной подстилки) в раствор [17]. При этом почва (одна подсистема) не просто связана с таежной биотой (другие подсистемы), а черпает из нее энергию и мобильные формы химических соединений, в частности, с помощью ВОВ, для саморазвития, самообновления и самоорганизации. Компоненты ВОВ помогают переносить по трофическим цепям и миграционным потокам (биогенном и абиотическом) *информацию в форме потока веществ и энергии на ионно-молекулярном уровне*. Поэтому изучение данной экологической проблемы является актуальным и важным этапом познания функционирования таёжных экосистем.

Отметим, что при моделировании трудности возникают в определении *адекватности разработанной модели* и приближении её к оригиналу. В наших опытах микромоделью генетического горизонта подзолистой почвы, в которой происходит трансформация растительного опада, служил *сорбционный лизиметр*. Он состоит из сорбционной колонки (жесткого пластмассового сосуда с верхней рабочей площадью  $S_{\text{раб}} = 66,7 \text{ см}^2$ ), заполненной перемежающимися слоями химически очищенного от железа

---

<sup>7</sup>  $K_{\text{моб}}$  отражает соотношение масс мигранта в жидкой и твердой фазах почвы, выраженных в одних единицах измерения, например, г/м<sup>2</sup>. Данный параметр позволяет в дальнейшем рассчитать вовлечение конкретного **иона металла** из твердой фазы (почвы, ОСВ, удобрения, CaCO<sub>3</sub>...) в раствор.

кварцевого песка и чистыми сорбентами. Измельченная масса растительных остатков (исходная радиоактивность субстрата составляла **277 тыс. имп/мин** на 10 мг их массы) вносилась между двумя капроновыми фильтрами диаметром 25 мм на мокрый слой кварцевого песка в верхней части колонки и экранируется мокрым песком [17]. Такие колонки с помощью двух вакуумных шлангов соединяется с приемником лизиметрических вод (полиэтиленовой бутылью объёмом 1-5л) и тщательно замуровывалась в тот или иной генетический горизонт. Колонки закладывали в 2-3-х кратной повторности. Аналитические определения проводили в такой же повторности. *Контролем служили* колонки только с чистыми сорбентами для учета масштаба водной миграции ВОВ и их состава как из лесной подстилки, так и из исследуемого горизонта почвы. Таким образом, трансформация растительных остатков в сорбционных колонках происходит в почве, в условиях реальной экосистемы, а эксперимент контролируется. Мобильные продукты почвообразования (и микроорганизмы) проникают в сорбционные колонки при промывном водном режиме и взаимодействуют с растительными остатками. Образуются новые химические соединения, которые сорбируются в динамическом режиме чистыми сорбентами. Указанная модель (сорбционный лизиметр с сорбентами, известными массой и биохимическим составом опада растений) как бы согласовывает реальный объект (почву и таежную экосистему) с задачей эксперимента. Такой методический подход *упрощает объект* и позволяет провести контролируемый стационарный опыт. В то же время он сохраняет то главное, что нас интересует – установить масштаб формирования компонентов ВОВ, а также их состав и свойства при превращении растительного опада в поверхностных горизонтах подзолистых почв таёжных экосистем.

На примере указанной выше авторской модели отрабатывалась также *технология оценки безопасности* продуктов трансформации различных удобрений, химических мелиорантов (фосфоритной муки, фосфогипса,  $\text{CaCO}_3$ ), которые собираются вносить в почвы агроландшафтов. Важно знать, во-первых, с какой скоростью будет проходить превращение продуктов антропогенеза и, во-вторых, *какие экотоксиканты и в каком количестве мобилизуются из твердой фазы в почвенный раствор из обычных и нетрадиционных удобрений*. Подобные полевые стационарные опыты должны стать нормой и обязательно входить в *экологическую экспертизу объекта*.

Подчеркнем, на идее моделирования базируется любой метод изучения природных экосистем как теоретический, так и экспериментальный. Модель не только должна быть функционально схожей с оригиналом, *но и результаты опытов можно применить к оригиналу* [7, 10]. Например, лабораторные опыты, проводимые нередко в чашках Петри с фильтровальной бумагой, по выявлению воздействия *ионов тяжёлых*

*металлов* на проростки растений нельзя применить к реальным почвам и экосистемам. Такие опыты удобны только для учебных целей. Но лучше и учебные экологические опыты ставить методологически правильно.

Оценке нативного функционирования природных экосистем и почв пока ещё уделяется недостаточно внимания, поскольку такие эксперименты *трудоёмкие и дорогостоящие*. В этой связи считаем целесообразным охарактеризовать основные этапы экспериментального моделирования как важного подготовительного этапа перед построением математических моделей:

1-й этап - сбор первичной информации об объектах: работа в библиотеках, изучение на стационарах генезиса подзолистых почв, состояния экосистем, фракционно-группового состава гумусовых веществ, уточнение масштаба миграции ВОВ, Fe-органических комплексных и иных соединений [17].

2-й этап - постановка цели и задач исследования: разработка и проверка рабочей гипотезы, в частности, о *биогенной кислотности таёжных экосистем*. Уместно отметить, что часто кислотность рассматривается *только на уровне одной подсистемы – почвы*. При таком методологическом подходе неполно учитываются экологические связи подзолистой почвы с таёжной биотой. На самом деле с помощью процесса *биогенного кислотообразования* (и ВОВ с кислотными свойствами) группы живых организмов экосистем тайги осуществляют эффективную мобилизацию элементов питания из твердой фазы почв в раствор. Низкомолекулярные органические кислоты устойчиво продуцируются не только таёжной растительностью, но и *микроскопическими плесневыми грибами*, а также выщелачиваются атмосферными осадками из опада, лесных подстилок и вегетативных органов растений, накапливаясь и трансформируясь в новые соединения. С помощью органических кислот биота таёжных экосистем быстро адаптируется и успешно *противостоит элювиальным условиям, оглеению, длительному охлаждению почвы, дефициту азота, фосфора и кальция*. В такой экстремальной эколого-геохимической обстановке и протекает *таёжное почвообразование*, формируются подзолистые, болотно-подзолистые почвы и подзолы как продукты функционирования реальных экосистем [5, 11].

3-й этап - обоснование основных допущений при моделировании. Иначе говоря, обоснованно упрощается реальный объект: например, вместо верхнего почвенного горизонта (лесная подстилка), в котором происходит трансформация растительного опада и формируются ВОВ и фульвокислоты, в авторской модели используются сорбционные лизиметры с чистыми сорбентами, кварцевым песком и закладываемыми в них растительными образцами. *Такие модифицированные лизиметры* устанавливаются как под лесную подстилку (контроль), так и без неё в таёжной экосистеме. При этом в лаборатории предварительно добивались одинаковой скорости фильтрации воды в сорбционных колонках и в изучаемом горизонте почвы. Рядом с опытной стационарной площадкой закладывались сорбционные

лизиметры только с чистыми сорбентами для учета условно *фонового* масштаба миграции ВОВ и оценки их компонентного состава, кислотных и комплексобразующих свойств. *Необходимо знать, сколько и какие компоненты ВОВ будут поступать в сорбционную колонку* и какие новообразованные ВОВ, а также органоминеральные комплексные соединения будут образовываться после взаимодействия мигрируемых из лесной подстилки ВОВ с исследуемым растительным опадом? Обращается внимание на выбор стационарных площадок и закладку почвенно-экологической катены. В этом случае лучше провести детальное почвенное картирование участка в М 1:200 и выделить фации.

4-й этап - создание математической модели и её исследование [1, 15]. Причем, из множества моделей *необходимо подобрать и проанализировать* наиболее подходящую при оценке процессов трансформации опада растений на поверхности лесной подзолистой почвы (модель Мальтуса, Ферхюльста, Лотки, Вольтерра). Наряду с реальной (натурной) моделью (сорбционные лизиметры) нами были проанализированы и использованы некоторые математические модели. *Концептуальная модель, в частности,* позволяет охарактеризовать природный процесс, явление (или всю экосистему) с помощью научных доказательств. Например, подобной моделью может служить *экологическая концепция гумусообразования* в почвах тайги [17]; а также концепция *биогенного кислотообразования* в экосистемах таёжной зоны [18].

5-й этап - проверка адекватности выбранной модели реальному объекту и указание границ применимости использованных моделей (реальной и математической). Анализ адекватности проводился при выборе модели, и при сравнении результатов моделирования с функционированием изучаемого объекта. *Границы применимости модели определяются теми допущениями,* которые делались при подборе модели (причем, чем больше допущений, тем уже границы её применимости). Для проверки достоверности данных, полученных с помощью сорбционных лизиметров, в них наряду с обычным опадом растений использовали растительную массу, тотально меченую радиоактивным изотопом  $^{14}\text{C}$ . В этих опытах удалось строго количественно установить не только масштаб мобилизации ВОВ, коэффициент их мобилизации  $k_{\text{моб}}$  из твердой фазы растительных остатков в раствор, но и определить компонентный состав новообразованных ВОВ и их участие *на начальном этапе гумусообразования,* а также изучить баланс ВОВ в таежных экосистемах: нативных (лесных) и агроэкосистеме. Напомним, что подобные исследования проводились специалистами Тимирязевской академии в 70-90 гг. прошлого века и фактически не имеют аналогов в мировой почвенно-экологической практике.

Рассмотрим результаты исследований.

Моделированию в экологии посвящено много работ. Ряд из них выполнен выдающимися математиками: Лотка, Вольтерра, Ляпуновым, Колмогоровым, а также экологами [1,4,7,10,20 и др.]. Основоположником



математических популяционных моделей принято считать Т. Мальтуса, работавшего в конце 18-го века. Установленный им экспоненциальный закон роста популяции, имеет смысл *на коротких временных интервалах*. В дальнейшем были разработаны модели, которые описывали стабилизацию популяций в экосистеме (например, модель Ферхюльста). Следующим заметным шагом считается *моделирование взаимодействия двух и более видов в экосистеме*. Эти исследования были начаты в 20-х годах прошлого столетия А. Лоткой и В. Вольтерра. Независимо друг от друга данные авторы математически охарактеризовали экологическую ситуацию «хищник-жертва». В настоящее время к этой математической модели отношение специалистов довольно неоднозначное. Считается, что взаимоотношения конкурирующих видов «хищник – жертва» в экосистеме в чистом виде не наблюдаются: хищник может питаться *не одним видом*, а жертва может преследоваться *разными хищниками*. Кроме этого указанные взаимоотношения реализуются в разных ландшафтных условиях (фациальных, глобальных), на которые каждый член системы реагирует по-своему. Поэтому строго циклические колебания численности хищников и жертв, предполагаемые математической теорией Лотки-Вольтерра и Гаузе, в природе не реализуются.

Напомним, цель экологических исследований заключается не только в оценке состояния экосистемы, но и в установлении её функционирования. Одним из интегральных показателей жизнедеятельности таежной биоты является, в частности, *биогенное кислотообразование*. Экологические взаимодействия между видами таежной биоты, с одной стороны, и с почвами – с другой, неразрывно связаны с миграционными потоками ВОВ: органическими кислотами, антибиотиками, полифенолами, коллинами. Так по трофическим цепям переносятся вещества и энергия. Уместно отметить, что американский эколог Ю. Одум [цит. по 13] классифицировал межвидовые взаимодействия в экосистемах на следующие категории: аменсализм, комменсализм, конкуренция, хищничество (включая паразитизм), мутуализм и другие. Рассмотрим кратко некоторые из этих положений, поскольку они позволяют понять, являются ли межвидовые взаимодействия системообразующими или природная экосистема *выступает просто объединением относительно независимых видов биоты и продуктов их жизнедеятельности* [10].

Установлено, что при **аменсализме** наблюдается аллелопатическое – химическое и биохимическое - воздействие одного вида биоты на другой с помощью органических кислот и полифенолов [8]. Среди *продуктов антибиотиков* в почве агроэкосистем наиболее часто диагностируются микроскопические плесневые грибы, особенно при переувлажнении. Специалисты отмечают «*почвоутомление*», например, в плужной подошве. Микроорганизмы выделяют и особо токсичные органические вещества, называемые *микотоксинами*. Аменсализм проявляется также в форме *эвтрофикации* водоемов - «цветение воды», при котором сине-зеленые

водоросли выделяют органические токсины и вызывают гибель многих гидробионтов. Вода становится непригодной для пищевых целей. Активизация данного экологического явления происходит при попадании в пруды, озера и водохранилища некорректно использованных форм и доз удобрений. Часть из них смывается атмосферными осадками со склонов распаханых увалов, не защищённых растительностью, в местные базисы эрозии. С помощью кулисных посевов трав на склонах можно перехватить эрозионные потоки мелкозёма и удобрений. Главное – удобрения нужно запахивать в гумусовый горизонт почвы.

**Конкуренция** в экосистемах реализуется по трем основным направлениям:

*первое* - конкуренция за тот или иной ограниченный ресурс (соперничество), *второе* - взаимное аллелопатическое ингибирование с помощью алкалоидов, полифенолов, органических кислот – масляной, валериановой (антагонизм), *третье* - непосредственная «борьба – активное взаимодействие» между видами за пространство, свет, пищу (агрессия), [8, 17].

Впервые математические модели по межвидовой конкуренции были составлены А. Лотка и В. Вольтерра в 20-х годах прошлого столетия [1, 20]. В середине 30-х годов 20-го столетия Г.Ф. Гаузе выполнил серию лабораторных экспериментов, например с популяциями инфузории-туфельки (*Paramecium Aurelia*) и ее добычи – дрожжей *Saccharomyces eхiguus*, доказав возможность реализации вышеуказанных вариантов конкурентных взаимодействий экспериментально.

**Хищничество в экосистеме.** Лотка рассмотрел систему «*хозяин-паразит*», а Вольтерра - «*жертва-хищник*», которая демонстрирует периодический колебательный режим, возникающий в результате межвидовых взаимодействий без внешнего влияния [10,15]. Самоорганизация в сложных и открытых макроскопических экосистемах происходит благодаря взаимодействию очень большого числа взаимодействующих молекул (и разных по природе веществ). Заметным этапом в развитии теории экологического моделирования стала работа академика А.Н. Колмогорова (1972), в которой проведено математическое исследование системы «жертва-хищник». В этом труде детально сформулированы условия, при которых в рассматриваемой системе реализуется *устойчивое стационарное состояние* или *устойчивый предельный цикл*.

*Известно, что любая задача динамики* представляется в виде системы дифференциальных уравнений. Их интегрирование соответствует решению поставленной задачи. Обычно интегрирование сводится к вычислению средних траекторий  $r(t)$  движения точек или *нахождения вида функций*. В математическом описании динамической системы можно выделить два момента: *первый* – оценка местоположения и скорости изучаемых веществ в какой-то момент времени (их часто называют начальными условиями) и *второй* – интерпретация уравнений движения, связывающих динамические

(движущие) силы с ускорениями. Интегрирование уравнений движения позволяет перейти от начального состояния, например, экосистемы к последующим, т.е. найти совокупность траекторий её развития. При этом каждая из подсистем в ландшафте (почвы, биота, почвообразующие породы, грунтовые воды...) в ходе эволюции проходят не одну, а множество точек бифуркации<sup>8</sup> с трудно предсказуемыми путями развития (поскольку точно неизвестны начальные параметры формирования экосистемы). После точки бифуркации траектории развития компонентов экосистемы равновероятны, а в реальных экосистемах существует пространственно-временная флуктуация как самих объектов, так и их свойств.

Перейдём к рассмотрению фактических данных.

Длительные стационарные исследования показали, что в экосистемах тайги *биополимеры лесной подстилки и хвойного опада (лигнин, смолы, клетчатка)* являются одним из главных источников ВОВ и фульвокислот (ФК) с ярко выраженными кислотными свойствами. В то же время растительные биополимеры выступают *эффективными сорбентами* в отношении различных химических соединений, а также компонентов ВОВ. Среди основных статей баланса ВОВ в лесной подзолистой почве наиболее значимым является *процесс их биodeградации микроорганизмами*: в результате выделяются жидкие и газообразные продукты, тепло и энергия, заключённая в химических связях ВОВ, которая так необходима почвенной биоте. Наряду с этим высвобождаются и элементы питания в доступной форме. Установлено, что в автономной и полугидроморфной почвах подзолистого типа стационара «Вилегодский» минерализуется соответственно  $70,4 \pm 4,6$  и  $32,4 \pm 2,5\%$  ВОВ по  $C_{\text{орг}}$ ; в пахотной почве автономного геохимического ландшафта эта величина достигает максимальных значений -  $83,0 \pm 4,1\%$  общей массы  $C_{\text{орг}}$  ВОВ.

С помощью биodeградации компонентов ВОВ в таежной экосистеме осуществляется взаимосвязь между древесно-кустарничковой растительностью, мхами, лишайниками... и *микроорганизмами* – *мутуалистические взаимоотношения (иначе форма симбиоза)*. Повышается биологическая активность длительно промерзающих подзолистых почв и осуществляется трансформация почвенных минералов (например, в результате реакций кислотного гидролиза). Сорбированные на почвенной матрице гумусовые вещества медленно обновляются ионами и молекулами ВОВ: за 2 года обновилось от  $4,1 \pm 0,1$  до  $18,2 \pm 0,4\%$  молекулярных структур ФК, которые изучали по схеме Тюринга в лаборатории наряду с гуминовыми веществами. Причем, масса ФК в почве заметно преобладала над гуминовыми веществами. ФК, в отличие от *реликтовых гуминовых соединений*, следует рассматривать как современные специфические продукты почвообразования, склонные к активным химическим реакциям,

---

<sup>8</sup> **Бифуркация** - это период смены устойчивости экосистемы на траектории эволюционного развития - качественная перестройка состояния отдельных ее компонентов или всей экосистемы.

формированию комплексных металлоорганических соединений, их водной и биогенной миграции.

Мы сохраняем *традиционное название «фульвокислоты»*, хотя понятно, что данная группа веществ с уникальными кислотными, аллелопатическими и комплексообразующими свойствами представляет собой не что иное, как *устойчивые к биодegradации новые компоненты ВОВ с уникальными эколого-химическими свойствами. Начало этим веществам задает фотосинтез.* Поэтому вполне логична увязка веществ фотосинтетической природы (и процесса фотосинтеза) с новой системой гумусовых почвенных соединений – фульвокислотами, которые закрепляются на почвенной матрице, и процессом гумусообразования в почвах тайги. *Отсюда следует, что без биоты (растений) и без подпитывающего масштабного потока ВОВ, заданного биотой, будет преобладать минерализация микрофлорой сорбционно закреплённого гумуса и его постепенная деградация, а потом и самих почв.* ВОВ, таким образом, выступают важным связующим звеном в передаче веществ и энергии между процессами фотосинтеза и гумификации в таёжной экосистеме.

Трансформация растительных остатков в почвах подзоны южной тайги (в Подмосковье) также характеризуется активной мобилизацией компонентов ВОВ в почвенный раствор. В полевом эксперименте отмечен масштабный эффект: при увеличении трансформируемой массы опада в сорбционных лизиметрах из него больше мобилизуется фульватных продуктов, переходящих при десорбции из угля в аммонийный элюат (табл. 13). Общий масштаб мобилизации  $C_{орг}$  ВОВ в среднем составил 3% или 3 г/100 г субстрата, а на всю массу лесной подстилки (2,5 кг/м<sup>2</sup>) – 75 г/м<sup>2</sup> за 8 мес. опыта (без учёта периода вегетации растений – корневых выделений, смывов с вегетативных органов).

Табл. 13. Распределение <sup>14</sup>C по фракциям групп ВОВ при трансформации растительных остатков ячменя (тотально меченных изотопом <sup>14</sup>C) в сорбционных лизиметрах (вырубка, учхоз «Михайловское»; наблюдения: 11.10.1991 – 02.06.1992 гг.)<sup>9</sup>.

| Исходная масса растительных остатков, мг | Активность $C_{орг}$ групп ВОВ в элюатах, % от суммарной активности |                  | Суммарная активность $C_{орг}$ ВОВ/ % | Суммарная активность $C_{орг}$ ВОВ, % от исходной <sup>14</sup> C |
|--|---|------------------|---------------------------------------|---|
|  | В водо-ацетоновом   | В аммонийном     |                                       |   |
| 10,0                                     | <b>75,8 ±0,4</b>  | <b>24,2 ±1,2</b> | 5030/100                              | <b>1,8 ±0,1</b>   |
| 20,0                                     | <b>80,0 ±2,4</b>  | <b>20,0 ±1,0</b> | 19558/100                             | <b>3,5 ±0,2</b>   |
| 30,0                                     | <b>65,7 ±2,0</b>  | <b>34,3 ±1,0</b> | 27352/100                             | <b>3,3 ± 0,2</b>  |
| 40,0                                     | <b>57,0 ±1,7</b>  | <b>43,0 ±1,3</b> | 35150/100                             | <b>3,2 ±0,3</b>   |
| Среднее значение                         |   |                  |                                       | <b>3,0 ±0,2</b>   |

Затем были экспериментально установлены коэффициенты мобилизации  $k_{моб}$  ВОВ: в осенне-ранневесенний период в почвах южной тайги  $k_{моб}$  составил 0,12 – 0,18 (или 12-18 % по абсолютной величине), а в почвах

<sup>9</sup> Радиоактивность органогенного субстрата, распад/мин. Почва – дерново-среднеподзолистая легкосуглинистая на бескарбонатной морене. В исследованиях участвовал снс **Е. Шестаков**.

средней тайги – 0,07 – 0,21. В период вегетации  $k_{\text{моб}}$  был заметно меньше, на наш взгляд, вследствие более активной биodeградации молекул ВОВ микроорганизмами. При этом из «свежих» растительных остатков хвои ели в почвенный раствор продуцировалось 110 и 130 г/м<sup>2</sup> органического углерода ВОВ соответственно в почвах южной и средней тайге. А из гумифицированных растительных остатков примерно в 4 раза меньше, но в составе ВОВ здесь заметно преобладали фульвосоединения. Наличие почвенной биоты (в том числе и различных групп микроорганизмов) является мощным биогеохимическим барьером на пути полной биodeградации ВОВ и утраты структурной организации веществ, возникших при фотосинтезе. Микроорганизмы активно используют ВОВ для своей жизнедеятельности, при этом способствуя формированию части новых и устойчивых структур органических веществ. Установлено, что компоненты ВОВ имеют низкие величины молекулярных масс (менее 10 000 дальтон), заметно не насыщены ионами металлов, отличаются высокой кислотностью и миграционной способностью [17, 18]. Становится более понятной картина начального этапа таёжного гумусообразования: в составе ВОВ, выщелачиваемых атмосферными осадками из лесных подстилок, уже содержатся новые фрагменты (молекулы) фульвокислот<sup>10</sup> как образцы молекулярных структур гумусовых веществ, которые и закрепляются на почвенной матрице в минеральных горизонтах почвы. В лесных подстилках, следовательно, задаётся основное направление формирования гумусовой системы почв тайги.

Начальный этап гумусообразования неразрывно связан с формированием структур ВОВ, способных к физико-химическим взаимодействиям на ионно-молекулярном уровне. Многообразие и огромное количество молекул ВОВ, флуктуации их по сезонам года в почвенном пространстве тайги способствует самоорганизации *новых соединений фульватного типа* (диссипативных структур), устойчивых к биodeградации и к дальней геохимической миграции как в свободном виде, так и в форме устойчивых водорастворимых комплексных соединений с ионами металлов (Fe, Al, Mn, Si, Ca и другими). Отметим гумусовые вещества подзолистых почв – это продукт возникновения в неравновесных термодинамических условиях экосистем тайги упорядоченных структур из хаоса ионов и молекул ВОВ с новыми экологическими функциями. Известно [7, 10], что процессы качественного перехода подсистем в сложных природных системах в новое состояние совершаются через флуктуации. Флуктуации способны не только менять свои амплитуды, но и изменять свои свойства. *Экосистема и её подсистемы (например, почвы) вступают при изменении, например,*

---

<sup>10</sup> В отличие от ВОВ молекулы **фульвокислот** более устойчивы к биodeградации. Они и накапливаются при хорошей аэрации, в частности, в **подзолах** иллювиально-гумусово-железистых на иллювиальном барьере миграции. В горизонте **В<sub>п</sub>** содержится 1,4 – 2,7 % C<sub>орг</sub> ФК или 1,4 – 2,7 (в среднем 2,1) г/100 г почвы. На всю массу слоя гор. **В<sub>п</sub>** (360 кг/м<sup>2</sup>) мощностью 20 см масса ФК (в составе ВОВ) будет равна **7,56 кг/м<sup>2</sup>**. Это очень большая масса природных фульвосоединений, которые при их латеральной миграции в ландшафтах тайги (наряду с **железом и марганцем**) и обуславливают высокую цветность вод таёжных рек и озёр.

климата в бифуркацию: почвы способны развиваться в принципиально разных направлениях, поэтому не отмечается устойчивой корреляции, например, между свойствами гумусовых веществ и почвы, а также характером растительности. Вот почему в почвенном гумусе, при изучении его фракционно-группового состава, диагностируются самые различные группы и классы органических и органоминеральных веществ: одни из них «старые» и прочно сорбированы минералами (их невозможно вытеснить даже химически активными десорбентами - это гумины), другая группа – это высокомолекулярные гуминовые вещества, третья – химически активные фульвосоединения и четвертая – компоненты ВОВ, осуществляющие в почве взаимосвязь между указанными группами органических веществ, с одной стороны, а с другой – между гумусом почвы и высшими растениями. Состав гумуса твёрдой фазы почв, таким образом, отражает *прежние и, в меньшей мере, современные стадии почвообразования*. Зная особенности бифуркации таёжной экосистемы, возможен вероятный прогноз её дальнейшего развития. Бифуркационные состояния экосистемы обладают двумя важными свойствами: первое – *они временные и неустойчивые*, и второе – экосистема может выходить из состояния бифуркации *не по одному, а по нескольким равновероятным направлениям развития*. На примере состава гумуса почвы *второе свойство особенно отчётливо заметно*. При развитии любой экологической ситуации биота экосистемы может использовать запасы веществ и энергии из той или иной группы гумуса, которые в конкретных биоклиматических условиях и будут им доступны, необходимы и энергетически выгодны.

*Первое свойство бифуркации экосистем уже сейчас реализуется в ландшафтах тайги. Глобальное потепление (и изменение) климата приводит к изменению водного режима почв тайги, периодической засухе, ветровой эрозии, появлению переуплотненных почв; наблюдается инверсия фаций и урочищ. В этих условиях лесные таёжные сообщества деградируют и уступают место вторичным лесам и лугово-степным (с кустарниками) ассоциациям растений. Экосистемы и почвы переходят в новое функциональное состояние. Интенсивность данного процесса заметно возрастает при масштабных пожарах, как в 2010 г. Всё это скажется не только на урожайности выращиваемых культур, но и на химическом загрязнении почв, вод и продуктов растениеводства различными экотоксикантами. В этой связи моделирование позволяет глубже понять изучаемые процессы, динамику их развития, составлять более точный прогноз развития экологической ситуации.*

Подберем и кратко охарактеризуем математические модели, позволяющие найти зависимость мобилизуемых масс ВОВ из трансформирующихся растительных остатков (на поверхности лесной подзолистой почвы) от времени при различных условиях



функционирования таёжной экосистемы. Модель строится на основе полученных результатов экспериментального моделирования.

Модель Мальтуса отражает естественный рост популяции (в нашем случае мобилизацию масс ВОВ) без конкуренции. Создание модели проведём по вышеуказанной схеме: имеется реальная среднетаёжная (лесная) экосистема, на поверхности почвы которой наблюдается трансформация лесной подстилки и опада и мобилизация в раствор ВОВ с кислотными и иными свойствами.

Постановка задачи: найти закономерности мобилизации и изменения масс ВОВ в лесной подстилке экосистемы средней тайги во времени.

Основные допущения:

1. Существуют только процессы мобилизации и естественной убыли ВОВ, скорости которых пропорциональны массе лесной подстилки в данный момент времени.
2. Не учитываем дополнительные источники ВОВ (корневые выделения, смывы с вегетативных органов растений и другие) и различные физико-химические превращения компонентов ВОВ в почве – сорбцию, водную и биогенную миграцию и др.
3. Нет конкуренции между молекулами ВОВ в почвенном растворе (бесконечно большое количество молекул ВОВ и они имеют почти одинаковые свойства).
4. Нет «хищников» - микроорганизмов, интенсивно утилизирующих молекулы ВОВ до углекислого газа, воды и минеральных солей.

Предлагаемая модель. Введем величины:  $M(t)$  диагностированная масса  $S_{\text{орг}}$  ВОВ (г) в момент времени  $t$ ;  $R$  – скорость мобилизации массы ВОВ в раствор (г/год.);  $k_{\text{моб}}$  – коэффициент мобилизации ВОВ, зависящий от типа наземного растительного опада, экологических условий его трансформации (температуры, влажности, гранулометрического состава почвы, наличия карбонатов кальция, оглеения), местоположения в профиле почвы.

Величины  $k_{\text{моб}}$  определяли экспериментально на стационарных площадках с помощью метода сорбционных лизиметров [3];  $G$  – запас лесной подстилки ( $\text{кг}/\text{м}^2$ );  $S$  – скорость естественной убыли ВОВ ( $\text{г}/\text{м}^2 \text{ год.}^{-1}$ );  $-k_{\text{мин}}$  – коэффициент естественной убыли (минерализации) молекул ВОВ (со знаком минус), указывающий на убыль массы ВОВ. Данный коэффициент, как и  $k_{\text{моб}}$ , определяли экспериментально на стационарных площадках с помощью метода радиоактивных индикаторов и сорбционных лизиметров (предварительно растения ячменя выращивались в герметичных лабораторных камерах и тотально метились радиоактивным изотопом  $^{14}\text{C}$ ; такие лабораторные опыты проводили на кафедре радиологии РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева).  $dM/dt$  – скорость изменения массы ВОВ,  $\epsilon$  – коэффициент приращения массы ВОВ. Тогда  $R = k_{\text{моб}}M$ ,  $S = -k_{\text{мин}}M$ . Наблюдается также миграция ВОВ (водная в профиле почвы и биогенная – поглощение биотой). Эта величина небольшая и ею можно пока пренебречь.

Составим дифференциальное уравнение баланса ВОВ. Изменение ВОВ в единицу времени определяется количеством образовавшейся и утилизированной их массой:

$$dM/dt = (k_{\text{моб}} - (-k_{\text{мин}}))M, \text{ или } dM/dt = \varepsilon M, \quad k_{\text{моб}} > 0; k_{\text{мин}} < 0 \quad (13)$$

Начальное условие: при  $t = 0$  масса ВОВ  $M(0) = M_0$ .

Решим уравнение (1): найдём решение  $M = M(t)$ , для которого  $M(0) = M_0$ . Поскольку  $M(t) > 0$ , разделив обе части уравнения (1) на  $M(t)$ , получим:  $d(\ln M(t))/dt = k$ .

Отсюда следует:  $\ln M(t) = k + C_1 \quad (14),$

где  $C_1$  – произвольная постоянная. Обозначим ее так:  $C_1 = \ln C$  и  $C > 0$ .

Применив правила дифференцирования и таблицу производных для простых функций, из уравнения (2) найдем единственное решение:

$$M(t) = C \cdot \exp^{kt} \quad (15)$$

Из выражения (3) выделим ту функцию, которая описывает процесс биохимической мобилизации ВОВ в раствор из лесной подстилки *при отсутствии конкуренции*. Для этого воспользуемся условием  $M(0) = M_0$ . Откуда  $M_0 = C$ .

Окончательно получим:  $M(t) = M_0 \cdot \exp^{kt} \quad (16)$

Это простейшая экспонента с положительным коэффициентом  $k_{\text{моб}}$ .

Анализ решения: а) при  $\varepsilon < 0$  ( $-k_{\text{мин}} > k_{\text{моб}}$ ) мобилизованная масса ВОВ со временем уменьшится до нуля; б) при  $\varepsilon > 0$  масса ВОВ неограниченно увеличивается со временем. В случае «б» модель адекватна лишь до определённых значений времени. При больших массах ВОВ, содержащих разнообразные классы органических и иных веществ, возможны физико-химические взаимодействия между органическими веществами и ионами металлов в почвенном растворе, и уменьшение массы ВОВ; в)  $\varepsilon = 0$  (при  $k_{\text{моб}} = -k_{\text{мин}}$ ), то есть скорости процессов мобилизации и минерализации ВОВ равны. В этом случае масса ВОВ останется на начальном уровне  $M_0$ . Таким образом, *при отсутствии конкуренции* изменение новообразованных масс ВОВ контролируется коэффициентами мобилизации  $k_{\text{моб}}$  и минерализации (биодеградации)  $-k_{\text{мин}}$  в лесной подстилке и подчиняется *показательному закону* (на графике – это восходящая или нисходящая экспоненты). В первом случае кривая может достичь максимума в весенне-осенний периоды функционирования таежной биоты (что подтверждается лизиметрическими опытами). На графике эта зависимость отображается восходящей экспонентой, берущей начало из точки  $M_0$  по ординате. Во втором случае кривая приближается к оси абсцисс в летний сезон при явном дефиците влаги в почве. Указанные кривые на графике являются элементами волны – колебательного процесса. Экспоненциальное приращение масс ВОВ – это удвоение, повторное удвоение и снова

удвоение мобилизованной в раствор массы мобильных органических веществ из биополимеров опада с участием микроорганизмов и таёжной биоты экосистемы в целом. Экспоненциально растущие массы ВОВ в период вегетации часто озадачивают исследователей, поскольку за короткий интервал времени они достигают огромных величин: каждый акт приращения ВОВ зависит не от исходного, а последующего значения масс ВОВ в данный момент. Чем больше последующая масса ВОВ и число микроорганизмов («производителей» органических кислот и иных веществ – спиртов, углеводов, альдегидов... из растительного опада, подстилок, корневых выделений), тем больше новых микроорганизмов и молекул ВОВ образуется в единицу времени. Исходное влияние микроорганизмов будет усилено самой таёжной экосистемой (с точки зрения динамики - это положительная обратная связь). Другой особенностью показательной функции роста массы ВОВ в лесных подстилках является *внезапность, с которой экспоненциально растущая величина мобилизации ВОВ из лесной подстилки достигает известного предела (или не выходит за него вследствие самоотравления избыточными продуктами жизнедеятельности микрофлоры или эффекта конкуренции)*. Наконец, отметим, что без длительных мониторинговых наблюдений трудно выявить периоды экспоненциальных подъёмов и спада (минерализации ВОВ): вначале долгое время кажется, что мобилизуемые в раствор из опада растений массы ВОВ незначительные, а сами ВОВ не играют сколь-нибудь существенную генетическую роль в почвообразовании и трансформации продуктов антропогенеза в подзолистых почвах. Но затем приращение массы ВОВ в таёжной экосистеме становится всё быстрее и быстрее, пока за последние одно-два удвоения масса ВОВ не достигнет возможных предельных (и даже критических) для биоты величин. Этот момент наиболее сложно уловить в лизиметрических опытах, если не учесть особенности функционирования самой таёжной экосистемы. Только с помощью сорбции ВОВ на чистых сорбентах в лизиметрах этот уникальный факт мобилизации ВОВ удаётся установить с известными допущениями. После «ураганного» увеличения новообразованных масс ВОВ в лесной подстилке начинается их уменьшение, достигающее в какой-то момент времени уже лавинообразного спада (поскольку в эксперименте установлено, что в экспоненциальной функции второй множитель имеет вид  $\exp^{-kt}$ ). С экологической точки зрения подобные эффекты, на наш взгляд, отражают отклик экосистемы на известные воздействия (внутренние и внешние): как мутуалистические, так и аллелопатические, а также поиск элементов питания. В заключение отметим, что данная модель интересна в качестве начального этапа изучения и моделирования процессов трансформации растительных остатков в таёжной экосистеме.

Модель2 Ферхюльста учитывает конкуренцию в экосистеме. В моделях, оценивающих экологическую ситуацию, реально существует межвидовая конкуренция за элементы питания, место обитания, свет, воду, то есть

добавляется дополнительный источник гибели биоты. Одним из механизмов реализации конкуренции в экосистемах является *аллелопатия* – выделение биотой жидких ВОВ и газообразных веществ с эко-токсикологическими свойствами: алкалоидов, фитонцидов, микотоксинов. В результате чего однородный растительный покров участка (парцелла, фация) со временем трансформируется (наблюдаются сукцессии видов растений и микрофлоры) в неоднородное по составу растений урочище, а масштаб водной миграции ВОВ в новых растительных сообществах (с неодинаковыми запасами и составом лесных подстилок) заметно изменяется не только по сезонам года, но и в пространстве.

В новой модели снимем допущение 3 (модель Мальтуса). Считая, что скорость «гибели» за счёт конкуренции между молекулами ВОВ пропорциональна вероятности встречи двух частиц (не все молекулы ВОВ взаимодействуют друг с другом: им нужно преодолеть энергетический барьер), можно записать  $S = -\beta M \cdot M - (-k_{\text{мин}}M)$ , где  $\beta$  - коэффициент пропорциональности.

Составим дифференциальное уравнение баланса ВОВ:  
 $dM/dt = k_{\text{моб}}M - (-k_{\text{мин}}M) - \beta M^2$  или  $dM/dt = \varepsilon M - \beta M^2$  (17)

Это нелинейное дифференциальное уравнение.

Решим его: сделаем замену переменных:  $U = (\varepsilon M - \beta M^2)$ . Тогда с учетом, что при  $t=0$   $M=M_0$ , получим:

$$\ln (M/M_0) - \ln ((\varepsilon - \beta M) / (\varepsilon - \beta M_0)) = \varepsilon t. \text{ Отсюда найдем } M_{(t)}:$$

$$M_{(t)} = M_0 \varepsilon / (\varepsilon - \beta M_0) \exp^{-\varepsilon t} + \beta M_0 \quad (18)$$

На графике кривая со временем выходит на стационарный уровень из точки  $M_0$  на ординате, причем,  $M_{\text{ст}} = \varepsilon/\beta$ . В данном случае закон развития экологической ситуации с ВОВ является более сложным, чем в модели 1 Мальтуса. Но в реальной экосистеме функционируют «хищники». Рассмотрим их влияние.

Модель 3 Вольтерра «хищник – жертва». Среди допущений модели 1 снимем допущение 4. Пусть в лесной подстилке таёжной экосистемы находятся молекулы ВОВ («жертвы») и микроорганизмы («хищники»), питающиеся только жертвами. Причём ВОВ постоянно мобилизуются в почвенный раствор из достаточного запаса опада растений и лесной подстилки (причем между молекулами ВОВ отсутствует химическое взаимодействие).

Введём новые величины:  $M$  - число жертв (масса ВОВ) в момент времени  $t$ ;  $y$  – число хищников (масса микроорганизмов) в момент времени  $t$ .

Составим уравнение баланса между новообразованными и исчезающими массами ВОВ вследствие их биодеградации:

$$\text{Жертвы (изменение массы ВОВ): } dM/dt = k_{\text{моб}}M - (-k_{\text{мин}}M - \alpha My) \quad (19),$$

где:

$k_{\text{моб}}$  – коэффициент мобилизации ВОВ из лесной подстилки в раствор;

$k_{\text{моб}}$  ВОВ из «свежих» лесных растительных остатков варьируют в пределах 0,08-0,17, а из гумифицированных - 0,03-0,05 или 3-5%;

$-k_{\text{мин}}$  – коэффициент убыли (минерализации) молекул ВОВ;

$k_{\text{моб}}M$  – скорость накопления в лесной подстилке массы ВОВ есть производная от функции  $M(t)$ . Напомним, что *геометрический смысл производной* – тангенс угла наклона, а физический – скорость изучаемого процесса;

$-k_{\text{мин}}M$  – скорость убыли массы ВОВ в лесной подстилке;

$\alpha My$  – скорость биodeградации массы ВОВ при их контакте с микроорганизмами и их ферментными системами.

*Хищники (изменение массы микроорганизмов):*

$$dy/dt = \delta My - \beta y \quad (20),$$

где:

$\delta My$  – скорость размножения микроорганизмов в лесной подстилке;

$\beta y$  – скорость естественной гибели микроорганизмов в лесной подстилке.

Или

$$\begin{aligned} dM/dt &= \varepsilon M - \alpha My \\ dy/dt &= \delta My - \beta y \end{aligned} \quad (21)$$

Это сложная система нелинейных дифференциальных уравнений.

Сначала найдем стационарное решение при  $M = \text{const}$ ,  $y = \text{const}$ . Следовательно -  $dM/dt = 0$ ,  $dy/dt = 0$ . Система дифференциальных уравнений при этом сводится к алгебраическим:

$$\begin{aligned} M_{\text{ст}}(\varepsilon - \alpha y_{\text{ст}}) &= 0 \\ y_{\text{ст}}(\delta M_{\text{ст}} - \beta) &= 0 \end{aligned}$$

Рассмотрим решения:

$$M_{\text{ст}} = \beta/\delta; \quad y_{\text{ст}} = \varepsilon/\alpha \quad (22)$$

Упростим систему уравнений (22), предполагая, что произошли малые отклонения численности микроорганизмов (хищников)  $V(t)$  и молекул ВОВ (жертв)  $U(t)$  относительно стационарных значений:

$$M = M_{\text{ст}} + U(t), \quad U < M_{\text{ст}}, \quad U < y_{\text{ст}} \quad (23)$$

$$y = y_{\text{ст}} + V(t), \quad V < y_{\text{ст}}, \quad V < M_{\text{ст}} \quad (24)$$

Тогда:

$$dU/dt = M_{\text{ст}}(\varepsilon - \alpha y_{\text{ст}}) + U(\varepsilon - \alpha y_{\text{ст}}) - \alpha M_{\text{ст}} V - \alpha UV,$$

$$dV/dt = y_{\text{ст}}(\delta M_{\text{ст}} - \beta) + V(\delta M_{\text{ст}} - \beta) + \delta U y_{\text{ст}} + \delta UV \text{ или}$$

$$dU/dt = M_{\text{ст}}^2(-\alpha V/M_{\text{ст}} - \alpha U/M_{\text{ст}} \cdot V/M_{\text{ст}}),$$

$$dV/dt = y_{\text{ст}}^2(\delta U/y_{\text{ст}} + \delta U/y_{\text{ст}} \cdot V/y_{\text{ст}}) \quad (25)$$

Учитывая уравнения (23,24) и пренебрегая членами второго порядка малости  $U/M_{\text{ст}} \cdot V/M_{\text{ст}}$  и  $U/M_{\text{ст}} \cdot V/M_{\text{ст}}$ , получим систему уравнений:

$$\begin{aligned} dU/dt &= -\alpha M_{\text{ст}} V \\ dV/dt &= \delta U y_{\text{ст}}, \end{aligned} \quad (26),$$

которую можно свести к дифференциальным уравнениям второго порядка относительно переменных  $U$  и  $V$ :

$$\begin{aligned} d^2U/dt^2 + \varepsilon\beta U &= 0, \\ d^2V/dt^2 + \varepsilon\beta V &= 0 \end{aligned} \quad (27)$$

Это характерные уравнения для описания гармонических колебательных процессов. Решения уравнений:

$$\begin{aligned} U &= U_{\text{max}} \sin \sqrt{\varepsilon\beta} t, \\ V &= V_{\text{max}} \sin(\sqrt{\varepsilon\beta} t + \varphi_0) \end{aligned} \quad (28)$$

Можно рассчитать и отношения амплитуд отклонений масс микроорганизмов и молекул ВОВ:

$$V_{\text{max}}/U_{\text{max}} = \delta/\alpha\sqrt{\varepsilon/\beta} \quad (29)$$

В результате колебания массы ВОВ и микроорганизмов (при малых отклонениях от стационарных значений) в лесной подстилке таёжной экосистемы равны:

$$\begin{aligned} M(t) &= M_{\text{ст}} + U_{\text{max}} \sin \sqrt{\varepsilon\beta} t, \\ y(t) &= y_{\text{ст}} + V_{\text{max}} \sin(\sqrt{\varepsilon\beta} t + \varphi_0) \end{aligned} \quad (30)$$

Таким образом, масса ВОВ ( $M$ ) и численность микроорганизмов ( $y$ ) в лесной подстилке испытывают гармонические колебания относительно стационарных значений с одинаковой частотой  $\omega = \sqrt{\varepsilon\beta}$ , но смещённые по фазе  $\varphi_0$ . В модели 3 закономерности функционирования таёжной экосистемы оказывается более сложными: вместо простых экспонент – положительной и отрицательной, как в предыдущих моделях, получается их сумма (то есть периодическое колебание – подъём и спад кривой на графике).

И так, модель 3 позволяет в первом приближении прогнозировать динамику ВОВ в лесной подстилке подзолистой почвы таёжной экосистемы. В природных экосистемах, где подсистемы взаимосвязаны потоками веществ и энергии, возникает *саморегуляция процессов*, которая ограничивает непрерывное разрастание масс и флуктуаций ВОВ, а также микроорганизмов. *Например, избыток продуктов жизнедеятельности микроорганизмов может привести к их гибели*, что находит отражение в термине «почвоутомление». Саморегуляция при известных почвенно-экологических условиях приводит к развитию устойчивых закономерностей в эволюции таёжной экосистемы – появление многообразия компонентов ВОВ и реализации их экологических функций [20].

Рассмотрим это положение на следующем примере. Если подзолистую почву рассматривать условно как замкнутую систему, то закон возрастания *энтропии* (функции состояния объекта) можно охарактеризовать



следующим образом: процессы самопроизвольно развиваются в направлении *увеличения информации*. Последний параметр связан с *разнообразием*, поэтому процессы в таёжной экосистеме направлены в сторону появления *наибольшего разнообразия веществ* – прежде всего различных по составу мобильных молекул ВОВ (и иных соединений, например, продуктов их глубокой биodeградации, неполного окисления углеводов и др.). Чем больше для экосистемы *получается выигрыш* в разнообразии веществ (например, низкомолекулярных ВОВ с разными свойствами и функциями), тем более вероятным и выгодным для таёжной биоты является процесс *биогенного кислотообразования*. Преобладание одной какой-то группы веществ в почвенных растворах, например органических кислот, может свидетельствовать о деградации экосистемы. Сложные (и химически слабоактивные) высокомолекулярные *гуминовые вещества* с депонирующими функциями в таёжной экосистеме почти не формируются (их функции успешно выполняют биополимеры лесной подстилки). В таёжных экосистемах постоянно мобилизуются из лесной подстилки в раствор и мигрируют *низкомолекулярные* органические, органоминеральные соединения и новые молекулы низкомолекулярных фульвокислот. Подчеркнём, что эти вещества являются химически активными, имеют ярко выраженные кислотные, аллелопатические, физиологические, биохимические и комплексообразующие свойства. Они отражают специфику функционирования таёжной экосистемы.

При моделировании экологических процессов в экосистемах нужно учитывать ещё одно обстоятельство. Оно связано с *«пределами роста» и устойчивым развитием*, которые были сформулированы [4, 22] при рассмотрении пределов потребления в моделях развития человеческого общества и биосферы Земли. Известно, что любая природная экосистема состоит из высокоорганизованной биоты, которая развивается детерминировано (*это первая подсистема*) и почвы – условно менее организованной – второй подсистемы. *Предел роста*, например, растительной массы в экосистеме связан не только с наличием доступных форм элементов питания, энергии Солнца, доступной влаги и комфортной температуры, но и с поддержанием *энтропии* на высоком уровне в первой подсистеме (биоте). А это возможно при возвращении поглощённых веществ в почву и *разрушении строгого порядка у биоты*, что и получается при умирании живых организмов в первой подсистеме. Уместно отметить, если в процессе жизнедеятельности таёжной биотой выделяются в почву компоненты ВОВ и иные соединения, то с точки зрения поддержания *высокого уровня энтропии* эти выделения должны быть простыми и мало организованными веществами. Подобные закономерности действительно характерны для северной биоты, которая устойчиво продуцирует в почву алифатические органические кислоты (и другие ионы, молекулы), добывая необходимые элементы питания и эффективно адаптируясь к суровым таёжным условиям. Если мы хотим понять, как происходит

самоорганизация даже в простых природных экосистемах, нужно раскрыть правила взаимодействия отдельных составляющих (указанных подсистем), а также выявить потоки мобильных веществ и энергии между ними. Это одна из актуальных задач экологии.

В указанных процессах важная роль принадлежит носителю – *молекулам воды*. Лесные подстилки таёжных экосистем отличаются чрезвычайно высокой влагоёмкостью. Весной, осенью, часто и летом в поверхностных слоях почвы (и в лесной подстилке таёжной экосистемы) создаются условия временного избыточного увлажнения – возникает верховодка, которая способствует устойчивой и масштабной мобилизации ВОВ в почвенный раствор из растительных биополимеров [3, 19]. В почвенном растворе молекулы и ионы самых разнообразных классов ВОВ (полифенолов, алифатических и ароматических органических кислот, аминокислот, углеводов) окружены молекулами воды. Известно, что в воде присутствуют «зародышевые» формы кристаллов льда и ассоциаты молекул  $H_2O$  в форме мерцающих кластеров [17]. Специфика взаимодействия воды с компонентами ВОВ определяется не столько хаотическим (тепловым) движением молекул воды, сколько сложной многофазной структурой  $H_2O$ , сильным поверхностным натяжением (большой избыточной энергией поверхностного слоя), избирательностью взаимодействия в контактном слое с компонентами ВОВ. Именно вода, с одной стороны, является первоисточником структурной организации веществ в экосистемах, а с другой – незаменимым фактором трансформационных и миграционных процессов – их природным носителем. Воде присуща «память».

В этой связи моделирование потоков абиогенной миграции ВОВ в почвенном профиле является другой важной задачей, связанной с оценкой баланса ВОВ в экосистемах. Данная задача опирается на ряд допущений: первое – миграция ВОВ *происходит в насыщенной влагой почве*, второе – *миграция осложняется сорбцией ВОВ коллоидами и почвенными минералами*; третье – наблюдается *трансформация состава и структур ВОВ* при миграции в профиле подзолистой почвы с появлением молекул фульвокислот с новыми свойствами. Последние процессы могут иметь физико-химическую и биохимическую направленность. Например, Клыков В.Е. (1989) показал, что для сорбируемых ионов процесс удовлетворительно описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} m_a \frac{\partial C}{\partial t} &= D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z} - \frac{\partial N}{\partial t}, \\ \frac{\partial N}{\partial t} &= - \beta_2 (\alpha N - m_a C) \end{aligned} \quad (31),$$

где:  $N$  – массовое содержание сорбируемого иона в единице объёма почвы;

$\beta_2$  – коэффициент скорости обмена ионами между жидкой фазой поры и твёрдой фазой;  $\alpha$  – коэффициент распределения веществ между жидкой и твёрдой фазами в условиях сорбционного равновесия (наподобие  $k_{\text{моб}}$ ).

Наряду с системой «хищник – жертва» в экосистемах имеется определенный биогенный ресурс. Рассмотрим более сложную модель с учетом данного ресурса.

Математическая модель Лотка–Вольтерра отражает сложные взаимосвязи между компонентами системы «ресурсы – хищники – жертвы». Аналитическое решение уравнений данной модели получить трудно. Также нельзя в полной мере проанализировать особенности функционирования экологической системы при различном сочетании параметров модели. *Поэтому мы её рассматривать пока не будем.* В то же время подчеркнём важность для экологии **трёх законов**, установленных Вольтерра: *закон периодического цикла, закон сохранения средних величин и закон нарушения средних величин* [1].

На заключительном этапе моделирования нами проведена оценка вышеуказанных моделей в реальной экологической ситуации, в частности, для подзоны средней тайги. Отмечено, что при ярко выраженном дефиците поступающего органогенного субстрата (опада растений и корней), например, в пахотные подзолистые почвы наблюдается преимущественно *минерализация гумусовых веществ*, сорбционно закрепленных на почвенной матрице. В последствии, если ситуация не изменяется, происходит глубокая деградация не только гумусовых веществ, но и других компонентов почвы. В этой связи в почвах агроландшафтов тайги обязательно следует *проводить травосеяние, внедрять почвозащитные посевы многолетних трав*, возделывать сидеральные культуры и не оставлять большие площади почв без растительного покрова (под «чистые» пары). Стремление ликвидировать дефицит в гумусовом балансе пахотных почв тайги с помощью технологических приемов и удобрений решит эту проблему не в полной мере, поскольку упускаются экологические аспекты формирования и превращения системы гумусовых соединений, являющихся функцией биоты (все виды культурных растений, кроме многолетних трав, подобной средообразующей функцией не обладают). Отметим, сделать точный прогноз отклика изучаемой экосистемы на внешние факторы (или целевые антропогенные воздействия – внесение удобрений и мелиорантов) нельзя, если пользоваться общими положениями. Природные процессы крайне трудны для прогноза, особенно, если их эволюция описывается нелинейными дифференциальными уравнениями, куда входят исследуемая функция и ее производные в степени не менее двух и (или) их произведение.

Завершим анализ математических моделей, позволяющих оценить динамику кислотности почв тайги, путем диагностики их функционирования. Созданную математическую модель формирования и трансформации ВОВ анализировали *на адекватность* условиям таежной экосистемы. Определяли возможность ее применения на практике, например, при разработке концепции *«кислотность таёжной экосистемы»* [17]. До сих пор кислотность подзолистой почвы (как подсистемы таёжной

экосистемы) рассматривается на нуль-мерном уровне почвенного образца, без учёта реальных процессов почвообразования и функционирования таёжной биоты в конкретной фации, урочище. Пока ещё не учитываются масштаб мобилизации ВОВ с кислотными свойствами в раствор, вклад «старых» ГС в кислотообразование, а также дополнительная мобилизация в раствор ионов водорода при комплексообразовании и за счет иных процессов. Необходимо учесть также массу сильных минеральных кислот антропогенного генезиса, поступающих в ландшафт за счет привносимых аэральными выпадениями, содержащих сажу, частички пыли и кислотные анионы:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ . Общая кислотность таежной экосистемы (не только почвы), следовательно, включает три составляющие:

1-я — биогенная кислотность (кислотность, продуцируемая сообществом таежной биоты — высшими и низшими растениями, кустарничками и микроскопическими плесневыми грибами — кислотообразователями; она отличается устойчивой динамикой),

2 — химическая (кислотность твёрдой фазы почвы),

3 — антропогенная компонента (привносимые «кислотные дожди»). Становится понятно, почему при традиционном агрохимическом подходе эффект известкования почв продолжается *лишь* 2-3 (редко 4 года): регулируется свойство почвы, а не почвенно-экологические процессы, обуславливающие кислотность. *В принципе, агрономы работают «со следствием», а не устраняют причины, обуславливающие кислотность почв агроэкосистем.* Отметим также, природная почвенная кислотность, унаследованная от нативной таежной экосистемы, создавалась очень длительный период (сотни, тысячи лет), а в почвах агроландшафтов этот важный кинетический фактор почему-то не учитывается при известковании подзолистых почв. Пока остается без внимания специалистов и информационная «память» таежной экосистемы.

Теоретические аспекты диагностики почвенной кислотности опираются в основном на *унификацию методов* их аналитической оценки. Неполно учитывается почвенно-экологическая ситуация в реальных агроландшафтах: с агрономической точки зрения *кислотность* — весьма неблагоприятный почвенный фактор (и это верно), а с экологической — кислотность создается всеми группами живых организмов таежной экосистемы и является универсальным (и очень эффективным) биогенным механизмом, в частности, при адаптации биоты к чрезвычайно неблагоприятным и суровым условиям существования. В почвах агроландшафтов тайги (в условиях промывного водного режима) специалисты пытаются улучшить качество гумуса путем увеличения доли высокомолекулярных гуминовых веществ. *В нативных экосистемах тайги, напротив, циркулируют самые разнообразные и мобильные компоненты ВОВ:* они интенсивно и устойчиво продуцируются в раствор из растительного опада, лесной подстилки, корневых выделений, смывах с вегетативных органов..., имеют *низкие величины молекулярных масс*, ярко выраженные кислотные,

аллелопатические и комплексообразующие свойства. Они выполняют важные экологические функции в таежных экосистемах, участвуя в межвидовых взаимодействиях, формировании и обновлении конституционных форм гумуса (сорбционно закрепленных на почвенной матрице), трансформации и водной миграции продуктов почвообразования и антропогенеза, определяют гидрохимический состав вод Европейского Севера, осуществляют генетическую взаимосвязь двух важнейших процессов в таежных экосистемах – фотосинтеза и гумусообразования [17]. На основании фактических экспериментальных данных и моделирования, можно сделать следующие выводы:

1. Диагностика нативного процесса трансформации растительных остатков и формирования системы гумусовых веществ почвы с динамических позиций (в отличие от статичных опытов и моделей) позволяет более обоснованно решать задачи математического моделирования, связанные с общей оценкой функционирования таежных экосистем.
2. Современный этап трансформации растительных остатков на поверхности лесных подзолистых почв характеризуется активной мобилизацией ВОВ с ярко выраженными кислотными, аллелопатическими и комплексообразующими свойствами. Компоненты ВОВ отличаются низкими величинами молекулярных масс (менее 10 000 дальтон), не насыщены ионами металлов, содержат в своём составе как ингибиторы (полифенолы, алкалоиды), так и стимуляторы роста и развития растений. Эти вещества мобилизуются в почвенный раствор из биополимеров растительного опада и продуктов жизнедеятельности растений, микроорганизмов, подчиняясь экспоненциальной зависимости. С помощью ВОВ биота эффективно адаптируется к суровым условиям тайги.
3. Формирование специфических групп гумусовых соединений (преимущественно фульвосоединений) протекает как в лесных подстилках таежных лесов, так и при вертикальной внутрипрофильной водной миграции, в частности, при прохождении ВОВ через сорбционные барьеры миграции. Фульвокислоты выполняют ряд важных функций в таежных экосистемах – биогеохимическую, миграционную, транслокационную.
4. В таежных ландшафтах, в балансе новообразованных компонентов ВОВ, преобладает их *биodeградация*; ВОВ являются источниками энергии и доступных форм элементов питания для биоты. Процесс образования ВОВ неразрывно связан с их трансформацией и аккумуляцией в почвенных горизонтах при участии микроорганизмов.
5. Нативные компоненты ВОВ являются универсальным индикатором состояния таежных экосистем. ВОВ выступают как уникальная движущая сила, обуславливающая физико-химическую трансформацию и водную миграцию продуктов почвообразования и

антропогенеза в почвах и ландшафтах. Биота с помощью ВОВ способствуют устойчивой подпитке подзолистых лесных почв веществами и энергией. Без биоты почва деградирует и утрачивает свои экологические функции.

6. Математическое моделирование позволяет полнее познать процессы функционирования ландшафтов, особенности межвидовых взаимодействий в экосистеме и направленность процессов почвообразования. В то же время следует учитывать известные ограничения в применении математических моделей к реальным природным объектам. Наиболее эффективно в этом случае сочетание приёмов экспериментального и математического моделирования.

Использованная литература:

1. Вольтерра В. Математическая теория борьбы за существование. М.: Мир. 1976.
2. Гаузе Г.Ф., Витт А.А. О периодических колебаниях численности популяций: математическая теория релаксационного взаимодействия между хищниками и жертвами и ее применение к популяции двух простейших// Известия АН СССР. Отд. Математики и естеств. наук. 1934. т. 10. С. 89.
3. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. М.: Едиториал УРСС. 2003.
4. Добровольский Г.В., Карпачевский Л.О., Криксунов Е.А. Геосферы и педосфера. М.: ГЕОС. 2010. – 190 с.
5. Кауричев И.С., Яшин И.М., Черников В.А. Теория и практика метода сорбционных лизиметров в экологических исследованиях. М.: МСХА. 1996. – 143 с.
6. Колмогоров А.Н. Качественное изучение математических моделей динамики популяций // Проблемы кибернетики. 1972. Вып. 25. С. 29.
7. Клыков В.Е. Математическое моделирование и экспериментальное исследование процессов миграции водорастворимых веществ в почвах. Автореф. дисс. на соискание учёной степени доктора технических наук. М.: Гидромелиоративный ин-т. 1989. - 44 с.
8. Лизоркин П.И. Курс дифференциальных и интегральных уравнений с дополнительными главами анализа. М.: Наука. 1981.
9. Ляпунов А.А. Биогеоценозы и их математическое моделирование // Природа. 1971. № 10. - С. 7.
10. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного (введение). Пер. с англ. д-ра физ.-мат. наук Пастушенко В.Ф. М.: Едиториал УРСС. 2003. – 344 с.
11. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса (новый диалог человека с природой). М.: Едиториал УРСС. 2000. – 312 с.



12. Райс Э. Факторы, влияющие на количество ингибиторов, продуцируемых растениями. В кн. Аллелопатия. М.: Мир. 1978. - С. 326- 342.
13. Рачинский В.В. Общая постановка задачи динамики сорбции и методы её решения // В кн. Введение в общую теорию динамики сорбции и хроматографии. М.: Наука. 1964. - С. 26 – 45.
14. Свирижев Ю.М., Логофет Д.О. Устойчивость биологических сообществ. М.: Наука. 1978.
15. Смит Дж. М. Модели в экологии. М.: Мир. 1976.
16. Уатт К. Экология и управление природными ресурсами. Количественный подход. М.: Мир. 1971.
17. Форрестер Дж. Мировая динамика. М.: Наука. 1978.
18. Хатчинсон Д. Лимнология. Географические, физические и химические характеристики озер. М.: Прогресс. 1969.
19. Федоров в.д., Гильманов Т.Г. Экология. Учебник. М.: МГУ. 1980.
20. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: Мир. 1978.
21. Яшин И.М., Кауричев И.С., Черников В.А. Экологические аспекты гумусообразования. Известия ТСХА. – 1996. Вып.2. – С. 110 – 129.
22. Яшин И.М., Шишов Л.Л., Раскатов В.А. Почвенно-экологические исследования в ландшафтах. М.: МСХА. 2000. – 560 с.
23. Яшин И.М., Карпачевский Л.О. Экогеохимия ландшафтов. Учебно-практическое пособие. М.: МСХА. 2010. - 224 с.
24. Яшин И.М. Исследование взаимосвязи процессов глее- и подзолообразования с экологическими функциями почв тайги // Материалы Международной конференции, посвящённой 165-летию со дня рождения В.В. Докучаева. С-Петербург. 2011. – С. 571-574.
25. Lotka A. J. Theory analytique des association's biologiques. P., 1934.
26. Clements F.E., Shelford V.E. Bioecology. N.Y., 1939.
27. Meadows Donella, Randers J., Meadows Dennis. Limits to Growth (The 30 –Year Update). Chelsea Green Publishing Company. Vermont. 2004. 342 p.

### **7.8.1. Экспериментальное моделирование**

Получение фактической информации в специально организованных лабораторных опытах, направленных на изучение тех или иных процессов и явлений, называется **экспериментальным моделированием**. К нему относится: исследование процесса оглеения почв; формирование групп ВОВ, мобилизующихся в раствор из растительных остатков; изучение многообразных сорбционно-десорбционных взаимодействий, в частности, компонентов ВОВ с кислотными функциями и почвой, биотестирование.

Большой фактический материал по моделированию почвенных процессов накоплен научными школами И.С. Кауричева и Ф.Р. Зайдельмана. Интерес представляют работы Г.В. Добровольского, Д.С.

Орлова, Л.Н. Александровой, Т.В. Аристовской, С. Bloomfield, F. Stevenson, M. Schnitzer и других авторов. Экспериментальное моделирование сорбционных взаимодействий в почвах является одним из перспективных научных направлений.

Рассмотрим его подробнее.

### **7.8.2. Моделирование сорбционных взаимодействий органических лигандов с гумусовыми соединениями почв ландшафтов тайги**

Почвоведом хорошо известно, что компоненты ВОВ обновляют и «достраивают» молекулярные структуры гумусовых веществ, сорбционно закрепленные на почвенной матрице. Однако прямых опытов по взаимодействию, например, низкомолекулярных органических кислот с почвами проводилось недостаточно. Это и определило направленность модельных экспериментов.

Особенности **метода экспериментального моделирования** рассмотрим на примере изучения сорбции щавелевой кислоты из водного раствора образцами *дерново-карбонатной выщелоченной среднесуглинистой почвы* (стационар «Каргопольская сушь», Архангельская область) поэтапно:

1. экологические функции низкомолекулярных органических кислот (НМОК) – И.М. Яшин (1993);
2. состав и свойства гумусовых соединений изучаемого типа почв;
3. теоретическое освещение сорбционно-десорбционного взаимодействия (*получение изотермы сорбции на основе данных кинетики*);
4. исследование состава и свойств десорбированных из почвы соединений по схеме W. Forsyth (1947) в модификации И.М. Яшина (1973, 1993) и физико-химических методов.

Рассмотрим эти положения подробно.

1. *Экологические функции НМОК.* Органические кислоты играют важную роль в жизнедеятельности живых организмов и процессах почвообразования в таежных ландшафтах. *НМОК участвуют в образовании белков, жиров и углеводов, обуславливая взаимосвязь важнейших метаболических процессов в растениях.* **Органические кислоты** – производные сахаров – в виде полимеров входят в состав пектиновых веществ (полимер галактуроновой кислоты), камедей и слизей. Циклические органические кислоты (производные **дитерпенов**) являются основной составной частью **смола и бальзамов**, выделяемых хвойной древесной растительностью. Кстати, аспирант Муксин Аль-Аамри из Султатната Оман под руководством И.М. Яшина исследовал биохимический состав смолы ладанного дерева в 1998-2000 гг. Установлено, что многие биологически активные вещества фотосинтетической природы также относятся к органическим кислотам, например, витамины – аскорбиновая, никотиновая кислоты и др., стимуляторы роста и развития – ауксины, гибберелловая кислота, гетероауксин (А.Л. Курсанов, 1978; П.М. Магомедов, 1985).

Разнообразные по составу и свойствам органические кислоты образуются в растениях путем фотосинтеза и дыхания.

Внедрение в практику научных исследований современных методов анализа – бумажной и колоночной хроматографии (гелевой, адсорбционной и др.), радиоактивных изотопов – способствовало повышению уровня изысканий и **познания экологических функций НМОК**. Стало возможным разделять смеси органических кислот, определять концентрацию каждой из них, устанавливать химическую природу и механизм формирования (И.С. Кауричев с соавт., 1958, 1960, 1973; И.М. Яшин, 1973, 1993).

Усиленное продуцирование различных органических кислот в горизонтах  $A_0$  и  $A_0A_1$  подзолистых почв экосистем тайги обусловлено недостатком щелочно-земельных оснований в растительном опаде и *наличием в почвенной микрофлоре большого количества плесневых грибов, способных к активному кислотообразованию* (Т.В. Аристовская, 1980). Среди НМОК, находящихся в свободном состоянии в почвенных растворах и лизиметрических водах (вместе с другими индивидуальными органическими веществами и фульвосоединениями), наиболее часто идентифицируются *щавелевая, лимонная, фумаровая и янтарная кислоты*, представляющие собой, как известно, анионные полидентатные хелатообразующие лиганды. Каждой кислоте свойственны не только специфические особенности формирования и превращения при трансформации в почве растительного опада, но и способность вступать во взаимодействие с ионами металлов, в результате которого образуются различные по устойчивости и знаку заряда комплексные соединения (А.И. Карпухин, 1986). НМОК являются донорами ионов гидроксония  $H_3O^+$ , которые в условиях таежной зоны остаются практически не усредненными и поглощаются компонентами почвы. Наблюдается ступенчатое протонирование лигандов, что приводит к конкуренции между протонами и ионами металлов за лиганд (В.И. Савич, 1984).

«Причина возникновения почвенной кислотности – **поглощение ионов водорода**. Следствием этого поглощения, как результат последующего разрушения кислых почвенных алюмосиликатов, будет появление гидрозоль алюминия в почвенном растворе» (С.Н. Алешин, 1952).

Основным источником НМОК в таежных биоценозах служат функционирующие высшие растения, кустарнички, мхи и лишайники. Известно, что в клеточном соке, например, хвои ели и сосны, содержится много свободных органических кислот и их солей (клеточный сок имеет рН 4,5...5,5). При дефиците ионов  $Ca^{2+}$  органические кислоты, мобилизуемые в раствор из растительного опада, не усредняются и в активной форме с потоком гравитационной влаги поступают в верхний генетический горизонт подзолистой почвы. Дополнительные массы НМОК поступают в раствор при сезонном переувлажнении лесной постилки и верхних слоев почвы, а также за счет корневых выделений древесной и кустарничковой растительности.

Можно рассматривать процесс мобилизации компонентов ВОВ, в том числе с кислотными свойствами, в подзолистых почвах **как адаптивную функцию живых организмов** в условиях таежной зоны (В.В. Пономарева, 1964; И.М. Яшин, 1993). *Мобилизованные в раствор ВОВ, а в их составе и НМОК, взаимодействуют с химическими соединениями верхних почвенных горизонтов, обуславливая возможность не только формирования мобильных органно-минеральных продуктов, способных в внутрипочвенной и геохимической (ландшафтной) миграции, но и образования, а также обновления гумусовых веществ почвы* (В.А. Черников, 1984).

Несмотря на успехи в изучении проблемы, связанной с генезисом гумусовых соединений и их трансформацией, отдельные ее стороны остаются недостаточно обоснованными, например реакции взаимодействия органических кислот с гумусовыми веществами.

Крайне мало сведений и о продуктах взаимодействия НМОК с ГС почв. В качестве объекта исследования выбрана щавелевая кислота, являющаяся типичным аналогом НМОК. Эта кислота относится к полидентатным лигандам, поскольку она образует с ионами металлов **хелатные комплексные соединения** (комплексобразователь связывается лигандом сразу в двух точках), которые, как правило, легко растворяются в воде и весьма устойчивы. Выбор щавелевой кислоты обусловлен также необходимостью установления возможного **эффекта «лиганд – лигандного взаимодействия»** при ее сорбции дерново-карбонатной почвой «Каргопольской суши» Архангельской области.

Образцы дерново-карбонатной выщелоченной среднесуглинистой почвы отбирали в июле на стационаре «Каргопольский» Архангельской области в смешанном лесу. *При детальной почвенной съемке изучали почвенный покров, морфологию, гранулометрический состав и химические свойства почв* стационара. Состав гумуса дерново-карбонатной почв, широко распространенных на древней в земледельческом отношении территории «Каргопольской суши», исследовали по методу Тюрина-Пономаревой. Содержание углерода ВОВ в растворах определяли по методу Тюрина (аликвоты были предварительно упарены досуха на водяной бане). Компоненты ВОВ идентифицировали с помощью бумажной распределительной хроматографии и по соответствующим методикам.

Сорбцию щавелевой кислоты почвой (гор. А<sub>1</sub>) изучали в статике методом переменных концентраций (В.В. Рачинский, 1964, 1981).

Выявлена активная мобилизация в раствор интенсивно окрашенных гумусовых соединений. Определены не только количественные закономерности сорбции НМОК почвой, но и состав новообразованных гумусовых соединений.

2. *Фракционно-групповой состав гумусовых веществ почв.* Дерново-карбонатные почвы (табл. 23) имеют гуматно-фульватный состав гумуса, в котором, несмотря на преобладание гуминовых соединений, содержится значительное количество и фульвосоединений. Характерно, что и в лесной,

и в старопахотной дерново-карбонатной почве группа гуминовых веществ в основном представлена фракциями органических веществ, предположительно связанными с ионами кальция и свободными (так называемыми бурыми) гуминовыми кислотами. Сравнение этой информации с аналогичной по подзолистой почве показывает, что в последней преобладает фракция свободных (бурых гуминовых кислот). В составе гумуса по всему почвенному профилю доминируют фульвосоединения, в частности компоненты фракции **1a**, которым свойственна тенденция к активной внутрипочвенной миграции.

В старопахотной дерново-карбонатной почве гуминовые вещества преимущественно представлены фракцией, связанной с кальцием. Среди фульвосоединений преобладают компоненты 3-й фракции, в горизонте **В<sub>ca</sub>** заметна аккумуляция органических веществ фракции **1a**, наиболее химически активных и подвижных в почвах таежной зоны.

**4. Особенности взаимодействия водных растворов НМОК с почвой.** В опытах использовали 0,08 и 0,25-мольные водные растворы щавелевой кислоты (ч. д. а.). Соотношение реагирующих масс почвы и органической кислоты составляло 1:3, время взаимодействия – 5 сут (табл.23). Новообразованные темно-бурые растворы ВОВ отфильтровывали на стеклянной воронке с двойным беззольным бумажным фильтром и определяли концентрацию углерода ВОВ (сумму веществ:  $H_2C_2O_4$ , не сорбированную почвой, и часть органических соединений, мобилизованных в раствор). Специальные опыты по определению содержания органического углерода в водных растворах щавелевой кислоты показали, что последние перед упариванием необходимо нейтрализовать избытком раствора  $Ca(OH)_2$ . Но и в этом случае при выпаривании наблюдались потери  $H_2C_2O_4$  (до 12% исходной массы по углероду). Следует отметить, что **аминокислоты устойчивы к термодеструкции**. Более того, анализ возможных путей абиогенного формирования аминокислот показывает, что при нагревании в стерильных условиях водных растворов, **содержащих  $NH_3$  и  $H_2CN$** , а в других вариантах опытов – смеси формальдегида и гидроксилamina, образуются разнообразные аминокислоты (О.А. Мамченко, 1970).

Табл. 14. Статика сорбции щавелевой кислоты из водных растворов дерново-карбонатной почвой (И.М. Яшин, 1993).

| Исходная концентрация $H_2C_2O_4$ , моль/л | Масса почвы, г | Объем $H_2C_2O_4$ , взятой для сорбции, мл | рН растворов |             | Сорбция (по $C_{орг}$ ) $H_2C_2O_4$ почвой |      |
|--|----------------|--|--------------|-------------|--|------|
|  |                |  | исходных     | равновесных | мг   | %    |
| 0,08                                       | 50,0           | 150,0                                      | 1,16         | 3,20        | 122,5                                      | 41,7 |
| 0,25                                       | 50,0           | 150,0                                      | 1,02         | 2,58        | 702,9                                      | 71,8 |

Состав новообразованной смеси  $H_2C_2O_4$  + ВОВ определяли путем последовательного фракционирования на колонке с активированным углем, а затем (после упаривания аммиачного элюата) на системе гелей –

*декстрана*. Установлено нехарактерное для активированного угля значение сорбции новообразованной смеси ВОВ, несмотря на благоприятную кислотность среды, достаточные массу и мощность защитного слоя сорбента, а также рациональную скорость фильтрации растворов (30 мл/ч).

В практике исследования состава ВОВ аналогичные факты наблюдались, например, при сорбции смеси органических веществ индивидуальной природы, каждый компонент которой неполно поглощался активированным углем (И.М. Яшин, 1973). Фильтраты после сорбции ВОВ на угле были прозрачными и бесцветными, но имели высокую концентрацию углерода ВОВ и очень низкие значения pH (табл.14).  $H_2C_2O_4$  отделяли от новообразованных ВОВ путем промывания поглотителя (активированного угля) в колонке 90% водным ацетоном и водой. Перед этим сорбент и поглощенные ВОВ промывали 1 н. раствором  $H_2SO_4$  и водой для перевода оксалата кальция в кислоту с последующей десорбцией из сорбентов ионов  $Fe^{3+}$  и  $Ca^{2+}$ . Напомним, что при количественном определении НМОК хроматографическим методом диагностируются лишь кислотные формы. Соли органических кислот на бумажных хроматограммах практически не обнаруживаются.

Табл. 15. **Фракционирование новообразованной смеси  $H_2C_2O_4$  почвенные ВОВ на активированном угле в динамике (И.М. Яшин, 1993)**

| Исходная молярная концентрация $H_2C_2O_4$ , моль/л | Введено в колонки углерода ВОВ, мг | Содержание в фильтрате, мг | Сорбция |      | Вытеснено, мг       |                    | pH фильтрата |
|---|------------------------------------|----------------------------|---------|------|---------------------|--------------------|--------------|
|   |                                    |                            | мг      | %    | 90% водным ацетоном | 2% водным аммиаком |              |
| 0,08  | 171,5                              | 121,2                      | 50,3    | 29,3 | 36,4                | 13,4               | 2,75         |
| 0,25  | 274,6                              | 157,0                      | 117,6   | 42,8 | 88,8                | 28,5               | 2,20         |

Темно-бурые аммонийные элюаты ВОВ, полученные с активированного угля, упаривали досуха при температуре  $\sim 36^\circ C$ , растворяли в дистиллированной воде и фракционировали через сутки **на гелях сефадекса G-10 и G-50**. Установлено, что новообразованные ВОВ (десорбированные в раствор из почвы щавелевой кислотой) представлены в основном компонентами с низкой молекулярной массой ( $MM < 700$ ), которые при фракционировании на геле G-10 образовывали 2 фракции.

Преобладающая фракция активно удерживалась **матрицей геля G-10** и элюировалась из его массы лишь щелочным раствором. **Через 7 сут** вновь повторяли фракционирование исходной фракции ВОВ, регенерировав гель-декстрана. В этом эксперименте *аммонийная фракция новообразованных ВОВ на G-10 не разделилась и вышла со свободным объемом*, т.е. «вела себя» как органические вещества с молекулярной массой  $>700$  а.е.м., что, очевидно, обусловлено эффектом ассоциирования компонентов ВОВ в водных растворах при наличии в молекулярных структурах органических веществ ионов  $Ca^{2+}$  и  $Fe^{3+}$ . Это не противоречит сведениям по химии комплексных соединений, согласно которым характерной особенностью, например, хелатных соединений в водных растворах является образование



циклических групп атомов (и молекул), включающих и прочно удерживающих те или иные ионы металла во внутренней или внешней сфере комплексного соединения.

Для проверки этого факта в растворах определяли концентрацию и **формы железа** (табл. 16). Установлено, что железо в растворах находится преимущественно в форме водорастворимых *устойчивых органо-минеральных соединений*. Ионы железа, находящиеся в молекулярных структурах ВОВ, маскируются различными органическими лигандами, у них изменяется валентность, и они теряют присущие простым ионным формам неблагоприятные для растений свойства. **Своеобразие поведения железа** в почвах таежной зоны обусловлено не только чрезвычайно активной трансформацией его групп и форм при взаимодействии с ВОВ в условиях периодического изменения режима увлажнения и фильтрации почвенных растворов, но и **формированием многоядерных аквакомплексов** типа  $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$  с последующей трансформацией в гид-

Табл. 16. Содержание и формы железа группах ВОВ, десорбированных из почвы водным раствором  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$  (И.М. Яшин, 1993).

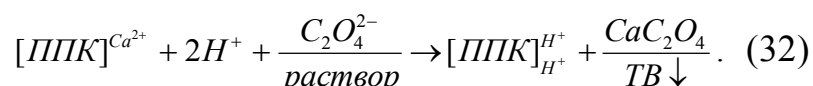
| Исходная молярная концентрация $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ , моль/л | Fe общее, мг/л            |                             |                        | Железо, прочно связанное компонентами ВОВ, % |                      |                 | В фильтрате при сорбции исходного раствора ВОВ углем, мг/л |
|--|---------------------------|-----------------------------|------------------------|--|----------------------|-----------------|--|
|  | исходный р-р ВОВ из почвы | водо-ацетонный элюат с угля | аммиачный элюат с угля | исходный р-р ВОВ из почвы                    | водо-ацетонный элюат | аммиачный элюат |  |
| 0,08   | $\frac{3,1}{4,9}$         | $\frac{0,8}{1,5}$           | $\frac{2,0}{3,4}$      | 63,3   | 53,3                 | 58,8            | нет  |
| 0,25   | $\frac{4,8}{7,1}$         | $\frac{1,5}{2,6}$           | $\frac{2,9}{4,2}$      | 67,6   | 57,7                 | 69,0            | 0,3  |

Примечание. Числитель – до разрушения, знаменатель – после разрушения ВОВ 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$ .

розоль  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Аквакомплексы (аквакатионы) образуются, в частности, при протонировании гидроксокомплексов благодаря донорным свойствам воды:

$[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5\text{OH}]^{2+} + \text{H}^+ \rightarrow [\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ . Эти соединения обладают ярко выраженными коллоидными и сорбционными свойствами как в отношении групп ВОВ, так и применительно к простым и сложным неорганическим ионам. В результате реакций сорбционного комплексообразования в системе  $\text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{ВОВ}$  могут образовываться вторичные водорастворимые и нерастворимые железо-органические соединения. Здесь требуются дополнительные изыскания.

**Поведение железа в дерново-карбонатных почвах**, насыщенных щелочноземельными основаниями, отличается большим своеобразием, чем в почвах подзолистого типа, что видно из реакции:



Эта реакция протекает активно, поскольку резко сдвинута вправо – в сторону формирования **труднорастворимого оксалата кальция**, выпадающего в осадок на почвенных частицах. Обменно вытесненный из почвы кальций нейтрализует значительное количество органической кислоты, связывая ее в неактивную форму осадка. Ионы гидроксония ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ), поглощенные почвой, способствуют изменению устойчивости химических соединений и переводу их в кислотную форму. При некотором избытке реагента в среде происходят более радикальные превращения гумусовых веществ и органно-минеральных продуктов, сопровождающиеся комплексообразованием и мобилизацией ВОВ в растворимое состояние (И.М. Яшин, 1993).

Таким образом, абиогенное химическое влияние щавелевой кислоты на гумусовые соединения почвы можно рассматривать с точки зрения реакций протонирования (включая и обменное вытеснение кальция ионами водорода из почвы при диссоциации  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$  и перевод его в осадок) и сорбционного комплексообразования с ионами металлов (прежде всего с **железом**), входящих в молекулярные структуры этих соединений, а также **лиганд-лигандного взаимодействия**, сопровождающегося сорбцией части молекул  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$  и некоторой мобилизацией в растворимое состояние нативных гумусовых веществ преимущественно фульватного состава. Незначительная мобилизация ВОВ обусловлена защитной ролью сорбционных слоев (пленок), образующихся при формировании осадка, состоящего из оксалата кальция, который является одним из важных продуктов реакции.

Вызывая **трансформацию химических соединений почвы**, щавелевая кислота в последующих циклах взаимодействия снижает свою активность, а  $\text{CaC}_2\text{O}_4$  стабилизирует в почве обновленные структуры гумусовых веществ. Не исключено, что подобная стабилизация коллоидов почвы в агрогенетическом плане может оказаться более эффективной и целесообразной по сравнению с аналогичной стабилизацией, вызванной ионами кальция, как, например, при известковании освоенных почв подзолистого типа.

*С микробиологической точки зрения оксалат кальция – ценный источник углерода, энергии и крайне необходимого в условиях таежной зоны кальция. Поэтому не исключены биodeградация  $\text{CaC}_2\text{O}_4$  и включение ионов  $\text{Ca}^{2+}$  в новые циклы реакций с образованием иных продуктов.*

Процессы взаимодействия ВОВ с почвенными минералами (стадийные и циклические) чрезвычайно сложны, поскольку, с одной стороны под влиянием воды, углекислоты и компонентов ВОВ происходят реакции растворения, гидратации и кислотного гидролиза, сорбция и десорбция, осадкообразование, а с другой – между новообразованными продуктами также протекают разнообразные физико-химические реакции. Поэтому дифференцированно исследовать эти процессы в природе трудно даже с использованием радиоактивных изотопов. Решается подобная задача **путем поэтапного моделирования**. В частности, с помощью модификации метода

сорбционных лизиметров (в условиях натурального модельного опыта) изучены сезонные процессы трансформации растительных осадков и формирования групп гумусовых соединений. Выявлены особенности превращения очищенных гидрогелей  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  и гуминовых кислот, а также порошка доломита, широко используемого для известкования почв подзолистого типа (И.М. Яшин, И.С. Кауричев, В.А. Черников, 1996).

*Исключительно важная роль в процессах современного почвообразования и выветривания минералов принадлежит воде, являющейся основным компонентом почвенных растворов. Своеобразие воды в природе обусловлено структурным состоянием жидкости, специфика которого до сих пор не раскрыта. Теория рассматривает воду в жидком состоянии как совокупность молекул в форме *мерцающих кластеров* – неоднородных участков с высокоразвитыми водородными связями. Аномальные свойства воды, образующей природные растворы, обусловлены ее высокой диэлектрической постоянной и самым большим из всех жидкостей поверхностным натяжением  $\sim 73 \text{ эрг}\cdot\text{см}^{-2}$ . Молекулы воды для кислот являются не только растворителем, но и основанием: появляющиеся при диссоциации кислот в почвенных растворах ионы  $\text{H}^+$  взаимодействует с  $\text{H}_2\text{O}$ , формируя новый ион (гидроксоний) –  $\text{H}_3\text{O}^+$  (Г. Фрэнк и В. Вэн). В почвах вода выполняет *многообразную функциональную роль: выступает и средой (в почвенных растворах реакции идут наиболее активно)*, и химическим реагентом, обуславливая возможность реакций растворения, гидратации, гидролиза, формирования комплексных неорганических соединений и органно-минеральных продуктов. Гидрофильные почвенные коллоиды (преимущественно органические соединения и ортокремниевая кислота) в воде интенсивно гидрофилизируются, а в кислой и щелочной областях рН становятся агрегативно устойчивыми в растворах. В водной среде происходит сорбционно-десорбционное (межфазное) перераспределение новообразованных веществ, например мелиорантов и тяжелых металлов, часть которых закрепляется тем или иным почвенным горизонтом. Длительное избыточное накопление воды в почве приводит к развитию *анаэробнозиса*, сопровождающегося радикальным изменением состояния органических и минеральных соединений. В зимний период, переходя в твердое (кристаллическое) состояние, вода оказывает мощное физическое (в частности, расклинивающее) воздействие на компоненты почвы. **Промораживание** способствует дифференциации состава продуктов выветривания и почвообразования, находящихся в почвенных растворах. В твердую фазу (лед) переходит чистая или сравнительно слабо минерализованная вода, а в растворе остается более минерализованная, которая замерзает несколько позже при более низкой температуре. Переходя в парообразное состояние, вода ускоряет дегидратацию и коагуляцию коллоидов. Гидролиз поливалентных ионов ( $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  и  $\text{Mn}^{2+}$ ) прекращается. Активно формируются гидрогели гидроксидов железа и*

алюминия  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  и  $\text{Al}(\text{OH})_3$  и студнеобразные осадки  $\text{Si}(\text{OH})_4$ . Следовательно, основные состояния воды (не касаясь ее форм в почве) в природе, изменяясь по сезонам года, обуславливают характер и направленность трансформации веществ в растворах, а также специфику их миграции по профилю почв и в ландшафтах.

Ряд исследователей критически оценивают роль индивидуальных органических веществ фотосинтетической природы в почвенных процессах. Например, В.В. Пономарева (1964), обосновывая биохимические аспекты теории подзолообразования, считает, что легкая утилизация и незначительная концентрация данной группы веществ в подзолистых почвах не позволяют отнести их к активным кислотным реагентам, а ведущую роль в почвенных процессах таежной зоны **играют фульвокислоты**. Однако противопоставлять роль каждой из указанных групп ВОВ неправомерно: эти органические вещества представляют собой единый генетический ряд соединений (с взаимными переходными состояниями от ионно-молекулярного к ассоциативному, и биополимерному) на этапе трансформации растительных остатков в педогенные гумусовые вещества. Причем в подзолистых почвах подзон средней, северной и крайне северной тайги среди компонентов ВОВ, диагностируемых в лизиметрических водах из оторфованных лесных подстилок, преобладают низкомолекулярные органические вещества индивидуальной природы (И.С. Кауричев, 1965; И.М. Яшин, 1973, 1993).

**Масштабный эффект** того или иного процесса в момент наблюдения может маскировать другие (сопутствующие) микропроцессы, играющие в отдельные периоды современного развития почвы важную и своеобразную роль. Например, НМОК способны поглощать  $\text{CO}_2$  из почвенного воздуха и трансформироваться, что необходимо учитывать при изучении газового режима. Несмотря на низкие концентрации в почвенных растворах (по сравнению с содержанием гумусовых веществ), НМОК выполняют важные биохимические и физиологические функции: заметно снижают поверхностное натяжение растворов, улучшают смачиваемость гидрофобных соединений, в частности ГК, и активизируют почвенные микропроцессы.

Учитывая систематичность подобных реакций, их историческую длительность и участие ВОВ кислотной природы в почвообразовании, можно констатировать, что рассмотренный абиогенный механизм трансформации химических соединений почвы под влиянием щавелевой кислоты является, по существу, деградацией молекул гумусовых веществ; *не все компоненты ВОВ, следовательно, можно считать структурными фрагментами формирующихся гумусовых веществ*. Концепция гумусообразования требуют дальнейшего обоснования и уточнения. Напомним некоторые из них. Это «общая теория гумификации» Д.С. Орлова (1980), концепция «окислительного кислотообразования» Л.Н. Александровой (1980) и «конденсационная концепция гумусообразования»

М.М. Кононовой (1965). Данные концепции были созданы на *основе результатов модельных лабораторных опытов* и имеют познавательное значение. Они не рассматривают почву в качестве компонента экосистемы, а опыты были поставлены *не на полевых стационарах, а в лаборатории*. Более объективной и обоснованной является «*экологическая концепция таежного гумусообразования*», которая была разработана И.М. Яшиным, В.А. Черниковым и И.С. Кауричевым в 1996 году. К сожалению, специалисты Международного общества «гумусников» также широко используют при исследовании гумусовых веществ сильные химические реагенты, которых нет в экосистемах – минеральные щелочи и кислоты. В результате сложная система гумусовых веществ распадается на фрагменты. Целого представления о структуре гумуса получить не удастся. Нужно изменить методологию исследования на основе экологических принципов. Главный из них гласит: информацию следует добывать в почвах и экосистемах. Лабораторные опыты лишь дополняют и уточняют полученные результаты исследований на полевых стационарах. Специалисты Международного общества «гумусников» так увлеклись лабораторным исследованием гумусовых веществ, что стали стандартизировать выделяемые из почв группы гуминовых веществ. Забыв, что почвы и ландшафты – это динамичные биокосные системы, которые непрерывно развиваются в неравновесном пространстве-времени. Значит, через некоторое время свойства почв изменятся. Флуктуируют состав и структура гумусовых веществ. Стандартные образцы гумуса утратят свое реноме.

В реальных экологических условиях процесс гумусообразования также имеет свою динамику и связан с сопутствующими процессами. Например, процесс **оподзоливания под кронами хвойной растительности** развиваются в направлении как дегумификации (под кронами елей нет вообще гумусового горизонта, даже в Подмосковье), так и мобилизации в растворимое состояние из твердой фазы почв различных ионов металлов, формирования многообразных органоминеральных соединений, в частности, химически активных металлорганических комплексов. Причем они интенсивно включаются в биогеохимический круговорот. Химические соединения почв подзолистого типа декальцируются органическими кислотами ВОВ. Но сами органические кислоты обменным кальцием и ионами металлов  $Fe^{3+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  **не насыщаются** из-за дефицита щелочноземельных оснований в почвах, почвообразующих породах и природных водах. Поэтому в таежных ландшафтах мигрируют низкомолекулярные органоминеральные комплексные соединения, в той или иной мере обогащенные ионами железа, алюминия, марганца и тяжелыми металлами. *Важно заметить, что эти соединения, в отличие от гетерогенных солей, не разрушаются при миграции через почвенные горизонты и барьеры миграции пород.*

В дерново-карбонатных выщелоченных почвах циклы мобилизации и миграции ВОВ способствуют формированию мощного и высоко гумусированного профиля с обилием дресвы и мелкого щебня, состоящего из карбонатов кальция. *Поэтому подобные профили с трудом поддаются проходке.* Коллоидные формы гумуса в дерново-карбонатных почвах стабилизируются не только путем быстрых ионообменных реакций с **ионами кальция**, но и за счет образования **труднорастворимых осадков** при избытке обменно-поглощенного кальция. Это процесс так называемой осадочной сорбции ВОВ и фульвокислот. С экологической точки зрения прекращается потеря значительной массы ВОВ из почвенного покрова. Наряду с этим процессом, происходит *фракционирование* ВОВ при свободной фильтрации почвенных растворов. При этом сложные структуры ВОВ быстро осаждаются, а их более низкомолекулярные фракции – мигрируют в почве. Фракционирование ВОВ обусловлено неодинаковой сорбцией их компонентов: лучше сорбируемые вещества остаются в зоне сорбции, а плохо поглощаемые – выносятся из зоны сорбции. Причем гетерополярные формы солей при миграции могут разрушаться. Высвобождаемые органические кислоты вступают во взаимодействие с коллоидами, гумусовыми структурами и почвенными минералами. Так формируются *белесые (элювиальные)* горизонты в почвах тайги. Следовательно, *знание законов хроматографии* помогает полнее познать особенности функционирования почв таежной зоны.

### **Вопросы для самоконтроля.**

1. Назовите методы очистки поверхностных вод.
2. Охарактеризуйте методы дезинфекции поверхностных вод.
3. Объясните причины процесса опустынивания.
4. Назовите экологические риски, возникающие в экосистемах при опустынивании в южных регионах России.
5. Объясните генезис почв Юрьев-Польского ополья Ярославской области.
6. Объясните возможные причины преднамеренного завышения бонитета почв.
7. Назовите экологические риски в ландшафтах Среднего Поволжья, вызываемые масштабными пожарами.
8. Охарактеризуйте возможное наступление опустынивания в южных регионах России.
9. Объясните процесс деградации черноземов.
10. Что такое осолонцевание черноземов?
11. Какие типы почв распространены в Средиземноморской зоне Ливии?
12. Что такое процесс импальверизации?
13. Охарактеризуйте солевой профиль солонца.
14. Воздействие солей на черноземы.
15. Что происходит с гуматами и фульватами натрия?



## 7.9. Дегградация черноземов лесостепной зоны – причины и экологические следствия

Вновь обратимся к вопросу о дегградации черноземов. В литературе отмечено заметное снижение урожайности возделываемых культур (и оз. пшеницы), в частности, в Аткарском районе Саратовской области. Специалисты считают, что оно связано с возросшими экологическими рисками и снижением уровня плодородия почв. Еще в 1957 году И.С. Кауричевым и Н.Н. Поддубным была отмечена тенденция ухудшения почвенного плодородия и **дефицит продуктивной влаги** в черноземах. Они впервые составили крупномасштабную почвенную карту в М1:10 000, выполнили агрономическую оценку черноземов учхоза. Вместе с тем экологические риски для условий лесостепной зоны РФ охарактеризованы неполно, не отмечено активное засоление черноземов и подщелачивание реакции среды. Данные вопросы и будут рассмотрены нами дальше.

**Объектами изучения** были разные подтипы черноземов - в пойме р. Б. Колышлей, в степи, лесных дубравах - на плакоре, в полевых и сенокосных ландшафтах - на надпойменных террасах. Были исследованы чернозёмы выщелоченные и обыкновенные, лугово-чернозёмные грунтово-глееватые почвы и солонцы автоморфные (рис 39,40). При картировании почвенного покрова учхоза отмечено, что мезорельеф способствует пространственной дифференциации черноземов на подтиповом уровне, а микрорельеф определяет комплексность почвенного покрова с появлением почв солонцового ряда. В полевых ландшафтах выявить указанные особенности достаточно сложно, поскольку при распашке нарушается морфология верхних горизонтов. Поэтому нами почвенный покров исследовался с помощью маршрутных и стационарных методов, «ключей» и закладки катен в разных фациях, используя для сравнения целинные степные (залежные) и лесные участки. Миграцию водорастворимых форм гумусовых веществ изучали с помощью метода сорбционных лизиметров [рис. 41В]. Ключевые участки выбирали на топографической карте вдоль условной линии – от русла реки (в южном направлении) через пойму, надпойменные террасы к плакору коренного берега р. Б. Колышлей. Среди лабораторных методов применялись традиционные химические и физико-химические аналоги, например, хроматография, ионометрия и др. [9-14]. Поверхность почв плакоров локально сильнощебнистая – это продукты трансформации опок. Были заложены также полевой и лабораторный модельные опыты в учхозе «Муммовское» для изучения фильтрации воды (рис. 42А) в черноземе солонцеватом на плакоре (**гор. А<sub>1</sub>**) и оценки роли ионов натрия золь растений на мобилизацию в раствор и водную миграцию гумусовых веществ в форме гуматов и фульватов натрия (рис. 43).

\*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 11-04-01376, а также Правительства России - №11.G.34.31.0079.



**А**

**В**

Рис. 40. Эрозия активно выражена в ландшафтах Среднего Поволжья: **А** – размытый склон коренного берега р. Б. Колышлей, продукты эрозии ливневыми осадками выносятся в пойму; из-за эрозии гумусово-аккумулятивный горизонт в *черноземе выщелоченном* уменьшился с 48-62 см (в контроле) до 19-22 см на склонах; **В** – дипломник Осыкин Михаил изучает профиль **солонца черноземного** на плакоре под степной растительностью.



**А**

**В**

**С**

Рис. 41. Профили черноземов в **разных экосистемах** учхоза «Муммовское» Саратовской области: **А** – 1-я надпойменная терраса (сенокос) – чернозем обыкновенный; в профиле видна «**плужная подошва**»; **В** – пашня (посев кукурузы на з/к): профиль чернозема выщелоченного на 2-й надпойменной террасе реки Б. Колышлей; **С** – чернозем обыкновенный на 1-й надпойменной террасе (**лесополос**): профиль сильно иссушен до 89-94 см и переуплотнен с ярко выраженной *черной миграционной полосой* на границе с карбонатно-кальциевым барьером миграции (фото И.М. Яшина, 2012).

хроматография, ионометрия и др. [9-14]. Поверхность почв плакоров локально сильнощебнистая – это продукты трансформации опок.

Были заложены также полевой и лабораторный модельные опыты в учхозе «Муммовское» для изучения фильтрации воды (рис. 42А) в черноземе солонцеватом на плакоре (гор. А<sub>1</sub>) и оценки роли ионов натрия золы

растений на мобилизацию в раствор и водную миграцию гумусовых веществ в форме гуматов и фульватов натрия (рис. 43).

Рассмотрим результаты исследований. Изучаемые ландшафты учхоза расположены на плакорах и в долине реки Б. Колышлей. Абсолютные отметки местности 178-224 м над у.м. Гранулометрический состав черноземов на надпойменных террасах супесчаный и отличается высоким содержанием фракции песка. По западинам развиты лугово-черноземные почвы, имеющие средне- и тяжелосуглинистый состав. Подстилающие породы четвертичного возраста генетически взаимосвязаны с почвообразующими (лессовидными карбонатными суглинками) и представлены известняками и опоками мелового периода, часто засоленными, сильно ожелезненными. Песчаные древнеаллювиальные отложения надпойменных террас перемежаются с дериватами и каменистым элювием осадочных пород морского генезиса. Опоки в породах доминируют на участках 2-й надпойменной террасы и коренного берега р. Б. Колышлей; *они морфологически похожи на известняковые образования, но не вскипают от 10% HCL*. Засоленные породы залегают на глубине 1,7-2,7 м и оказывают существенное влияние на процессы почвообразования, вызывая засоление и осолонцевание черноземов при усиливающейся аридизации климата и постепенном опустынивании степных ландшафтов. Об этом свидетельствуют данные Аткарской метеорологической станции: средняя годовая температура воздуха  $+4,3^{\circ}\text{C}$ , а количество осадков – 420 мм, атмосферная засуха сочетается с иссушением чернозёмных почв на значительную глубину при высоких температурах почвы, что сказывается на запасах влаги, продуктивности севооборотов учхоза, масштабной восходящей миграции водорастворимых солей при выпотном водном режиме летом и длительном периоде с температурой воздуха  $+32\dots+37^{\circ}\text{C}$ . При этом возможен эоловый привнос легкорастворимых солей пыльными бурями из Прикаспийской низменности и Средней Азии с солончаков [12].

*Растительность ландшафтов учхоза* - типичная для лесостепи. Лесные массивы представлены дубравами с клёном, липой, березой, осиной под хорошо развитым луговым разнотравьем и степными сообществами трав. В подлеске встречаются орешник, бересклет, крушина и др. Кустарники широко распространены как в пойме реки, так и по склонам плато: бересклет бородавчатый, вишня, тёрн, калина, крушина. Фации древесных пород (березняки и сосняки) и кустарников сильно пострадали от засухи 2010 г. Травянистые ассоциации представлены *разнотравно-ковыльно-типчачковыми и типчачково-ковыльными* (на плакоре коренного берега) сообществами; в пойме реки доминирует луговое разнотравье на аллювиальных и лугово-черноземных грунтово-глееватых почвах. Данные ассоциации растений формируют большую биомассу (укос составил  $1,8-2,4\text{ кг/м}^2$  зеленой массы), в которой доля корней составляет 67-78%, поэтому нативные чернозёмные почвы с лугово-степной растительностью имеют высокую биологическую

активность, а процесс чернозёмообразования в них дополняется грунтовым оглеением мелкозема (глубина залегания грунтовых вод - 154 см), что лимитирует выращивание в пойме плодовых культур. Увеличение в учхозе



А

В

Рис. 42. А – дипломник Гусаим Роман – крайний слева - изучает фильтрацию воды в черноземе солонцеватом (опушка дубравы, плакор); В – аспирант Петр Кузнецов (справа стоит в профиле) устанавливает сорбционные лизиметры для изучения миграции веществ в лугово-черноземной почве (пойма р. Б. Колышлей, луг - 2006).

стада крупного рогатого скота (КРС) с 264 голов в 2006 г. до 940 в 2012 г. привело к большой экологической нагрузке на пойменные экосистемы: растительная биомасса и разнообразие видов трав уменьшились, а в наземном покрове появились виды, не поедаемых животными – чертополох, лютики в притеррасной пойме и др. В микрорельефе отмечено много выбоин, рытвин, кротовин; антропогенная деградация почв поймы приведет к дегумификации и уменьшению запасов гумуса. Недостаток грубых и сочных кормов скажется на урожаях и качестве молока.

*Морфология профиля чернозёмов обыкновенных* (нередко солонцеватых рис. 40В), приуроченных к надпойменным террасам (и плакорам), отличается небольшим гумусово-аккумулятивным горизонтом (в среднем 34-47 см), супесчаным и легкосуглинистым гранулометрическим составом. Структура мелкозема горизонта  $A_1$  непрочно комковато-пылеватая; в нем часто выражена плотная «плужная подошва» в пределах 17-24 см. Вскипание от 10% НСЛ – под гор.  $A_1$  – в  $B_{ca}$ . Форма карбонатов кальция – белоглазка.

*Морфология выщелоченных чернозёмов (рис.41В)* имеет ряд иных особенностей: более мощные (не деградированные, в среднем **48-62 см**) гумусовый горизонт, ионы кальция выщелочены горизонта **AB** (горизонта гумусовых затеков). В лесных парцеллах плакоров (дубравы и березняки) профили данных почв обычно заметно трансформированы сурками, кротами и иными почвенными животными. Поэтому почвенные образцы здесь нужно отбирать не буром, а только лопатой. Иначе в гумусовом горизонте можно обнаружить и соли, и  $CaCO_3$ , что негативно скажется на диагностике подтипа чернозема. В агроландшафтах выщелоченные чернозёмы занимают ложбины стока и понижения на 1 и 2-й надпойменных террасах. Здесь они образуют комплексы с лугово-черноземными грунтово-глееватыми почвами.



Последние имеют гумусово-аккумулятивный горизонт мощностью 117-143 см, слабо дифференцированный на педы. Весной и осенью в понижениях рельефа надпойменных террас образуются вымочки и верховодка. Поэтому такие участки лучше отвести под древесно-кустарниковые «колки» - не распахивать: здесь будут выходы родников, места гнездовья птиц и лежки зверей. *Это будет началом природоохранной (ландшафтно-экологической) организации территории учхоза.*

Профиль солонца черноземного характеризуется наличием следующих контрастных по генезису и часто очень плотных горизонтов:

- **A<sub>1</sub>EL** гумусово-элювиальный (*над солонцовый*),
- **B<sub>1</sub>** иллювиальный (*солонцовый* с ионами Na<sup>+</sup> - более 5% от емкости поглощения), водоупорный, очень плотный, призматический по структуре,
- **B<sub>2gca</sub>** *под солонцовый*, заметно огленный по микро понижениям,
- **BC<sub>casl</sub>** переходный к почвообразующей породе (слабо- и средне засоленный),
- **C<sub>caslg</sub>** засоленная почвообразующая порода (и оглеенная по понижениям).

Солонцы чернозёмные (автоморфные) и полугидроморфные средне- и тяжелосуглинистые распространены локально (небольшими «пятнами»). Они обычно входят в состав двучленных почвенных комплексов с черноземами обыкновенными солонцеватыми. Залегают солонцы в небольших бессточных понижениях на *1-й надпойменной террасе* (занимая блюдца, потяжины). На пашне они диагностируются по глыбистой структуре (при зяблевой вспашке на поверхность почвы выпаживаются крупные глыбы очень плотного гор. A<sub>1</sub>EL, B<sub>1</sub>), а также по свойствам (табл. 17).

В «плужной подошве» черноземов отмечается слитость и сезонное оглеение. В этих условиях из наземных и корневых растительных остатков в раствор мобилизуются низкомолекулярные органические кислоты, влияющие как на трансформацию высокомолекулярных гуминовых веществ, так и на кислотность черноземов: отмечаются участки со слабокислой реакцией. При оглеении также активно развиваются микроскопические плесневые грибы, которые продуцируют органические кислоты и *микотоксины, являющиеся суперэкотоксикантами*. Микотоксины из почв попадают в сено при его заготовке; плесневые грибы особенно при плохой просушке сенажа могут вызвать гибель животных – лошадей, коров, овец. Превентивные меры связаны с экологической безопасностью почв – уничтожением «плужной подошвы» и улучшением аэрации почв. Органические кислоты (наряду с иными компонентами корневых выделений растений) обуславливают локальную трансформацию гуминовых веществ и появление химически активных фульвокислот, а также подвижных органоминеральных комплексных соединений Fe, Ca при сезонном переувлажнении, что и наблюдается на отдельных участках. Следует подчеркнуть, что подкисление протекает в черноземах при насыщенности поглощающего комплекса ионами кальция, поэтому общее подкисление почвенной массы гор A<sub>1</sub> не происходит: оно возможно на уровне педов.

Органические кислоты и фульвокислоты переходят в солевые формы и быстро утрачивают химическую активность [3,5,811].

Наряду с кислотами в трансформации гумуса и почвенных минералов черноземов *важнейшая роль принадлежит ионам натрия и магния*. Катионы щелочных и щелочноземельных оснований интенсивно поступают в верхние горизонты черноземов за счет *2-х процессов*. *Первый* – за счет миграционных восходящих потоков из засоленных пород в летние жаркие месяцы: поверхность почвы, не защищенная растительностью, например, на «чистых парах» нагревается до  $70^{\circ}\text{C}$ . Движущими силами восходящих потоков ионов солей в черноземах и солончаках агроландшафтов учхоза являются градиенты температуры, концентрации и всасывающего давления почвенной влаги. Самых верхних горизонтов почв достигают только нейтральные соли –  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Сульфаты при анаэробии в «плужной подошве» трансформируются с участием сульфатредуцирующих бактерий сначала в  $\text{Na}_2\text{S}$ , а затем в сульфиды  $\text{Fe}$ ,  $\text{Mn}$ . Поэтому цвет горизонта «плужной подошвы» *интенсивно черный*, а срезы педов – стальной окраски. Избыток ионов кальция в черноземах обыкновенных способствует переводу анионов *фосфорной кислоты* в труднодоступные трехкальциевые фосфаты; поглощение ионов калия растениями в этих условиях заметно снижается. *Второй* – после засух и масштабных пожаров. Известно, что луговая и особенно степная растительность накапливают значительное количество  $\text{Si}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Na}$ ,  $\text{K}$ . После пожаров на поверхности почв образуются небольшие по мощности слои золы растений. При выпадении дождей оксиды щелочей и щелочноземельных катионов претерпевают гидратацию, превращаясь в гидроксиды металлов –  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{KOH}$ ,  $\text{NaOH}$ , то есть в естественный щелок



А

В

Рис. 43. Модельный лабораторный опыт по изучению влияния **катионов  $\text{Na}^+$**  золы растений (после пожаров) на мобилизацию в раствор и водную миграцию *гуматов и фульватов натрия* в образце чернозема выщелоченного: **А** - начало эксперимента и **В** – активная фаза опыта - пептизация гумусовых веществ катионами  $\text{Na}^+$  и их водная миграция в форме натриевых солей (фото И.М. Яшина, 2012).

с рН 13,5 [12]. Для проверки данной рабочей гипотезы и был поставлен простой модельный опыт (рис. 43А и В). В широкой и короткой жесткой



пластиковой колонке *снизу – вверх* последовательно располагались *стационарные слои* чистого кварцевого песка, слой почвы (из гор. А<sub>1</sub> выщелоченного чернозема), вновь слой песка и 3мм слой золы растений. Для дренажа дно колонки имело 7 отверстий диаметром 0.7 мм и два слоя капроновой ткани. В колонку периодически доливали воду по 15-20 мл. При взаимодействии воды с оксидами щелочных металлов золы растений, образуются щелочные растворы по схеме:



При миграции щелочей катионы натрия замещают обменно поглощенные катионы Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup> чернозема, приводят к пептизации гумусовых веществ. Затем наблюдается их нисходящий вынос *в форме натриевых солей* при добавлении в колонку новых порций воды. «Пальчатая» фильтрация бурых коллоидных растворов началась *через 3,2 час.* и продолжалась весьма медленно **37** часов. Было собрано **157** мл гидрозолей гумусовых веществ. Затем фильтрация и «потеря» гумусовых веществ из образца прекратились. Подкислив полученный фильтрат до pH 1,5, наблюдали формирование бурых хлопьев гуминовых веществ, которые через 1,4 часа *полностью выпали в осадок* (это высокомолекулярные гуминовые кислоты - ГК), а в растворе находились фульвокислоты (ФК). Аналитически определив С<sub>орг.</sub>, было установлено, что на долю ГК приходится 71% С<sub>орг.</sub>, а на долю ФК – 29%.

Таким образом, после длительных засух и пожаров при последующем выпадении дождей возможна трансформация оксидов металлов золы растений, образование щелочных растворов, взаимодействие катионов натрия с гумусовыми веществами, формирование натриевых солей гумусовых веществ и их водная миграция (перераспределение) в профиле черноземов. С этим явлением, на наш взгляд, и *связан один из феноменов черноземов* – их мощный гумусовый горизонт, в частности, в выщелоченном черноземе и лугово-черноземной почве. До сих пор глубина гумусового горизонта черноземов трактуется специалистами по корням растений [3,5].

*Насколько глубоко могут проникать атмосферные осадки* в гор.А<sub>1</sub> чернозема солонцеватого и попадать в сорбционный лизиметр, показали результаты другого опыта на опушке дубравы (рис. 42А). На фронтальной стенке почвенного разреза была выкопана площадка примерно 1 м<sup>2</sup> с бортиками 15-17 см. Моделировались условия ливневого выпадения атмосферных осадков массой 30 мм. Известно, что 1 мм осадков на 1 га соответствует 10 т воды, а на 1 м<sup>2</sup> поступит 1 л. При 30 мм ливневых осадков приход составит 30 литров или 3 ведра. На плакоре, под разнотравьем, бокового стока влаги не отмечено. *Никаких водоудерживающих колец, как это принято, мы не ставили (в природе этого нет)*. Воду в почвенный лоток приливали по мере ее впитывания почвой. Результаты опыта показали, что вначале происходит активное впитывание воды, фильтрация практически отсутствовала: создавался фронт миграции. Затем, по мере насыщения порового пространства и создания напора была отмечена фильтрация до глубины 18-21см. Сорбционный лизиметр с сухим кварцевым песком (на

глубине 15см) увлажнился полностью, что подтвердило возможность функционирования таких устройств в условиях лесостепи на черноземах. *Но все же колонки перед закладкой в профиль лучше сильно увлажнять.*

Химические свойства черноземов и солонцов черноземных. Для этих почв характерны супесчаный и легкосуглинистый гранулометрический состав, повышенное содержание в мелкозёме иллювиального горизонта  $\text{CaCO}_3$ , большая в сравнении с лёссами плотность, невысокая пористость, заметный дефицит доступных форм фосфора. Состав гумуса у черноземов фульватно-гуматный [5,11,19-22]. Чернозёмы обыкновенные не имеет следов выщелоченности ионов кальция: скопления  $\text{CaCO}_3$  могут быть диагностированы и в гор.  $A_1$ , что указывает на восходящую миграцию. В отличие от выщелоченного подтипа, обыкновенные чернозёмы отличаются менее мощным профилем, ионы  $\text{Ca}^{2+}$  активно подтягиваются при восходящей миграции в гумусовый горизонт из гор.  $V_{\text{ca}}$ , поэтому актуальная кислотность здесь чаще всего варьирует в пределах 6,7-7,5 - от близко к нейтральной до слабо щелочной. При агрохимическом обследовании на эти генетические особенности обязательно следует обращать внимание, поскольку часто не учитываются восходящие потоки катионов  $\text{Ca}^{2+}$ , ионов легкорастворимых солей ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), коллоидов Fe, гумусовых веществ, а исследуют свойства только пахотного слоя почвы, получая неполную информацию. Свойства почвы нужно изучать в пределах всего профиля, а не одного горизонта [12-15]. Процесс подщелачивания черноземов пока также не анализируется, не выяснены и генетические причины данного явления.

В этой связи уместно обратиться к В.В. Докучаеву и П.А. Костычеву. Они по-разному относились к оценке водной миграции гумусовых веществ в черноземах. Так, Костычев П.А. [цит. по 1], развивавший аграрное направ-

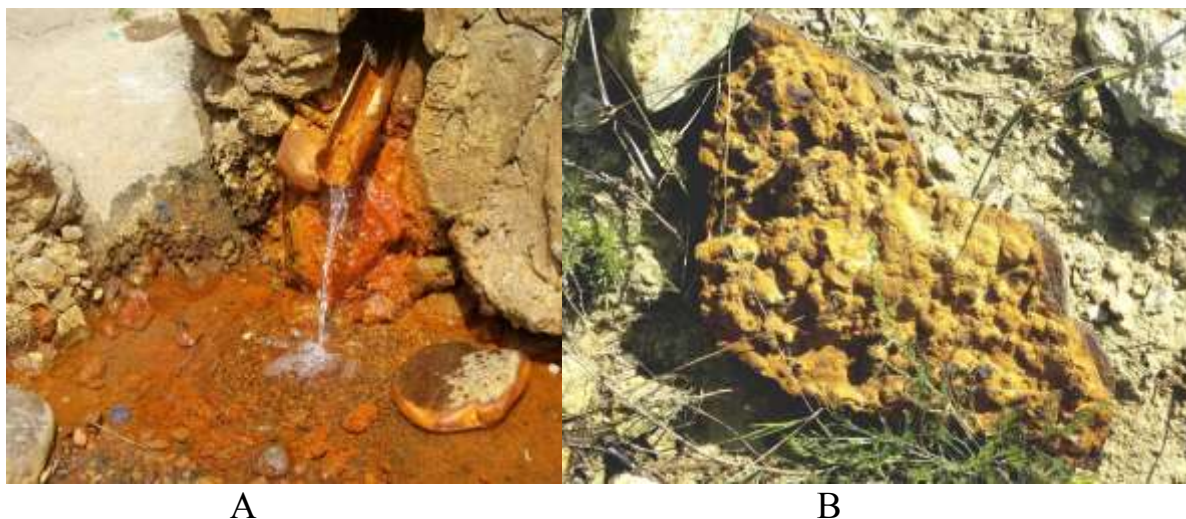


Рис. 44. **А** - соединения железа в родниковой воде; **В** – щебень и куски опок покрываются прочной охристой коркой (таких микро слоев много) за счет активного поглощения миграционных форм железа; здесь же скапливаются железобактерии, трансформирующие  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  – фото И.М. Яшина (2012).

ление при изучении почв, *категорически отрицал водную миграцию органических веществ в черноземах*. Он был оппонентом В.В. Докучаева, заложившего основы фундаментального почвоведения. Но уже в 1973 году нами с помощью метода сорбционных лизиметров (сорбент – активированный уголь) была доказана миграция органических лигандов в черноземах Тамбовской области [9]. Позже этот факт подтвердили Поддубный Н.Н. и Надежкин С.М. [цит. по 12; 3].



**А**

**В**

Рис. 45. **А** – профиль не деградированного чернозема с карбонатно-кальциевым барьером миграции под горизонтом «гумусовых затеков»; **В** – профиль деградированного чернозема с хроматограммой деградации гумусовых веществ на склоне коренного берега реки в учхозе «Муммовское» Саратовской области; **глубже гумусового горизонта**, в слое белесого кварцевого песка, заметны продукты трансформации гумусовых веществ в форме оксигидратов железа с участием ионов натрия, а гумусовые вещества биodeградируются микроорганизмами (фото И.М. Яшина, 2012).

На рис.45В представлены фото *природной хроматограммы* в профиле деградируемого чернозема. Она образовалась при деградации гумусовых веществ при их водной миграции в слое кварцевого песка (древнего аллювия) в форме натриевых солей. *На наш взгляд, после формирования мигрантов (гуматов и фульватов натрия при осолонцевании черноземов) следующей стадией трансформации продуктов дегумификации является биodeградация молекулярных структур указанных мигрантов с высвобождением железо-органических комплексных соединений. Последние, мигрируя при хорошей аэрации в слое белесого песка, полностью разрушаются микроорганизмами, а*

Табл.17. Химические свойства черноземов учхоза "Муммовское" Саратовской области за 2012 г.

| №<br>п/п  | №<br>разреза,<br>угодье                | Генет.<br>Горизонт<br>почв | Глубина<br>взятия<br>образца,<br>см | ЕС,<br>электро<br>провод.,<br>мСм/м | рН <sub>н2о</sub><br>(1:5) | рН <sub>н2о</sub><br>(1:2,5) | Метод<br>Чирикова,<br>мг/кг   |                  | Метод Мачигина, мг/кг   |   |                | С <sub>орг</sub> , % | Нг          | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Na <sup>+</sup> |
|---|--|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------|---|---|----------------|----------------------|-------------|------------------|------------------|-----------------|
|   |  |                            |                                     |                                     |                            |                              | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (с<br>окислением<br>ГС) | H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup><br>(без<br>окисления<br>ГС) | K <sup>+</sup> |                      |             |                  |                  |                 |
|   |  |                            |                                     |                                     |                            |                              | мг-экв на 100 г почвы         |                  |   |   |                |                      |             |                  |                  |                 |
| 1   | 2                                      | 3                          | 4                                   | 5                                   | 6                          | 7                            | 8                             | 9                | 10  | 11  | 12             | 13                   | 14          | 15               | 16               | 17              |
| <b>Солонец черноземный глубоко столбчатый среднесуглинистый на засоленных породах</b> |  |                            |                                     |                                     |                            |                              |                               |                  |   |   |                |                      |             |                  |                  |                 |
| 1.  | 5я целина<br>– степь<br>- (плакор)     | A <sub>1</sub>             | 15-25                               | 0,72                                | 8,9                        | <b>8,0</b>                   | 66                            | 26               | <b>88</b>   | <b>61</b>   | 356            | 2,4                  | <b>0,42</b> | 28,7             | 4,8              | 1,2             |
| 2.  |  | B <sub>1Ca,Na</sub>        | 39-49                               | 0,89                                | 9,2                        | <b>8,7</b>                   | 80                            | 0                | <b>128</b>  | 13  | 215            | 0,7                  | 0,25        | 44,7             | 6,7              | 5,4             |
| 3.  |  | B <sub>2Ca,Na</sub>        | 67-77                               | 0,80                                | 9,3                        | 8,8                          | 88                            | 0                | 22  | 17  | 174            | 0,2                  | 0,23        | 33,4             | 7,9              | 6,2             |
| 4.  |  | B <sub>3Ca,sl</sub>        | 83-120                              | 0,88                                | 9,3                        | 8,7                          | 88                            | 0                | 28  | 11  | 192            | 0,3                  | 0,23        | 28,8             | 2,5              | 7,4             |
| 5.  |  | C <sub>Ca,sl</sub>         | 145-155                             | 1,00                                | 9,4                        | 8,8                          | 91                            | 0                | 4   | 1   | 297            | 0,4                  | 0,23        | <b>35,9</b>      | 4,4              | 9,1             |
| 6.  |  | D <sub>sl</sub>            | 210-220                             | 0,94                                | <b>9,6</b>                 | <b>9,3</b>                   | 50                            | 0                | 22  | 3   | 185            | 0,1                  | 0,23        | 13,2             | 1,8              | <b>14,5</b>     |
| <b>Чернозем выщелоченный легкосуглинистый на опоках и засоленных породах</b>          |  |                            |                                     |                                     |                            |                              |                               |                  |   |   |                |                      |             |                  |                  |                 |
| 7.  | 18я<br>опушка<br>дубравы -<br>(плакор) | A <sub>1</sub>             | 3-11                                |                                     |                            | <b>5,6</b>                   | 47                            | 30               | <b>232</b>  | <b>29</b>   | 143            | 3,9-4,1              | <b>5,61</b> | 16,3             | 4,9              | 0,7             |
| 8.  |  | A <sub>1</sub>             | 14-24                               |                                     |                            | 6,1                          | 45                            | 0                | <b>148</b>  | 26  | 134            | 3,3-4,5              | <b>3,63</b> | 21,5             | 5,1              | 0,5             |
| 9.  |  | AB                         | 37-47                               |                                     |                            | 6,4                          | 48                            | 1                | 47  | 19  | 147            | 1,8                  | 2,11        | 23,8             | 3,9              | 0,6             |
| 10.   |  | B <sub>1</sub>             | 59-69                               |                                     |                            | <b>6,9</b>                   | 43                            | 35               | 15  | 2   | 236            | 0,5                  | 1,60        | 21,5             | 4,2              | 0,9             |
| 11.   |  | B <sub>2</sub>             | 85-95                               |                                     |                            | 6,5                          | 41                            | 11               | 16  | 8   | 279            | 0,4                  | 1,18        | 37,4             | 5,8              | 0,6             |

|  |  |                      |         |      |            |            |     |            |            |            |     |            |             |             |     |             |
|--|--|----------------------|---------|------|------------|------------|-----|------------|------------|------------|-----|------------|-------------|-------------|-----|-------------|
| 12.  |  | C <sub>ca,sl</sub>   | 118-128 | 0,73 | <b>8,6</b> | <b>8,1</b> | 54  | 35         | 24         | 11         | 237 | 0,7        | 0,38        | <b>41,1</b> | 3,7 | 11,4        |
| <b>Чернозем обыкновенный легкосуглинистый на лессовидных карбонатных суглинках</b> |  |                      |         |      |            |            |     |            |            |            |     |            |             |             |     |             |
| 13.  | 19я залежь<br>(плакор)                 | A <sub>1</sub>       | 5-15    |      |            | 6,9        | 50  | 0          | <b>120</b> | <b>5</b>   | 162 | 3,4-4,0    | <b>4,42</b> | 32,6        | 5,9 | 0,4         |
| 14.  |  | AB <sub>sol</sub>    | 25-35   |      |            | 6,8        | 46  | 3          | <b>80</b>  | 14         | 202 | 2,0        | <b>3,33</b> | 27,2        | 3,4 | 1,4         |
| 15.  |  | B                    | 38-48   |      |            | 6,0        | 44  | 2          | 36         | 2          | 215 | 0,9        | 2,74        | 31,3        | 5,4 | 2,6         |
| 16.  |  | B <sub>2sol</sub>    | 100-110 |      |            | 7,7        | 47  | 0          | 22         | 6          | 86  | 0,2        | 0,91        | 34,7        | 4,3 | 3,2         |
| 17.  |  | B <sub>3sl</sub>     | 134-144 |      |            | 7,6        | 37  | 0          | 34         | 6          | 58  | 0,3        | 0,73        | 23,6        | 3,2 | <b>3,8</b>  |
| <b>Солонец черноземный средне столбчатый на засоленных породах</b>                 |  |                      |         |      |            |            |     |            |            |            |     |            |             |             |     |             |
| 18.  | 21я целина<br>(степь –<br>плакор)      | A <sub>1</sub>       | 3-13    | 0,88 | <b>8,7</b> | <b>8,3</b> | 62  | 14         | <b>57</b>  | 23         | 130 | 1,1        | 0,32        | 34,7        | 5,5 | 6,9         |
| 19.  |  | B <sub>1</sub>       | 24-34   | 0,77 | <b>9,0</b> | 8,4        | 56  | 20         | 49         | 2          | 0   | 0,9        | 0,25        | 39,1        | 6,3 | 1,5         |
| 20.  |  | B <sub>2ca,Na</sub>  | 46-56   | 0,75 | 9,1        | <b>8,7</b> | 61  | 4          | 16         | 17         | 91  | 0,4        | 0,23        | 47,2        | 7,1 | 13,4        |
| 21.  |  | BC <sub>Ca, Na</sub> | 69-79   | 0,61 | <b>9,2</b> | 7,7        | 59  | 0          | 13         | 18         | 89  | 0,4        | 0,52        | 33,2        | 5,4 | 7,3         |
| 22.  |  | BC <sub>Ca, Na</sub> | 93-103  | 0,84 | 9,1        | <b>8,8</b> | 64  | 2          | 24         | 15         | 97  | 0,3        | 0,23        | 41,2        | 4,3 | <b>16,7</b> |
| 23.  |  | C <sub>ca, sl</sub>  | 150-160 | 0,71 | <b>9,0</b> | <b>8,4</b> | 67  | 332        | 40         | 7          | 148 | 0,7        | 0,25        | <b>44,7</b> | 8,9 | <b>21,5</b> |
| <b>Чернозем выщелоченный легкосуглинистый на лессовидных карбонатных суглинках</b> |  |                      |         |      |            |            |     |            |            |            |     |            |             |             |     |             |
| 24.  | 25я пашня<br>кукуруза -<br>2-я терраса | A <sub>пах</sub>     | 0-18    |      |            | 6,3        | 246 | <b>362</b> | <b>362</b> | <b>303</b> | 326 | <b>3,5</b> | <b>2,74</b> | 27,6        | 5,1 | 0,1         |
| 25.  |  | A <sub>1</sub>       | 19-29   |      |            | 6,2        | 111 | <b>325</b> | <b>285</b> | <b>223</b> | 229 | 2,8        | 2,86        | 23,2        | 3,8 | 0,4         |
| 26.  |  | AB                   | 40-50   |      |            | 7,1        | 84  | 220        | <b>191</b> | <b>106</b> | 132 | 0,8        | 0,81        | 19,5        | 4,5 | 4,3         |

|   |   |                     |         |      |            |            |     |            |            |            |     |            |             |             |      |             |     |
|---|---|---------------------|---------|------|------------|------------|-----|------------|------------|------------|-----|------------|-------------|-------------|------|-------------|-----|
| 27.   |   | B <sub>Ca</sub>     | 85-95   | 0,98 | 8,9        | <b>8,4</b> | 79  | 93         | 7          | 4          | 114 | 0,6        | 0,26        | <b>43,4</b> | 7,9  | <b>14,9</b> |     |
| 28.   |   | BC <sub>Ca,sl</sub> | 110-120 | 1,06 | <b>8,9</b> | <b>8,3</b> | 33  | 200        | 4          | 4          | 169 | 1,1        | 0,28        | <b>47,2</b> | 6,3  | 13,2        |     |
| <b>Чернозем обыкновенный среднесуглинистый на лессовидных карбонатных суглинках</b> |   |                     |         |      |            |            |     |            |            |            |     |            |             |             |      |             |     |
| 29.   | <b>26я</b><br>лесополоса<br>-1-я<br>терраса           | A <sub>1</sub>      | 1-7     |      |            | <b>7,4</b> | 143 | <b>273</b> | <b>347</b> | <b>199</b> | 282 | <b>3,0</b> | <b>0,91</b> | 33,1        | 4,2  | 1,1         |     |
| 30.   |   | A <sub>1</sub>      | 15-22   |      |            | 7,5        | 198 | <b>256</b> | <b>406</b> | <b>270</b> | 145 | 2,2        | 0,75        | 24,4        | 3,1  | 2,4         |     |
| 31.   |   | A <sub>1</sub>      | 23-33   |      |            | 6,9        | 57  | 138        | <b>150</b> |            | 47  | 141        | 3,7         | 2,16        | 23,8 | 2,2         | 2,5 |
| 32.   |   | AB                  | 40-50   |      |            | <b>7,1</b> | 30  | 132        |            | 94         | 40  | 113        | 0,9         | 1,60        | 39,1 | 7,7         | 3,7 |
| <b>Чернозем выщелоченный легкосуглинистый на лессовидных карбонатных суглинках</b>  |   |                     |         |      |            |            |     |            |            |            |     |            |             |             |      |             |     |
| 33.   | <b>29я</b> пашня<br>кукуруза -<br>3-я терраса         | A <sub>пах</sub>    | 0-11    |      |            | 6,1        | 54  | 292        | <b>300</b> | <b>180</b> | 231 | 3,7        | <b>4,14</b> | 22,1        | 2,6  | 0,4         |     |
| 34.   |   | A <sub>1</sub>      | 20-30   |      |            | 7,9        | 96  | 125        | <b>310</b> | <b>165</b> | 190 | 4,2        | 4,52        | 21,9        | 3,0  | 1,6         |     |
| 35.   |   | AB                  | 45-55   |      |            | 7,0        | 74  | 214        | 84         | 64         | 183 | 2,2        | 2,46        | 20,7        | 2,3  | 2,4         |     |
| 36.   |   | B <sub>Ca</sub>     | 79-89   | 0,64 | <b>9,1</b> | <b>8,5</b> | 59  | 264        | 502        | 39         | 118 | 0,7        | 0,51        | 41,4        | 6,5  | <b>15,6</b> |     |
| 37.   |   | BC <sub>Ca</sub>    | 95-105  |      |            | 8,0        | 44  | 313        | 25         | 11         | 91  | 0,3        | 0,33        | <b>44,3</b> | 6,9  | 13,2        |     |
| <b>Чернозем выщелоченный среднесуглинистый на лессовидных карбонатных суглинках</b> |   |                     |         |      |            |            |     |            |            |            |     |            |             |             |      |             |     |
| 38.   | <b>31я</b> мн.<br>травы –<br>сенокос –<br>1-я терраса | A <sub>1</sub>      | 8-18    |      |            | <b>5,8</b> | 14  | <b>284</b> | <b>104</b> | <b>26</b>  | 94  | 2,4        | <b>2,80</b> | 23,1        | 7,3  | 0,4         |     |
| 39.   |   | A <sub>1</sub>      | 29-39   |      |            | 6,4        | 14  | <b>311</b> | 54         | 34         | 100 | 0,6        | 1,98        | 21,8        | 4,4  | 1,8         |     |
| 40.   |   | AB                  | 56-66   |      |            | 6,9        | 14  | <b>335</b> | 92         | 20         | 46  | 0,4        | 1,03        | 22,4        | 4,2  | 3,2         |     |
| 41.   |   | B <sub>Ca</sub>     | 82-92   |      |            | <b>7,7</b> | 14  | <b>386</b> | 13         | 13         | 24  | 0,1        | 0,31        | <b>39,3</b> | 7,1  | 4,9         |     |



продукты их трансформации – гидрозолы  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  - сорбируются на частицах  $\text{SiO}_2$ , образуя природную хроматограмму охристого цвета. Причем на щебне опок образуются ярко бурые натеки, пленки и корки  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Некоторая их масса при миграции достигает грунтовых вод, попадая в реку Б. Колышлей, поэтому речные воды обогащены соединениями железа (рис. 44А). При водной миграции в почвах и геохимических ландшафтах коллоиды железа (их гидрозолы) могут удерживать органические лиганды, ионы тяжелых металлов, а также микроорганизмы и в такой форме трансформироваться на барьерах миграции – карбонатно-кальциевом, солевом [10,11]. Примечательно, что деградируемые черноземы на древнем аллювии по морфологии похожи на подзолы иллювиально-железистые борových террас северных рек России – Сев. Двины, Мезени и Кулоя, где И.М. Яшин в 1978-1983 гг. проводил крупномасштабное почвенное картирование [13,17]. С чем связана такая аналогия, пока неясно. Возможно, реализуется один из экосистемных механизмов миграционной биодеградации органических лигандов и осадкообразования  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  в массе инертного носителя - песка. В последующих реакциях *гидрогели гидроксида железа* трансформируются под влиянием гуматов и фульватов натрия (и легкорастворимых солей) и выщелачиваются сначала в грунтовые, а затем и речные воды. Кварцевый песок в слоях древнего аллювия очищается до ярко белесого цвета. Его авторы и используют для дальнейших лизиметрических опытов, предварительно очистив в лаборатории от железа и их элементов. Данный тезис подтверждается диагностикой концентрации железа в водах реки Б. Колышлей в Аткарском районе Саратовской области (0,93 мг/л) и реке Межа (1,76 мг/л) в Центральном-лесном заповеднике в Тверской области.

На основании накопленной информации, можно сделать следующие выводы:

1. Изучены *экологические риски* и причины деградации некоторых ландшафтов и почв учхоза «Муммовское» Саратовской области. Наиболее характерными из них являются: водная эрозия, *очаговое опустынивание* (заметное снижение продуктивности севооборотов, засухи, пожары, сукцессии растительных сообществ), засоление черноземов, загрязнение поверхностных природных вод соединениями железа. *Деградация черноземов связана с их дегумификацией.*
2. *Лимитирующие экологические факторы* дифференцированы нами в агроландшафтах по подтипам черноземов: для *обыкновенных черноземов* – избыток обменно поглощенных щелочноземельных катионов, дефицит доступных форм фосфора, наличие ярко выраженной плужной подошвы, вызывающей оглеение и небольшой по мощности гор.  $A_1$ ; для *выщелоченных черноземов* – это активное выщелачивание ионов кальция и магния, а также мобильных форм гумуса, сезонное оглеение по микро западинам; для *солонцов черноземных* – засоление, осолонцевание почвенных горизонтов, подщелачивание, ухудшение фильтрации воды; все указанные факторы негативно влияют на продуктивность возделываемых с.-х. культур.

3. Установлено, что процесс фильтрации воды в полевом стационарном опыте в гор. А<sub>1</sub> почвы на опушке дубравы (плакор) выражен активно, а масса воды (30 л) профильтровалась через слой 18-21 см за 5 час.
4. Выявлена экологическая роль пожаров, химических соединений золы растений, а также гидроксидов щелочных и щелочноземельных оснований в осолонцевании черноземов. Гуматы и фульваты натрия в дождливый период *свободно мигрируют* в профиле чернозема, увеличивая мощность гумусово-аккумулятивного горизонта.
5. Для возделываемых культур *наиболее благоприятными* являются участки агроландшафтов с черноземами выщелоченными, имеющими слабо кислую и близкую к нейтральной реакцию среды (рН 5,6-6,3), повышенное содержание доступного калия и фосфора, более лучшие фильтрационные свойства и более мощный гумусовый горизонт.

Были использованы следующие литературные источники:

1. Докучаев В.В. О происхождении русского чернозема // В кн. Дороже золота русский чернозем. Вступ. ст. и комм. Г.В. Добровольского. М.: МГУ. 1994. – С. 217-265.
2. Кауричев И.С., Поддубный Н.Н. Почвы учебного хозяйства «Муммовское» и их агрономическая характеристика // Известия ТСХА. 1957. Вып. 2. – С. 141 – 155.
3. Надежкин С.М. Органическое вещество почв лесостепи Приволжской возвышенности и пути его регулирования. М. – Пенза. 1999. – 239 с.
4. Панов Н.П., Рыбакова Б.А., Шафирян Е.М., Гончарова Н.А. Использование активированного угля при определении Fe, Al, Si, связанных с гумусовыми веществами, в солонцовых почвах // Известия ТСХА. 1984. Вып. 2. – С. 75-79.
5. Пономарева В.В., Плотникова Т.А. Гумус и почвообразование. Л.: Наука. 1980. – 222 с.
6. Ростовцева О.С., Колпенская Н.П. К истории изучения черноземов почвоведом Тимирязевской академии // Известия ТСХА. 1983. Вып. 5. – С. 57-63.
7. Усов Н.И. Почвы Саратовской области. Ч. 1 (Правобережье); 288 с.; Ч. 2 (Заволжье). ОГИЗ, Саратовское областное отд. 1948. 362 с.
8. Щербаков А.П., Козловский Ф.И., Васенев И.И. Основные условия и закономерности современного антропогенеза черноземов России. – В кн. Антропогенная эволюция черноземов. Воронеж, ВГУ. 2000. – С. 391- 409.
9. Яшин И.М. Водорастворимые органические вещества почвы – их состав и миграция. Автореф. канд. дис. М. 1974. - 17 с.
10. Яшин И.М. Выделение из почв мобильных групп гумусовых соединений водным раствором нейтральной соли // В Сб. Актуальные вопросы агрономического почвоведения. М.: МСХА. 1989. – С. 48-61.
11. Яшин И.М. Взаимодействие гидроксида железа, препаратов гуминовых кислот и доломита с водорастворимыми органическими веществами подзолистых почв // Известия ТСХА. 1991. Вып.5. - С. 46.

12. Яшин И.М., Васенев И.И., Петухова А.А., Ворников Д.В. Экологическое состояние и деградация черноземов Приволжской Возвышенности (на примере учхоза «Муммовское» Саратовской области) // Известия ТСХА. 2012. Вып. 1. – С. 41-52.
13. Яшин И.М., Кашанский А.Д., Петухова А.А., Когут Л.П. Ландшафтно-геохимическая диагностика почв Европейского Севера России. Монография. Ред. Яшин И.М. М.: РГАУ-МСХА. 2012. – 158 с.
14. Яшин И.М., Васенев И.И., Рикардо Валентини, Черников В.А. Методические указания по диагностике органического углерода, азота, нефтепродуктов и состава гумусовых веществ почв. Учебное изд. Ред. Яшин И.М. М.: РГАУ-МСХА. 2012. – 131 с.
15. Яшин И.М., Сердюкова А.В., Петухова А.А., Грачев Д.А. Изучение миграционных потоков тяжелых металлов для диагностики загрязнения таежных экосистем / Известия ТСХА. 2012. Вып. 2. – С. 20-31.
16. Яшин И.М., Васенев И.И., Рикардо Валентини, Петухова А.А. Исследование влияния почвенной биогенной кислотности на подзолообразование / Известия ТСХА. 2012. Вып. 6. – С. 19-30.
17. Яшин И.М. Экологический мониторинг процессов миграции и трансформации веществ в почвах. М.: РГАУ-МСХА. 2013. – 183с.
18. Яшин И.М., Гареева И.Е., Атенбеков Р.А., Васенев И.И. Экологический мониторинг воздействия антропогенеза на поверхностные воды. М.: РГАУ-МСХА. 2015. – 167 с.
19. Яшин И.М., Раскатов В.А., Васенев И.И. Методы экологических исследований. Учебное пособие. М.: РГАУ-МСХА. 2015. – 183 с.
20. Mikhailova, E.A., Bryant, R.B., Vasenev, I.I., Swager, S.J., Post, C.J. Cultivation effects on soil organic carbon and total nitrogen at depth in the Russian Chernozem / Soil Sci. Am. J. V.64. 2000. P. 738-745.
21. Principles and Methods in Landscape Ecology (Toward a Science of Landscape); by Almo Farina The University of Urbino Italy. Editors: Henri Decamps, Barbel Tress, Gunther Tress. Springer. 2006.
22. Soil organic matter in temperate agroecosystems: long-term experiments in North America (E.A. Paul et.al.ed.) CRS Press. 1997. 420 p.
23. Soil processes and the carbon cycle. CRS Press. 1997. 615 p.
24. Vasenev I.I., Noble R.R.P., Ammons J.T. A comparison of U.S. and modern Russian taxonomic system of six Russian / Soil Survey Horizons. V. 49. 2004. P. 39-51.
25. Virmany S.M. (et.al.ed.) Stressed ecosystems and sustainable agriculture. Oxford. IBH Publishing Co. 1994. 380 p.

## 8.0. Аналитические методы диагностики веществ в ландшафтах (формы миграции и агрегатные состояния веществ в почвах)

Специалисты естественнонаучных дисциплин хорошо знают, что химические элементы и вещества мигрируют в ландшафтах в самых различных агрегатных состояниях и формах. Поэтому прежде чем определять химический элемент, например, *в природной воде* проводят фракционирование веществ по агрегатному состоянию и фазам. Рассмотрим кратко этот вопрос.

Возможны *три формы миграции веществ* в ландшафтах и почвах со свободной движущейся влагой: *во взвесах, в форме истинно-растворимых и коллоидных соединений*.

*Во взвешенном состоянии* могут мигрировать различные тонкодисперсные частицы (пылеватые, илистые), первичные, вторичные минералы и органические вещества (детрит, растительные остатки), адсорбированные на минералах гумусовые вещества, а из химических элементов – золото, ванадий, главным образом, в речных и других природных водах, открытых бассейнах.

В почвах широко представлены *ионные формы миграции веществ в виде катионов ( $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $NH_4^+$  и др.) и анионов ( $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$  и др.)*.

Среди веществ, мигрирующих в форме истинных растворов, особое значение имеют *комплексные соединения*, в которых лигандами могут выступать как неорганические, так и органические компоненты. Последние представлены веществами неспецифической и специфической гумусовой природы (И.С. Кауричев, 1965; А.И. Карпухин, А.Д. Фокин, 1986; И.М. Яшин, 1993).

*Коллоидные формы* соединений Fe, Al и Si также широко участвуют в водной миграции, особенно в ландшафтах тайги, например, «под защитой» ВОВ.

Формы миграции веществ тесно связаны с процессами почвообразования. Экологи и почвоведы подробно изучают *формирование профиля солонцовых почв, лессиваж, роль и активное участие органно-минеральных соединений в миграции и трансформации веществ при подзолообразовании*. С ионными формами *восходящей миграции водорастворимых солей* связано развитие засоленных почв, солонцов и солончаков в лесостепной и степной зонах России.

Поскольку нами рассматриваются миграционные формы химических элементов и некоторых веществ, целесообразно охарактеризовать *методы их аналитической диагностики* в почвенных растворах, лизиметрических и природных водах. Важная роль отводится их правильному *отбору и транспортировке*. Полиэтиленовые сосуды перед заполнением на полную вместимость ополаскивают природной водой. В бутылки вносят несколько

капель антисептика (толуол), а емкости по возможности быстро доставляют в лабораторию.

В.М. Заварзин (1970) предложил следующую схему анализа лизиметрических вод. *Первая стадия* – определение *нестойких компонентов* (как можно скорее) после отбора лизиметрической воды: рН и Еh потенциометрическим методом; кислотность, щелочность, содержание хлора объемным методом; закисное железо с  $\alpha$ ,  $\alpha$ -дипиридилем после предварительной стабилизации раствора буфером по Казариновой; нитраты дисульфифеноловым методом; аммиак - колориметрически с реактивом Неслера; фосфаты - методом Дениже в модификации Цинцадзе; органическое вещество - объемным методом по И.В. Тюрину\*<sup>11</sup>, в качестве катализатора и для связывания хлора используют  $\text{AgNO}_3$ .

*Вторая стадия* – определение стойких компонентов из сухого и затем прокаленного при 400...500°C остатка. Полученный остаток обрабатывают 1...5%-й  $\text{HCl}$ . Минеральные примеси отделяют фильтрованием, затем остаток на фильтре обрабатывают щелочью, чтобы перевести кремнекислоту в раствор. Проведение полного анализа по этой схеме требует значительного объема воды (500...2000 мл) и времени.

Рассмотрим основные методы аналитического определения макро- и микроэлементов, в том числе и ряда тяжелых металлов, приемы фракционирования и диагностики водорастворимых органических веществ.

*Методы диагностики макроэлементов.* При определении ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  наряду с объемным трилонометрическим методом широко используют атомно-абсорбционный. Действие мешающих диагностике  $\text{Ca}^{2+}$  химических элементов устраняют различными приемами: разбавлением пробы и фотометрированием верхних участков пламени (Лернер и др., 1983); применением буферных добавок в виде *солей стронция* и иные (Dhir, 1976), натрия (Ward, 1975). Установлено, что введение в пробу, например, спиртов повышает чувствительность атомно-абсорбционного определения *кальция и магния*.

Для определения железа используют фотоколориметрический сульфосалициловый метод. К.В. Дьяконова (1977) предложила отдельное изучение растворимых и коллоидных форм железа. При содержании железа в водах более **0,5 мг/л** его можно определять методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии.

Для определения водорастворимых форм алюминия Е.М. Ноздрунова (1967) предложила модификацию колориметрического метода с алюминоном. Применяют и иные индикаторы. Для устранения влияния мешающих элементов и органических лигандов используют растворы лантана и железа (Menzies et al., 1992).

Для *определения серы* в растворах широко используют объемный метод – титрование раствором  $\text{BaCl}_2$  в присутствии нитхромазо.

---

<sup>11</sup> Метод детально описан в литературе по почвоведению. **Дополнения:** пробы природных вод (аликвоты по 20...40 мл) предварительно выпаривают досуха с 5 мл  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  для перевода свободных органических кислот в их гетерополярные соли, которые более устойчивы к температурной деструкции, чем кислоты.

Изучая состав лизиметрических вод почв южной части лесной зоны, И.Н. Скрынникова (1958) *использовала микрохимические и электрохимические методы определения алюминия, железа, кремния, кальция нитратов, хлоридов, водорастворимых органических веществ*. Щелочно-кислотные равновесия изучают с помощью кривых потенциометрического титрования.

М.А. Бобрицкая (1974) разработала методические указания по определению азота в лизиметрических водах. Общий азот в лизиметрических водах автор предлагает определять по методу И.В. Тюрина, *нитратный азот* – фотокolorиметрически дисульфифеноловым методом или по Гриссу с сульфаниловой кислотой. Для определения азота в дренажных водах, в том числе и природных водах с высоким содержанием органического вещества, предложена методика, являющаяся модификацией метода Къельдаля (Freisen, Miller, Tel, 1976). Метод предусматривает использование перхлората для *восстановления нитратного азота до аммонийного*, так как при неполном восстановлении азота результаты получаются заниженными.

Для определения в почвенном растворе *форм соединений азота ( $NO_3$ ,  $NH_4$ )* используют ионоселективные электроды (Zykina, 1990).

Большие трудности возникают из-за того, что в ряде случаев у аналитика в распоряжении бывает *небольшой объем раствора* и требуется определить многие элементы при низком уровне их содержания. В этом случае для определения, например, *низких концентраций кремния* в лизиметрических водах (меньше 1,0 мг/л) разработан метод электротермического атомно-абсорбционного анализа с графитовой печью. Чтобы устранить влияние поверхности графита на определение кремния, графитовые трубки покрывают карбидом вольфрама.

В ряде случаев при определении того или иного элемента целесообразно проводить *предварительное концентрирование*. Методы подготовки и концентрирования природных вод при последующем спектральном анализе описаны в монографии Н.Г. Зырина и А.И. Обухова (1977). В практике почвенных исследований находят все более широкое использование потенциометрические методы с применением ионоселективных электродов (ИСЭ) для определения *нитратного азота* в лизиметрических водах, *аммонийного азота* в почвенных растворах и промывных водах, *хлора* в природных водах (Dressel, 1977). ИСЭ применены при изучении передвижения элементов питания в почвах (GREATZ, Fiskell, Locascio, 1975; Zykina, 1990).

Фосфор в водах может быть определен методом эмиссионной спектроскопии с индукционной плазмой (Sugimal, 1980), предел обнаружения – 0,13 мкг/л. Применение этого метода позволяет проводить многоэлементный автоматизированный анализ природных вод (Larson, 1979).

Для определения растворимы форм фосфора в почвенном растворе предложен колориметрический метод. Предварительно органический фосфор переводят в ортофосфаты, которые реагируют с молибдатом в присутствии аскорбиновой кислоты. Комплексные соединения колориметрируют при длине волны 880 нм. Предел обнаружения 0,4 мкг/л (Tel Gaohia, Evans, 1994).



## Определение микроэлементов и тяжелых металлов

При определении микроэлементов во многих случаях проводят предварительное их концентрирование из природных вод. Методы концентрирования весьма разнообразны. Часто применяют экстракционные методы, характеризующиеся экспрессностью, простотой исполнения, позволяющие достичь абсолютных пределов обнаружения  $10^{-10} \dots 10^{-13}$  г (Ю.А. Золотов, Н.М. Кузьмин, 1982). Экстракцию удобно сочетать с последующим спектральным определением элементов.

В качестве экстракционных реагентов широко применяют дитиокарбамат, дитизон, 8-оксихинолин. Спектрохимическое групповое определение микроэлементов в водах (до 13...15 элементов) основано на предварительном концентрировании экстракцией при  $pH \sim 5$  оксином в хлороформе и водным раствором карбамата (В.Я. Еременко, 1969; В.С. Аржанова, 1983).

Среди эффективных реагентов применяют смесь хелатообразующих веществ. В работе (Yu, Lo et al., 1982) использована смесь ПДКА<sup>12</sup> – ДЭДТК в хлороформе для экстракции из природных вод ряда ионов тяжелых металлов.

Более простым приемом является концентрирование химических элементов на целевых (чистых) сорбентах. В сорбционных лизиметрах Кауричева - Яшина концентрирование осуществляется в течение длительного периода опыта (сезон, год). В лаборатории сорбированные вещества элюируются из сорбентов небольшим объемом вытеснителя. После чего в элюатах изучают состав и свойства мигрантов соответствующими методами. Среди сорбентов применяют: ионообменные смолы - катионит КУ-2 в  $H^+$  форме для сорбции простых и сложных катионов металлов (Fe, Al, Ca) и анионит АВ-17 в  $OH^-$  форме для сорбции анионов сильных минеральных кислот, а также анионных форм металлов (Fe, Al, Ca), активированный уголь и другие поглотители (И.М. Яшин с соавт., 1996).

При анализе природных вод используется концентрирование микроэлементов соосаждением на неорганических, смешанных и органических сорбентах. Среди минеральных соосаждителей наиболее употребительны оксиды, гидроксиды, сульфаты металлов. Негативным моментом применения минеральных соосаждителей является необходимость отделения определяемых микроэлементов от элемента-носителя

Для определения меди и свинца в природных водах разработан ионометрический метод. Метод использован для изучения форм миграции элементов.

---

<sup>12</sup> Пироллидиндитиокарбаминат аммония.

## Методы исследования состава органического вещества в поверхностных водах

Об общем содержании водорастворимых органических веществ в природных водах судят *по величине окисляемости*, определяемой или перманганатным методом Кубеля-Тиманна, бихроматным методом Тюринга (показатель *XPK* – см. С. 239-242). Величины перманганатной и бихроматной окисляемости не соответствуют полному содержанию углерода водорастворимых органических веществ. Перманганатная окисляемость составляет примерно **50%**, а бихроматная **75...95%** от общего содержания  $C_{орг}$  в воде. Важно растворы предварительно выпарить и добавить к осадку немного гидроксида кальция: тогда свободные органические кислоты перейдут в гетерополярные соли и не разрушатся при выпаривании. В 1986-1993 гг. И.М. Яшин работал на кафедре физической и коллоидной химии ТСХА в группе диагностики гумусового состава почв и поверхностных вод. Нами накоплена фактическая информация о составе и свойствах гумусовых соединений и методах их диагностики. Отметим, в частности, что метод Тюринга весьма удобен для определения  $C_{орг}$  в почвах и поверхностных водах. Нужно быть только внимательным и следовать данной методике.

ВОВ поверхностных вод исследовали И.С. Кауричев, 1965; А.Д. Фокин с сотр., 1973; М.В. Новицкий, 1968, 1973; Г.М. Варшал, 1973; И.М. Яшин, 1993 и другие.

Изучение состава, свойств и масштаба миграции ВОВ в почвах и ландшафтах подзон южной, средней и северной тайги ЕТС выполнены И.М. Яшиным (1974, 1993, 2013). В работах этого автора использованы *методы сорбционных лизиметров, радиоактивных индикаторов, колоночной адсорбционной, ионообменной, бумажной распределительной и гель-хроматографии*. Для диагностики в нативных условиях состава ВОВ, выделения из них индивидуальной и специфической групп органических соединений И.М. Яшиным была применена известная аналитическая схема W. Forsyth (1947) фракционирования ВОВ на активированном угле. После серии специальных опытов по сорбции-десорбции на различных сорбентах эта схема была модифицирована (И.М. Яшин, 1972, 1993). *Высокозольный уголь заменен на низкозольный «карболен», были изъяты аналитические операции с использованием сильных минеральных реагентов – минеральных кислот и щелочей, а также диализ, при котором терялось до 40% ВОВ. А ведь эти низкомолекулярные фракции как раз и являются наиболее химически активными. Их и следует изучать.*

М.В. Новицкий, в частности, изучал состав *низкомолекулярных компонентов* ВОВ в лизиметрических водах дерново-подзолистых почв. Для определения низкомолекулярных органических кислот и их солей использованы различные варианты хроматографического метода, метод потенциометрического титрования и «показатель буферности» (И.С. Кауричев, Е.М. Ноздрунова, 1962). Согласно этим данным кислые продукты,

оттитровывающиеся до рН 6,5, можно отнести к низкомолекулярным органическим кислотам, а соединения, оттитровывающиеся при рН 6,5..10,0, – к соединениям типа *таннидов* (полифенолы и продукт их гидролиза).

При изучении форм химических элементов в *поверхностных природных водах* широко используют *гель-хроматографию*, позволяющую разделить вещества по их молекулярным массам. В качестве гелей применяют агар-агар, крахмал, полиакриламид, декстран. Наиболее информативные результаты получаются при использовании Сефадексов – гелей декстрана. Они представляют собой гидрофильные полисахаридные цепи, поперечно связанные («сшитые») друг с другом и образующие трехмерную макромолекулярную структуру (Flodin, 1962). Техника работы с Сефадексами описана в ряде публикаций: Г. Детерман, 1970; А.И. Карпухин, 1984. Обстоятельная теоретическая и практическая характеристика метода гель-хроматографии и применение ее в почвоведении изложена в работах А.И. Карпухина (1984, 1988).

Заслуживают рассмотрения методы исследования водорастворимых органических веществ, разработанные Г.М. Варшал с сотрудниками (1975,1996). Авторы исходят из того, что содержание ВОВ обуславливает качество воды. Кроме того, комплексообразование с ВОВ является одним из решающих факторов, *определяющих состояние, формы миграции и возможность аналитического определения* элементов в природных водах. Большую часть ВОВ природных вод (до 80%) составляют фульвокислоты (ФК). Как правило, ФК в *речных водах тайги* содержится на порядок больше, чем гуминовых кислот.

Одной из главных методологических проблем аналитической химии является вопрос о том, какие вещества следует читать *истинно растворенными*. Это вещества, остающиеся в растворе после фильтрации через мембранный ультрафильтр с диаметром пор 350...400 нм. Природную воду рекомендуется фильтровать через этот ультрафильтр и концентрировать солевой остаток, используя **метод вымораживания**, предложенный А.В. Фотиевым (1964, 1965, 1966, 1968). Автор нашел оптимальные условия концентрирования *вымораживанием*, обеспечивающие сохранение в растворе в нативной форме всех растворенных органических веществ.

*Таким образом, отмеченные выше физико-химические методы позволяют решать ряд вопросов, связанных с эколого-геохимической оценкой ландшафта: во-первых, количественно диагностировать вещества; во-вторых, определять уровень и специфику техногенного загрязнения и возможные формы их водной миграции, и, в-третьих, определить движущие силы миграции, в частности, ВОВ.*

Результаты исследований, полученные с помощью физико-химических методов, следует дополнить сведениями об изучаемом объекте – ландшафте.

## **Физико-химические (инструментальные) методы исследований**

Для количественной диагностики химических элементов, попадающих в агроландшафты вследствие различных процессов трансформации и миграции, используют физико-химические методы анализа. Широко применяют 4 группы методов:

1. **спектральные** (и иные оптические),
2. **электрохимические**,
3. **хроматографические** и
4. **термические методы**.

Все они имеют общее название – *инструментальные методы анализа*.

Реализация любого физико-химического метода анализа включает *ряд стадий*:

- 1) отбор пробы (воды, почвы, растительности и т.д.);
- 2) консервация пробы и ее транспортировка (в образцы воды добавляют антисептик; образцы почвы и растений высушивают до воздушно-сухого состояния и упаковывают в специальные мешочки;
- 3) хранение проб и их подготовка к анализу: например, проводят мокрое или сухое озоление растительных образцов; получают необходимые элюаты из проб почвы (щелочные, кислотные), концентрируют изучаемые вещества или на твердом сорбенте, или путем вымораживания, соосаждения и выпаривания. Любая такая процедура может вызвать непредвиденные артефакты, поэтому здесь необходим «внутренний стандарт»;
- 4) измерение контролируемого параметра лучше проводить параллельно с эталонными образцами, чтобы получить калибровочные графики. При использовании приборов происходит направленное (энергетическое или вещественное) воздействие на вещества пробы;
- 5) оценка результатов измерений (*рассчитываются случайные и систематические ошибки*). Если полученные результаты близки к истинным значениям (например, стандартам), то они считаются правильными. Близкие значения концентраций изучаемого химического соединения в параллельных опытах позволяют констатировать, что такие результаты являются *воспроизводимыми*;
- 6) на основе полученных данных судят об эко-геохимическом (и ином) состоянии объекта:

При этом важно помнить, что во всех вышеуказанных стадиях наиболее ответственной при исследовании экосистем является *грамотный отбор проб образцов*. Помощь здесь может оказать качественная *картографическая основа*. Ошибки, допущенные на этапе отбора проб, уже нельзя исправить в дальнейшем (необходимо будет повторить экологическое картирование на тех участках, где отмечены неожиданные флуктуации экотоксикантов).

Охарактеризуем кратко некоторые виды физико-химического анализа.

Эмиссионный спектральный анализ наиболее распространен. С помощью пламенной фотометрии определяют в основном щелочные и щелочно-земельные элементы. Из экотоксичных металлов чаще всего диагностируют Rb, Cs и Sr. Недостатками метода являются большая зависимость показаний прибора от температуры пламени и существенное наложение соседних линий спектра.

*При большом содержании химических элементов (более 1%) спектральный анализ уступает по точности другим методам. При расчетах невозможно учесть влияние на результат анализа общего химического состава проб и формы нахождения в агроэкосистемах изучаемого элемента.*

*Принцип метода* основан на введении в зону пламени или дугового электрического разряда анализируемой пробы. Последнюю можно помещать в канал угольного электрода, наносить на поверхность подвижного электрода или вводить в искровой разряд воздушной струей. Легколетучие химические элементы определяют, вводя пробу с воздушной струей.

Эмиссионный анализ не требует сложных подготовительных операций с пробами, отличается простотой выполнения и высокой производительностью. Метод характеризуется высокой чувствительностью –  $10^{-3}$ ... $10^{-4}$  % (до  $10^{-5}$  %). Погрешность 1...3%.

Атомно-абсорбционный спектральный анализ в экологических и почвенно-агрохимических исследованиях стал применяться сравнительно недавно. В 1955 г. его предложил Уолци. Особая ценность метода заключается в том, что из одного раствора (после разложения образца почвы, породы, растительной пробы) можно определить примерно 70 химических элементов. Широко используют для десорбции Zn, Cu, Pb, Cd, Ca из образцов почв водный раствор 1 н.  $\text{HNO}_3$ , который элюирует 70...90% (от общего количества) ионов тяжелых металлов, находящихся в обменно-поглощенных и иных формах. *Принцип метода* состоит в том, что образец переводят тем или иным способом в раствор, аликвотную часть которого помещают в камеру атомно-абсорбционного спектрофотометра, где раствор диспергируется и испаряется с помощью пламени. Температура пламени достаточно высока, чтобы перевести большую часть раствора в атомарное состояние ( $t \sim 2000^\circ\text{C}$ ). Пар в камере освещается источником света (обычно специальной лампой с катодом того элемента, который и определяют в опыте). По измеренной энергии, дошедшей до детектора, количественно устанавливают содержание конкретного элемента.

Метод атомно-абсорбционной спектрофотометрии относится к методам диагностики «следовых» масс элементов в агроэкосистемах: в растениях, мобильных формах гумуса, продуктах питания, природных водах.

К недостаткам метода можно отнести необходимость растворения пробы (что делает анализ более продолжительным, возрастает вероятность ошибок), а также невозможность диагностики таких элементов, как углерод, фосфор, галогены и др., спектры (точнее резонансные линии) которых лежат в области ультрафиолетового излучения. Существенным недостатком метода

является невозможность одновременного определения нескольких элементов.

Инфракрасная спектроскопия позволяет решать следующие основные вопросы: 1. исследование строения соединений, т.е. диагностика различных функциональных групп и даже фрагментов молекул, 2. установление идентичности соединений, 3. контроль за ходом реакций и 4. изучение внутримолекулярных или межмолекулярных взаимодействий.

Исследования показывают, что в спектрах органических веществ имеется *некоторое число общих или мало отличающихся частот 3700...600 см<sup>-1</sup>*. Подобные частоты, появляющиеся в спектре при наличии *в соединении конкретных функциональных групп* (независимо от того, каким молекулам они принадлежат), получили название характеристических. К ним относятся, например валентные колебания связи **C–H, C=O, C=C, O–H, колебания групп -NH<sub>2</sub>, -COO<sup>-</sup>**. ИК-спектры можно получить для любого агрегатного состояния веществ.

Более подробно эти вопросы излагаются в специальных пособиях.

Ультрафиолетовая спектроскопия и спектроскопия в видимой области позволяет определить: 1. строение молекул веществ и наличие в них определенных функциональных групп, имеющих обычно кратные связи, – хромофоров (они вызывают поглощение в области от 200 до 1000 нм; это C=C, C=O, N=2, N=O, N=N, S=O, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, P=O и др. 2. концентрацию вещества на основании закона Бера, который отражает связь между поглощающей способностью слоя вещества *d* и его концентрацией *C* в растворе:

$$J = J_0 \exp(-\varepsilon \cdot C \cdot d); D = -\lg \frac{J_0}{J} \quad \varepsilon \cdot C \cdot d; \quad \text{и} \quad \varepsilon = \frac{D}{Cd} = \frac{l}{\text{моль} \cdot \text{см}}, \quad (33)$$

где *C* – концентрация;  $\varepsilon$  – коэффициент поглощения;

*J* – интенсивность падающего излучения; 2,303 – модуль перехода от ln к lg; *D* – оптическая плотность.

Методы кондуктометрии (анализы веществ по электрической проводимости растворов) в различных растворителях давно привлекали внимание специалистов-аналитиков.

В настоящее время кондуктометрические измерения не утратили своей актуальности. Известно, что электрическая проводимость с увеличением концентрации растворов возрастает из-за увеличения числа ионов при диссоциации молекул. В концентрированных растворах возрастают силы межмолекулярного взаимодействия, которые благоприятствуют формированию ассоциатов и ионных пар, *увеличивается вязкость раствора, а удельная электрическая проводимость снижается*. При кондуктометрическом титровании можно изучать ряд процессов и реакций: *кислотно-основного взаимодействия, осаждения, комплексообразования, окисления-восстановления*. Важное практическое значение имеет кондуктометрическое титрование



катионов (допустим,  $\text{Fe}^{3+}$ ) раствором ЭДТА. Эта реакция на 1-м этапе сопровождается выделением протонов ( $\text{H}^+$ ), однако затем – после точки эквивалентности – электрическая проводимость снижается, поскольку водородные ионы связываются анионным комплексом: *отрицательный заряд уменьшается и может стать нулевым или временно даже положительным* (А.И. Карпухин, И.М. Яшин, В.А., Черников, 1990).

*Практическое использование* методов измерения электрической проводимости весьма эффективно при контроле качества дистиллированной воды в лабораториях, *технической воды в медицине и фармакологии*, в технике водоочистки и оценить загрязнения сточных и природных вод – грунтовых, болотных, артезианских, речных. Кондуктометрия используется **при контроле качества молока**, различных напитков, пищевых продуктов и добавок к ним. Успешно применяется для количественного определения катионов и анионов в растворах: нитратом серебра титруют  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$ ,  $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$  и другие анионы; *хлоридом бария с добавлением спирта диагностируют анионы хромата, карбоната, оксалата, цитрата* и других; титрованием ЭДТА определяют  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и т.д.

Кондуктометрические методы отличаются экспрессивностью (быстротой) анализа, простотой и доступностью измерительной аппаратуры, удобством работы и достаточной точностью (погрешность 1...2%), а при термостатировании изучаемых растворов точность метода заметно возрастает.

Потенциометрия основана на определении точки эквивалентности по результатам потенциометрических измерений. *Применение:* потенциометрические методы имеют важное значение при диагностике pH растворов, концентрации (активности) других ионов с помощью ионоселективных электродов (ионометрия). В настоящее время имеются электроды на ионы  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ag}^{2+}$ ,  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , которые используются при локальном мониторинге объектов экосистем и ландшафтов. *С помощью кальциевого ионоселективного электрода*, например, определяют жесткость воды и его наличие в почвенных растворах; *электрод с  $\text{Ca}^{2+}$  функцией* используют в клинической медицине, поскольку с ионами кальция в организме человека связаны функция ферментов и нервная деятельность. Электрод с  $\text{NO}_3^-$  функцией применяют для оценки количества нитратов в кормах, продуктах питания...

Основным достоинством метода является его высокая точность, чувствительность и возможность проводить опыты с разбавленными растворами веществ для изучения комплексообразования, оценки силы кислот, осаждения и окислительно-восстановительных реакций. Использование ионоселективных электродов в нативных почвах (in situ) связано с артефактами, в частности с суспензионным эффектом (В.И. Савич и др., 1997).

Нефелометрический метод используют при анализе коллоидных гидрозолей, суспензий, эмульсий, различных взвесей (почвенных, донных отложений) и иных гетерогенных (мутных) сред. Интенсивность пучка света,

проходящего через подобную систему, заметно уменьшается за счет светорассеивания. Частицы, размеры которых *больше длины волны падающего света*, активно его рассеивают. Таким образом диагностируют коллоидные системы (конус Тиндаля). Интенсивность рассеивания света подчиняется закону Рэлея.

Фотоэлектроколориметрический метод основан на способности многих элементов, находящихся в специальной вытяжке, поглощать или рассеивать свет определенной длины волны. Светопоглощение количественно связано с концентрацией металла, этот эффект и используется для его определения. Метод отличается простотой и компактностью оборудования при регистрации фототоков.

Недостаток метода – в невозможности одновременного определения группы элементов.

Хроматографический метод анализа разработал русский ботаник М.С. Цвет в 1903 г. При пропускании экстракта *из зеленых листьев растений через колонку, заполненную тонкодисперсным порошком кальцита*, и промывании петролейным эфиром он получил ряд параллельных окрашенных зон, что свидетельствовало о наличии в исходном экстракте нескольких веществ. Этот метод М.С. Цвет назвал хроматографией (от греч. хроматос – цвет).

*Основу хроматографии составляет сорбция веществ в динамических условиях аналитического опыта. В простейшем виде она реализуется в лабораторном эксперименте путем инфильтрации изучаемого природного раствора (пигментов листьев растений, болотных вод, водных вытяжек из лесных подстилок, дождевых и талых вод) через хроматографическую колонку со слоем целевого (чистого) сорбента. Вследствие различной сорбируемости компонентов той или иной смеси при вертикальном нисходящем перемещении раствора происходит их разделение по длине слоя сорбента за счет многократного повторения элементарных актов сорбции-десорбции и различной сорбируемости компонентов смеси.*

В ландшафтах сорбция реализуется как *самопроизвольный процесс* концентрирования (сгущения) молекул, ионов и ассоциатов молекул (например, гумусовых веществ) на поверхности раздела фаз гетерогенных систем – почвы, донных илов...

*Сорбция делится на физическую и химическую. Первый тип характеризуется слабыми межмолекулярными силами взаимодействия. Подобные реакции на поверхности сорбента обратимы, быстро достигают стационарного состояния и существенно не изменяют структуры химических соединений. Здесь применимо уравнение сорбции, предложенное Ир. Лэнгмюром (1916). При хемосорбции наблюдается химическое взаимодействие между сорбатом и сорбентом. При этом молекулы сорбата на поверхности поглотителя теряют свою индивидуальную структуру и свойства. Вытеснить поглощенные вещества при такой сорбции в полной мере не удастся. Полное изучение процесса сорбции конкретного вещества на конкретном сорбенте включает 3 стадии: кинетику, статику и динамику.*

1. с помощью кинетики определяют время ( $t$ , сут) в течение которого устанавливается сорбционное равновесие. Можно также по специальному уравнению Бойда оценить вклад диффузии, разложив кинетическую кривую на составляющие.

2. статика сорбции позволяет установить зависимость массы поглощенного вещества от его равновесной концентрации в растворе (при  $t^0 = \text{const}$ ), т.е. получить изотерму сорбции (Генри, Фрейндлиха, Лэнгмюра, БЭТ) и затем проверить ее приложимость в линейном виде к тому или иному математическому выражению. В частности, изотерма сорбции фульвокислот генетическими горизонтами подзолистых почв удовлетворительно описывается с помощью уравнения Фрейндлиха:

$$X = K \cdot C_p^{1/n}, \quad (34)$$

где  $X$  – количество молей вещества, сорбированное единицей массы сорбента, моль/г;  $C_p$  – равновесная концентрация вещества, моль/л;  $K$  и  $1/n$  – эмпирические константы, не имеющие физического смысла.

Чтобы определить константы уравнения Фрейндлиха  $K$  и  $1/n$ , необходимо его прологарифмировать, привести к линейному виду:

$$\lg X = \lg K + 1/n \lg C_p. \quad (35)$$

Здесь параметр  $1/n$ , равный  $\lg \alpha$ , характеризует степень отклонения кривой изотермы сорбции от ее линейного вида. Константа  $K$  означает сорбируемость, например, фульвокислот химическими соединениями образца гор.  $A_{2g}$  подзолистой почвы. Она равна участку  $OA$  на ординате, которую отсекает прямая. Искомая зависимость в рассматриваемом примере выражается уравнением:

$$X = 1,20 \cdot C^{0,32}. \quad (36)$$

Подобное уравнение приемлемо в области средних концентраций.

Сложные природные смеси веществ нередко сорбируются по типу полимолекулярной сорбции, как это было отмечено в отношении водных растворов фульвокислот при их сорбции (в статике), порошком  $CaCO_3$  (И.М. Яшин, 1993).

3. динамика сорбции помогает установить емкость сорбента до проскока изучаемого вещества и полную динамическую емкость поглотителя (ПОЕ), что очень важно при расчетах загрузки сорбентов в колонну, например, при очистке природных вод от загрязняющих веществ. Другим примером может быть ориентировочный расчет массы сорбента для сорбционных лизиметров (И.С. Кауричев, И.М. Яшин, 1972).

В разработку основ хроматографии и практику сорбционных технологий заметный вклад внесли ученые Тимирязевской академии: Е.Н. Гапон, В.В. Рачинский, А.А. Лурье, А.Д. Фокин, И.С. Кауричев, И.М. Яшин и другие

Основными узлами приборов для хроматографического анализа являются: дозатор (система ввода пробы), хроматографическая колонка и детектор.

Химические методы анализа позволяют проводить широкий спектр аналитических исследований (В.И. Посыпайко и др., 1989). Они используются также в фотометрии для получения окрашенных соединений при определении неорганических ионов. При этом лигандами могут быть как органические соединения, так и неорганические анионы. Например, ионы тиоционата  $SCN^-$  используют при фотометрической диагностике **Fe, Co, Mo, W, Bi**, пероксид водорода – при определении **Ce, V, Ti**, аммиак – при определении **Cu**. Специальные органические реактивы используются для фотометрического определения неорганических ионов: **Al<sup>3+</sup>** с алюминоном, **Ba<sup>2+</sup>** с хлорфосфоназой, **Bi<sup>3+</sup>** с дитизоном и тиомочевинной, **Cd<sup>2+</sup>** с дитизоном, **Fe<sup>3+</sup>** с сульфосалициловой кислотой, **Co<sup>2+</sup>** с 1-нитроза-2-нафтамом, **Cu<sup>2+</sup>** с фенантролином, **Hg<sup>2+</sup>** с дитизоном, **Pb<sup>2+</sup>** с сульфарсазеном, **Cr<sup>3+</sup>** с ЭДТА. Необходимо обращать внимание на pH, t°, концентрацию раствора, растворитель (полярный или неполярный) и способ приготовления растворов (качество химических реактивов).

Концентрацию веществ в инструментальном анализе определяют методами калибровочного графика, сравнения (метод стандарта) и добавок. *Метод стандарта* используется, когда на графике линия зависимости «состав-свойства» имеет прямолинейный характер и проходит через начало координат. На приборе измеряют параметры свойств стандартного и анализируемого растворов веществ. При этом отношение концентраций стандартного и изучаемого растворов равно отношению их параметров:  $C_s/C_x = f_s/f_x$ .

**Пример.** Стандартный раствор вещества с концентрацией  $C_s$ , равной **3%**, имел поглощение  $A_s$ , равное **0,61**. Поглощение анализируемого раствора  $A_x$  равно **0,49**. Используя метод сравнения, находим:  $C_s/C_x = A_s/A_x$ , откуда:  $C_x = C_s \cdot A_x/A_s = 3 \cdot 0,49/0,61 = 2,41\%$ .

Физико-химические методы характеризуются различными **чувствительностью, селективностью и воспроизводимостью.** Чувствительность определяется интенсивностью измеряемого свойства и чувствительностью детекторов сигнала в приборе. Высокую интенсивность, исходя из природы вещества, может иметь поглощение света растворами, линии в эмиссионном спектре элементов, флюоресценция. *Можно привести ряд чувствительности некоторых инструментальных методов (по пределу обнаружения, г): фотометрия ( $1 \cdot 10^{-6}$ ) < полярография ( $1 \cdot 10^{-8}$ ) < флюориметрия, эмиссионный спектральный анализ, атомно-абсорбционный спектральный анализ < газовая хроматография < кинетический анализ ( $1 \cdot 10^{-10}$ ) < масс-спектрометрия ( $1 \cdot 10^{-12}$ ) < радиометрический анализ ( $1 \cdot 10^{-15}$ ).*

**Высокочувствительные методы** применяют при анализе **микрокомпонентов** смесей веществ, продуктов их разрушения и примесей. Особенно широко они применяются при изучении биологических и экологических объектов в фармакологии, в арбитражном анализе, медицине, диагностике экотоксикантов.

Важным преимуществом многих инструментальных методов является их высокая избирательность – селективность. Например, по линиям эмиссионного спектра обнаруживают и диагностируют практически все элементы при совместном присутствии.

Правильность инструментальных методов анализа зависит от того, насколько *свойство адекватно отражает состав и связано с ним* определенными закономерностями. Зависимость «**состав-свойства**» требуется установить экспериментально. Для этого предварительно калибруют приборы с помощью стандартных растворов (образцов). *Стандартными образцами* называют вещества или материалы, имеющие постоянные состав и свойства. Так, в потенциометрии применяют стандартные буферные растворы с постоянной величиной рН, а с их помощью калибруют рН-метры (иономеры). В спектрофотометрии по стандартам веществ составляют калибровочный график, используемый затем для интерпретации результатов измерений.

На воспроизводимость инструментальных методов кроме общих факторов (точность взвешивания образцов, отмеривания объемов реагентов *стандартным пробоотборником*) влияет стабильность работы приборов, зависящая от устойчивости напряжения, силы тока и внешних электромагнитных помех. Для получения точных результатов на приборе производят **3...5 измерений**, а полученные данные обрабатывают методом вариационной статистики для однородной выборки. Учитывают возникающие ошибки.

Ошибки химического анализа бывают случайными и систематическими. Последние возникают постоянно из-за неточности аппаратуры, мерной посуды. Их можно устранить проверкой и калибровкой аппаратуры и посуды, используя стандартные образцы и вещества. Случайные ошибки возникают вследствие непредвиденных причин. Ошибки делятся также на **абсолютные и относительные**. Первые выражают в абсолютных величинах, вторые – в процентах. Например, если абсолютная ошибка определения в почве 0,203 г оксида кальция составила 0,003 г, то относительная ошибка  $x = 0,003 \cdot 100 / 0,203 = 1,47\%$ .

Химические ошибки могут возникать вследствие неполноты протекания химических реакций. Чаще всего возникают индикаторные, кислотно-основные, окислительно-восстановительные и другие типы ошибок. Грубые ошибки (промахи) нередко связаны с некорректной методикой эксперимента.

Математическая обработка результатов химических анализов (для однородной выборки) на первом этапе предусматривает оценку типа распределения (нормальное, логнормальное, Вейбулла). Если кривая плотности *нормального* распределения симметрична, т.е. подчиняется нормальному закону распределения случайных величин Гаусса, то можно использовать известную формулу:  $\bar{x} = \Sigma x_i / n$ , где  $\bar{x}$  – среднее; n – число измерений;  $x_i$  – значение отдельного измерения. Важными характеристиками среднего значения  $\bar{x}$  являются дисперсия  $\delta^2 = \Sigma (x_i - \bar{x})^2 / n - 1$  и коэффициент вариации  $V = \sigma / \bar{x} \cdot 100$ . **Дисперсия** отражает однородность изменений.

Однако при наличии в той или иной природной системе (почве, водах) органических лигандов и ионов переходных металлов возможно периодическое изменение концентраций, например ионов тяжелых металлов, и дисперсия признака может *стать явно неоднородной*. Поэтому только математическая диагностика случайных ошибок на основе вариационной статистики в экологии и почвоведении уже недостаточна. Для проведения опытов с заданной точностью ( $\Delta = \sigma/\bar{x}$ ,  $\sigma_0$  – среднеарифметическое значение среднеквадратичного отклонения  $\sigma$  равно  $\sigma_0 = \sigma/\sqrt{n}$ ) и достоверностью следует знать некое минимальное число измерений

$$N_{\min} = \sigma^2 \cdot t^2 / \sigma_0^2 = K_B^2 \cdot t^2 / \Delta^2, \quad (37)$$

где  $K_B$  – коэффициент вариации, устанавливается в рекогносцировочных опытах; %;  $\Delta$  – точность, задается наблюдателем, но не должна быть выше, чем у прибора, например, 3%;  $t$  – критерий Стьюдента, берется из таблиц – при 0,95,  $n = 5$ ,  $t = 2,77$ . Тогда  $N_{\min} = 15^2 \cdot 2,77^2 / 7^2 = 39$ . Отсюда следует: чем переменнее значение признака, тем больше число лабораторных измерений предстоит совершить.

В статистике есть один из приемов оценки грубых ошибок аналитических измерений, которые стабильны в химическом опыте. Это так называемое «правило трех сигм» ( $3\sigma$ ). По мнению авторов этой методики, разброс случайных величин от их среднего значения  $\bar{x}$  не должен превышать  $x_{\max} = \bar{x} \pm 3\sigma$ . Для статических лабораторных опытов, в которых не изменяются масса и энергия веществ, подобная методика оценки ошибок измерений приемлема. Для нативных экосистем и их компонентов, где непрерывно изменяется масса и энергия веществ, рассматриваемый *подход некорректен из-за неоднородности выборки*. Проиллюстрируем это на примере изучения выноса ВОВ из гор.  $A_0$  – лесной экосистемы. Вследствие заметной дифференциации в пространстве и времени запасов лесной подстилки вынос ВОВ существенно различается в разных точках пространства. Реальные значения выноса, полученные методом сорбционных лизиметров, например, для биогеоценоза подзоны южной тайги составляют: 48; 32; 71; 29 и 80 г/м<sup>2</sup>. Тогда  $\bar{x} = 52$  г/м<sup>2</sup>·год<sup>-1</sup>, а среднеквадратичное отклонение  $\sigma = 22,9$  г/м<sup>2</sup>·год<sup>-1</sup>. Полная запись величины выноса ВОВ из гор.  $A_0$  составит  $x = \bar{x} \pm \sigma = 52 \pm 22,9$  г/м<sup>2</sup>·год<sup>-1</sup>. С математической точки зрения для статических систем значения 80 и 71 нужно было бы признать **как грубые промахи**. С экологической позиции любые величины интересны и требуют индивидуального осмысления. И значения 80 и 71 г/м<sup>2</sup>·год<sup>-1</sup>, это вполне очевидно, следует оставить, поскольку они отражают генетические черты функционирования фитоценозов с разными мощностями и запасами лесной подстилки. Более рационально вынос ВОВ в данной точке пространства следует представить в виде:

$$x = (m_{\max} - m_{\min}): \bar{x} = (29-80) - 52 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}^{-1} \quad (38),$$

где (29-80) – амплитуда колебаний масштаба миграции,

**52** – среднее значение признака.

Экспериментальные данные следует оценить по уровню их достоверности. **Проиллюстрируем это примером.**

Допустим, в 1-м варианте полевого опыта масштаб выноса  $C_{орг}$  ВОВ из гор.  $A_0$  в еловом лесу Подмосковья составил  $m_1 = 20(\bar{x}) \pm 0,5(\sigma)$ ; во втором –  $m_2 = 23 \pm 0,6$ . Прирост масштаба<sup>13</sup> миграции равен 15%. Он относительно мал и его следует уточнить на основе достоверности по условию  $\bar{x}/\sigma \geq 3$ . В данном случае проверяется значимость разницы величин  $m_1 - m_2 = 3$ . Ошибка (средняя) полевого измерения выноса ВОВ:

$$\sigma_o = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{0,5^2 + 0,6^2} = 0,78 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}^{-1} \quad (39)$$

Поэтому  $(m_1 - m_2)/\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = 3,0/0,78 = 3,85 > 3$ . Следовательно, выявленный прирост масштаба выноса  $C_{орг}$  ВОВ в близлежащем слое  $A_0$  однородной фации является достоверным. Эти положения обязательно нужно учесть на этапе оформления и обобщения экспериментальных данных. В табл. 3 приводится сравнительная оценка лабораторных методов анализа по классам точности. Агроэкологи должны знать особенности указанных методов и их применение к разным природным объектам. Так, методы с наибольшей точностью (и самые дорогостоящие) используются при *арбитражных исследованиях*.

Наиболее правильным приемом установления и контроля точности аналитических методов является анализ стандартных образцов. Важное место отводится также систематическому *тестированию приборов* и оборудования в эколого-химических лабораториях, а также их обновлению через каждые 5-7 лет.

### Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите основные группы лабораторных методов анализа компонентов ландшафта.
2. Назовите основные физико-химические методы анализа, их принцип и применение.
3. Какие аналитические приемы используются для выделения из природных вод взвесей, коллоидов и ионно-молекулярных форм веществ?
4. Какие аналитические методы можно использовать для определения в ландшафтах тяжелых металлов?
5. Для каких целей применяется ИК-спектроскопия?
6. Назовите методы определения доступных форм фосфора, калия и азота в агроландшафтах.

---

<sup>13</sup> Для однородной выборки; например для расчета природной и аналитической дисперсии признака в индивидуальном (не смешанном образце) в вертикальной или горизонтальной координатах почвенного покрова.



7. Какими методами можно определить содержание в почве органического углерода?
8. Какой из методов анализа следует использовать, если концентрация, например, ионов марганца и железа в рекогносцировочном опыте составила 1,1%?
9. Что такое метод стандарта? Для чего используются стандартные образцы?
10. Что такое метод калибровочного графика?
11. Для каких целей и как проводится концентрирование веществ из природных вод?
12. Назовите принцип метода хроматографического анализа.
13. Перечислите основные виды хроматографии.
14. Что такое метод сорбционных лизиметров? Кратко охарактеризуйте его сущность и применение.
15. Какие методы используются при диагностике следовых количеств тяжелых металлов в природных водах и почвах?
16. Какими методами можно определить концентрацию ионов кальция и магния в почвенных растворах?
17. Почему проводится предварительное фракционирование веществ природных вод по их агрегатному состоянию и формам миграции?
18. Какой сорбент используется в аналитической схеме фракционирования ВОВ по W. Forsyth и И.М. Яшину?
19. Назовите особенности применения высоко-, - и низкоточного активированного угля при фракционировании ВОВ.
20. Для каких целей используется ионометрия?
21. Укажите принцип метода нефелометрии и область его применения.
22. Принцип атомно-абсорбционного метода анализа.
23. Какой метод следует использовать при арбитражном анализе объекта: низко- или высокочувствительный? Почему?
24. При экологическом картографировании почв агроландшафтов следует использовать экспресс-методы химического анализа, высокоточные или традиционные?
25. Назовите принцип метода ИК-спектроскопии и область его применения.
26. Пробаподготовка почвы и воды.
27. Какие ошибки возникают при аналитических работах?
28. Правило трех сигм.
29. Вариационная статистика в почвенно-экологических исследованиях.
30. Виды изотерм сорбции и их диагностика.
31. Механизмы сорбции ВОВ в подзолистых почвах.
32. Какие органические вещества мобилизуются в раствор из биополимеров лесных подстилок в зоне тайги?
33. Как учесть состав и свойства компонентов ВОВ из лесных подстилок?

## 8.1. Экологическая концепция гумификации растительных остатков в почвах тайги

В отличие от традиционных концепций гумификации М.М. Кононовой (1964); Л.Н. Александровой (1980) и Д.С. Орлова (1984), нами была предложена экологическая концепция, о ней скажем несколько позже. Здесь же отметим, что она базируется *на результатах длительных полевых опытов* (в том числе и лизиметрических) в почвах и экосистемах таежной зоны России.

Экологическая концепция гумификации наземного растительного и корневого опада позволяет более полно охарактеризовать ряд почвенно-экологических процессов. В частности, химическое загрязнение почв.

В этой связи нами кратко сформулирована методология оценки загрязнения агроэкосистем экотоксикантами, включающая следующие положения:

1. На современном этапе изучения эколого-геохимического загрязнения уже недостаточно информации только о *концентрации экотоксикантов и сведений об их ПДК* в почве, природных водах, продуктах питания, сырье.

2. Актуальна и очень важна диагностика движущих сил, обуславливающих трансформацию продуктов антропогенеза в конкретных геохимических ландшафтах и почвенном покрове.

3. Необходимо накапливать фактические данные *о скорости, масштабе и направленности* трансформации новых техногенных соединений, которые отсутствуют в почвах и экосистемах.

4. Нуждаются в уточнении данные о формах миграции химических элементов и количественной оценке почвенно-геохимических барьеров.

5. На основе познания реальных почвенно-экологических процессов и механизмов трансформационных превращений продуктов техногенеза можно создать экспериментальную модель и сформулировать обоснованный прогноз поведения экотоксикантов в ландшафтах.

Кратко рассмотрим авторскую методологию на примере оценки известкования почв в зоне тайги РФ. Ранее нами было установлено, что мобилизация ионов  $\text{Ca}^{2+}$  из доломита в дерново-подзолистой среднесуглинистой почве наиболее активно происходит в **гор. ЕЛ** (когда в составе ВОВ преобладают **фульвосоединения**:  $k_{\text{моб}} = 0,0058$ , или 580 мг ионов  $\text{Ca}^{2+}$  из 100 г доломита).

Если при известковании **доза доломита** на 1 га составляет 6 т, то на 1 м<sup>2</sup> поступит 0,6 кг мелиоранта, в котором содержится **192 г кальция** в форме  $\text{CaCO}_3$ . Согласно опытным лизиметрическим данным из **15 г** мелиоранта за 11 мес. натурального опыта в раствор мобилизуется **18,8 мг  $\text{Ca}^{2+}$  ионов**, а из 192 г. мелиоранта – 240 мг. Таким образом, в слой пахотной дерново-подзолистой почвы (мощностью 15...20 см и массой примерно 250...310 кг) реально поступит вышеуказанная масса ионов кальция. В 280 кг массы почвы

(на 1 м<sup>2</sup>) при содержании углерода гумусовых соединений 1% находится 2,8 кг С<sub>орг</sub> ГС. Если принять, что на долю фракции «1а» ФК приходится 30% указанной ГС, то окажется, что 240 мг Са<sup>2+</sup> должны постепенно нейтрализовать известную массу ионов Н<sub>3</sub>О<sup>+</sup> в составе функциональных групп ГС. При этом в составе **840 г фульвокислот** (по углероду), допустим, сотая часть (**8,4 г по массе**) приходится на протоны, точнее ионы гидроксония, которые появляются в свободном состоянии при диссоциации в почвенных растворах различных функциональных групп фульвокислот. Соотношение мобилизованной массы **ионов Са<sup>2+</sup>** и протонов (только в составе одной фракции «1а» ФК) оказывается равным **1:35**. И это без учета *активного влияния ВОВ с ярко выраженными кислотными свойствами, кислотных свойств соединений алюминия, комплексообразования (служащего одним из источников протонов), воздействия сильных минеральных кислот (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>, HCl), поступающих с аэральными осадками), физиологически кислых удобрений* играющих важную роль в увеличении концентрации ионов Н<sub>3</sub>О<sup>+</sup> в почвах агроэкосистем.

*Становится понятно, почему положительный эффект от известкования почв подзолистого типа довольно быстро (за 3...5 лет) нивелируется, а параметры кислотности вновь возвращаются на исходный уровень. Отсюда вытекают два следствия:*

*1-е – необходима диагностика природы кислотности с экологических позиций, а не только с реагентами, предложенными химиками;*

*2-е – требуют совершенствования технологические приемы регулирования кислотности с учетом экологической ситуации и функционирования агроэкосистем на плакорах, склонах и «подошвах» склонов.*

*Второй вопрос проблемы пока не рассматривается. Относительно первого следствия отметим: **природа кислотности таежных экосистем более уникальна, чем это традиционно представляется**. В настоящее время учитывается только один ее аспект (хотя и весьма важный) – почвенный. В условиях масштабных техногенных нагрузок на экосистемы необходимо выделять три основных вида кислотности – как устойчивых источников и трансформаторов химических соединений:*

*1) почвенная (химическая),*

*2) биогенная (адаптационная – вследствие биогенного кислотообразования),*

*3) техногенная, связанная с устойчивым выпадением «кислотных дождей».*

*Почвенная кислотность достаточно полно изучена, а на ее основе разработаны технологии химической мелиорации почв. Аэрозоли серной кислоты, образующиеся в атмосфере из атмотехногенных выбросов оксидов серы и выпадающие на растительный покров и поверхность почв, выступают не только новым и устойчивым источником протонов, обуславливая подкисление среды, но и мощным негативным фактором, вызывающим химическую деградацию гумусовых соединений (как основы почвенного плодородия), а совместно с углеводородами, диоксинами,*

радионуклидами, тяжелыми металлами – и экологическую деградацию ландшафтов – основу жизнедеятельности биоты Земли.

**Биогенная (адаптационная) кислотность** (И.М. Яшин, И.С. Кауричев, В.А.Черников, 1996) *играет исключительную важную роль в функционировании, например, таежных экосистем.* При традиционном подходе высокая кислотность почв нативных ландшафтов тайги рассматривается как отрицательный факт, что некорректно. Сообщества живых организмов таежных экосистем (древесная хвойная растительность, кустарнички, мхи, лишайники, почвенные микроорганизмы – в основном микроскопические плесневые грибы) эффективно функционируют в суровых биоклиматических условиях благодаря уникальному *механизму биогенного кислотообразования* (И.М. Яшин, 2013). С его помощью живые организмы *создали среду обитания – подзолистую почву.*

Здесь важно не только рассматривать *вид биогенной (экологической) кислотности,* но и обязательно учитывать экологические аспекты такого макропроцесса, как гумусообразование (И.М. Яшин, И.С. Кауричев, В.А. Черников, 1996), поскольку через биогенный и абиотический потоки ВОВ реализуется экологическая (и генетическая) взаимосвязь двух основополагающих процессов в биосфере – фотосинтеза и гумусообразования. За счет устойчивого биогенного обогащения почвенных растворов компонентами ВОВ с кислотными и комплексообразующими функциями (в том числе и педогенными фульвокислотами) гумусообразование в подзолистых почвах таежных экосистем протекает в основном в направлении формирования низкомолекулярных и миграционно-способных соединений с  $MM \leq 1000 \text{ а.е.м.}$  Эти соединения и обуславливают широкий спектр реакций трансформации техногенных соединений в почвах. В результате формируются различные по составу и подвижности органно-минеральные соединения, содержащие металлы – токсиканты: **Be, Hg, Cd, Sr, Pb**, способные поступать в трофические цепи экосистем, сырье, продукты питания и в живые организмы, вызывая заболевания и эндемии.

Экологические процессы гумусообразования, протекающие в реальных ландшафтах, отличаются от лабораторных модельных опытов. Некоторые авторы некорректно соотносят нативные продукты почвообразования, например, гумусовые вещества *с продуктами жизнедеятельности групп почвенных организмов - микрофлоры, червей и т.д.* Так возник неудачный в научном отношении термин «биогумус». Приставка «био» здесь вообще неуместна, поскольку процесс формирования системы гумусовых соединений из опада растений в почве стадийный и носит ярко выраженный биогенный характер. *Причем ГС становятся специфической группой органических веществ только после сорбции минералами почвы.* В этой связи любые продукты жизнедеятельности отдельных групп живых организмов вне естественных почв и экосистем нужно рассматривать только как *прогумусовые вещества* (они могут минерализоваться и не попасть в пул гумусовых соединений).

Возвращаясь к вопросу об известковании почв таежной зоны отметим, что данная методология включает решение ряда взаимосвязанных задач в натуральных и лабораторных экспериментах, а также оценку экологических функций ВОВ. Напомним вкратце эти экологические функции (И.М. Яшин, 1993):

1. ВОВ выступают как неперенная форма стадийной трансформации растительных остатков и почвенного гумуса.

2. ВОВ являются типичным продуктом функционирования групп живых организмов таежных экосистем и трансформации их органических остатков в условиях гумидного климата и крайнего дефицита в почвах и породах Са, Р, N и других элементов (избытка протонов) и неперенным важнейшим показателем гидрохимической характеристики природных вод таежных ландшафтов.

3. ВОВ характеризуются большим разнообразием компонентного состава и многообразием свойств (кислотными, комплексообразующими, сорбционными, аллелопатическими, окислительно-восстановительными и др.). С одной стороны, это определяется наличием в составе ВОВ компонентов индивидуальной (фотосинтетической) и специфической природы (фульвокислот), содержащих различные полярные функциональные группы, а с другой – их гетерогенным молекулярно-массовым составом (вследствие наличия как кислот, так и различных солей, в том числе и органо-минеральных комплексов), уникальными коллоидно-химическими и комплексообразующими свойствами, в частности, дифильностью молекул.

4. Отмеченные особенности генезиса и природы ВОВ способствуют их активному участию в различных физико-химических реакциях взаимодействия с гидрофобными и гидрофильными соединениями почв, пород, кор выветривания, донных осадков и др. Продуктами подобного взаимодействия могут быть биологически активные, а также миграционноспособные химические соединения типа устойчивых металлорганических и органо-минеральных комплексов, влияющих на функции почв и живых организмов (Г.В. Добровольский и Е.Д. Никитин, 1988; А.И. Карпухин, 1970, 1988).

5. Своеобразие выявленных свойств и анализ экологических функций ВОВ позволяет констатировать, что с помощью данной группы веществ в экосистемах *осуществляется устойчивая передача и обновление информации в цепи: фотосинтез – гумусообразование.*

Среди экологических функций ВОВ наиболее полно изучены в интегрированном виде следующие: педогенные (например, активное участие компонентов ВОВ в гумусообразовании, аллелопатических взаимодействиях между группами живых организмов), биогеохимические, обуславливающие специфику превращения и миграции химических элементов в таежных ландшафтах, и гидрохимические (И.М. Яшин, 1993; И. Нмадзуру, 1994). Биогеохимические функции ВОВ отражают особенности многообразных трансформационных механизмов и, в частности, формирование водорастворимых соединений, играющих важную роль в миграции ТМ (в том

числе и включение их в трофические цепи живых организмов). Эта функция включает, в частности, экспериментальную диагностику  $K_{\text{mob}}$  конкретного химического элемента в раствор из труднорастворимого химического соединения для более точного определения абсолютной массы мигранта в конкретных почвах ландшафта (И.С. Кауричев, И.М. Яшин, 1989). Мигрант вначале мобилизуется в раствор в реальной почве и экосистеме, затем мигрирует с гравитационной влагой в пределах горизонта, насыщенного влагой профиля, или в ландшафте.

В этой связи интересно было оценить в натурном эксперименте скорость и *продукты трансформации* наземных растительных остатков при их гумификации.

### 8.1.1. Концепции гумификации растительных остатков в почвах тайги<sup>14</sup>

В ряде монографических работ гипотезы гумификации освещены достаточно обстоятельно. Охарактеризуем основные из них, упомянув, что все они опираются на результаты лабораторного моделирования:

- 1) конденсационная гипотеза (М.М. Кононова, 1957; Flaig, 1964, 1988),
- 2) гипотеза окислительного кислотообразования (Л.Н. Александрова, 1980),
- 3) общая теория гумификации (Д.С. Орлов, 1990), в основе которой лежат представления о разной термодинамической устойчивости органических веществ почвы (индивидуальной и специфической природы),
- 4) экологическая концепция (И.М. Яшин, В.А. Черников, И.С. Кауричев, 1996).

Сторонники конденсационной теории считают, что биополимеры растительных остатков (лигнин, клетчатка, белки) сначала полностью распадаются с помощью ферментов микрофлоры до органических мономеров и конечных продуктов ( $H_2O$ ,  $CO_2$  и минеральных солей), а в последующих стадиях протекает конденсация и полимеризация новообразованных мономеров, в частности фенольных соединений (и хинонов), с аминокислотами и моносахарами при обязательном участии ферментов микрофлоры. Так, по мнению авторов, формируются темноокрашенные гуминоподобные и собственно гуминовые соединения с высокими молекулярными массами. Однако эти авторы не учитывают реальные процессы почвообразования и высокую кислотность подзолистых почв таежных экосистем, препятствующих конденсации и полимеризации молекул ВОВ. Поэтому в почвах тайги образуются в основном соединения фульвокислотного характера, органические кислоты и полифенолы.

Гипотеза окислительного кислотообразования (или дегградация биополимеров, по Л.Н. Александровой, 1980; M. Haues, 1988) в настоящее

---

<sup>14</sup> **Гумификация** – это нативный (не лабораторный) процесс формирования **молекулярных структур** гумусовых веществ, которые закрепляются на почвенной матрице; он протекает длительное время в конкретных типах почв и ландшафтах - абстрактно трактовать данный процесс без «привязки» к почвам некорректно. **Гумусообразование** – естественный процесс формирования гумусового профиля почвы.

время, очевидно, наиболее популярна среди специалистов. Сторонники этой концепция не требуют обязательной деградации биополимеров до мономеров и включает три основные стадии:

1) окислительное кислотообразование (при обязательном участии оксидаз микроорганизмов), сопровождающееся интенсивным накоплением гумусовых соединений, по составу и свойствам подобных **гуминовым кислотам (ГК) почв**, которые являются основным источником фульвокислот;

2) трансформация новообразованных ГК: наблюдается уменьшение *в лабораторном опыте* величин молекулярных масс (ММ) их фракций вследствие окисления (карбоксилирования) молекул и отщепления новых фрагментов – молекул фульвокислот (ФК);

3) постепенная минерализация молекул гумусовых веществ. Авторы отмечают, что конечной стадии гумификации нет, как и нет конечного продукта. Причем, несмотря на многообразие экологических условий в ландшафтах России, принципиальная схема химизма формирования молекул гумусовых кислот, по мнению этих авторов, везде одинакова (?! – И.Я.). С этим трудно согласится. Иначе не было бы широкого спектра почв и гумусовых соединений. Возможно, авторы хотели подчеркнуть, что реакции трансформации растительных остатков с участием ферментов конкретных групп микроорганизмов приводят почти к одинаковому результату. Маловероятно. Но главное, в другом. Наряду с биохимическими реакциями, важную роль играют физико-химические процессы – сорбция, осадкообразование и диффузия. Новообразованные молекулы гумусовых веществ сорбционно закрепляются на почвенной матрице, которая представлена, как известно, почвенными минералами, коллоидами и органоминеральными комплексными соединениями. Безусловно, эти процессы взаимодействия различны в разных типах почв и ландшафтов: у них матрицы различные. Отсюда и многообразие природы, состава, структур и устойчивости гумусовых веществ. Чтобы было понятно, отметим следующее: *как и типы почв, так и гумусовые вещества создают экосистемы – сообщества биоты.* Раскорчевали таежный лес, распахали почвы – открыли путь для деградации гумусовых веществ, созданных нативной биотой, а затем и самой почвы в направлении образования почвоподобных тел и не почвенных образований. Особенно неблагоприятные перспективы в полевых ландшафтах таежной зоны ожидаются на склонах холмов, увалов и мореных гряд. Здесь со временем на поверхность выйдут красновато-бурые тяжелые суглинки иллювиальных горизонтов, которые часто сильнощебнистые, а при вовлечении их в пахотный горизонт резко ухудшаются физические свойства почв.

Рассмотренные гипотезы гумификации растительных остатков и формирования групп гумусовых веществ в той или иной мере подкрепляются фактическими данными, полученными при лабораторном экспериментальном моделировании. Они вносят известный вклад в развитие представлений о гумусообразовании как одном из уникальных природных



явлений. Данные концепции *представляют интерес, главным образом, в познавательном, но не в научном и прикладном отношении*: ни одна из них не является *достаточно обоснованной и ориентированной на конкретные экосистемы*, поскольку не адекватны нативным природным процессам, протекающим, в частности, в таежных ландшафтах.

Кратко рассмотрим наши критические замечания.

Например, положение об активном формировании высокомолекулярных гуминовых кислот на начальном этапе гумификации **не согласуется** с морфологией подзолистых почв подзон средней и северной тайги; в профиле таких почв горизонт  $A_1$ , где аккумулируются высокомолекулярные ГК, отсутствует. Не вполне корректно и общее положение об отборе термодинамически устойчивых групп гумусовых соединений в почвах. Если бы в экосистемах, в частности, тайги подобный процесс действительно имел место, то в подзолистых почвах аккумулировались только наиболее инертные и устойчивые к биодegradации ГК, чего, как известно, не наблюдается. Гипотезы и концепции гумификации должны вытекать из результатов исследований функционирования конкретных почв и экосистем.

Исследователи должны быть готовы к тому, что всестороннее освещение природного процесса гумификации может потребовать (на данном этапе) признания различных точек зрения, фактически дополняющих друг друга.

*Перенос центра тяжести научных изысканий из лабораторных условий на стационары и внедрение новых методов почвенно-экологических исследований способствовал, в известной степени, получению недостающей информации о своеобразии процесса гумификации на его начальном этапе.*

В экспериментальном материале, представленном А.Д. Фокиным (1986) сформулирована оригинальная концепция образования и матричной достройки структур ГС почв южно-таежных экосистем. Методом радиоактивных индикаторов А.Д. Фокин (1975) установил, что биополимеры (лигнин, клетчатка, гемицеллюлоза и другие основные источники почвенного гумуса) принимают участие в образовании и обновлении молекул ГС только после их радикальной трансформации и формирования водорастворимых органических соединений, находящихся в химически активном – ионно-молекулярном состоянии. Стадия формирования и трансформации водорастворимых органических веществ (ВОВ) – *важнейший этап процесса гумификации растительных остатков в почвах таежных экосистем*.

В частности, было установлено, что максимум мобилизации ВОВ из неразложившихся растительных остатков наблюдается в осенне-ранневесенний период в почвах как южной ( $k_{\text{моб}}^{15}$  0,12...0,18), так и средней тайги ( $k_{\text{моб}}$  0,07...0,21). В летний период значения  $k_{\text{моб}}$  варьировали от 0,01...0,05 для почв среднетаежного региона до 0,02...0,06 (2...6%) для почв южной тайги.

---

<sup>15</sup>  $k_{\text{моб}}$  – безразмерная величина, отражающая соотношение масс углерода ВОВ в жидкой фазе и в исходном органогенном субстрате (твердая фаза) в граммах.

На основе  $k_{\text{моб}}$  величин опада и запаса лесной подстилки были рассчитаны ожидаемый (абсолютный) масштаб мобилизации и вынос ВОВ, например, из **гор. А<sub>о</sub>**. При запасе лесной подстилки  $1,4 \text{ кг/м}^2$ , содержании в ней углерода  $C_{\text{орг}} 0,56 \text{ кг/м}^2$  и  $k_{\text{моб}} 12\%$  в почве подзоны южной тайги ожидается продуцирование в раствор  $67,2 \text{ г/м}^2$  углерода ВОВ за осеннее-ранневесенний период. Из массы опада  $0,4 \text{ кг/м}^2$  дополнительно мобилизуется в раствор  $19,2 \text{ г/м}^2$  углерода ВОВ (т.е. в сумме  $86,4 \text{ г/м}^2$ ). С учетом масштаба мобилизации за летний сезон (при  $k_{\text{моб}} 3\%$ )  $16,8 \text{ г/м}^2$  расчетный абиогенный вынос углерода ВОВ из гор. А<sub>о</sub> под кроной зрелой ели составит ориентировочно  $103 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}^{-1}$  (без учета корневых выделений и массы стока ВОВ с вегетативных органов ели). По мнению Н.С. Паникова и В.Т. Емцева (1989), отток фотоассимилятов в корни (и далее в почву) при дефиците доступных форм N, P и K на жидких средах опыта возрастает в **1,5** раза, что усиливает общий масштаб корневых выделений до **30%** массы веществ, новообразованных при фотосинтезе. Авторы также приводят данные о том, что при аналогичных условиях в почве прижизненные отчуждения органического углерода (корневой экзосмос плюс опад) увеличиваются на 50...60%.

*В этой связи заметный интерес представляет не только оценка масштаба мобилизации ВОВ из растительного опада в пространственно-временном аспекте, но и уточнение баланса новообразованных ВОВ. Натурные опыты, проведенные И.М. Яшиным (1993) методом сорбционных лизиметров (с использованием специально подготовленных сорбентов) и радиоактивных индикаторов, позволили количественно охарактеризовать процесс формирования групп ВОВ (на начальном этапе гумификации), углубили представления о балансе новообразованных компонентов ВОВ.*

Были изучены особенности процесса формирования групп ВОВ с количественных позиций, охарактеризован качественный состав и молекулярные массы новообразованных ВОВ в почвах подзон южной и средней тайги. Так, только в осенне-ранневесенний период убыль массы органогенного субстрата достигает в почвах подзоны южной тайги 56...63%.

В составе ВОВ диагностированы преимущественно индивидуальные органические компоненты (57...80%  $C_{\text{общ}}$  ВОВ) с низкими величинами молекулярных масс (ММ меньше 1000 дальтон): в группе индивидуальных веществ их доля по углероду составляет около 58%, а в группе ФК – 85%. Рассматриваемые группы ВОВ генетически взаимосвязаны, а ФК формируются уже на начальном этапе трансформации опада растительности, локализованного в таежных экосистемах на поверхности подзолистых почв. С увеличением исходной не гумифицированной массы растительных остатков, меченных радиоактивным углеродом  $^{14}\text{C}$ , и локализованных в сорбционных лизиметрах (с **10 до 40 мг**), закономерно возрастает и доля специфических компонентов (ФК) в составе новообразованных ВОВ: с 24 до 43%  $C_{\text{общ}}$  ВОВ. Очевидно, что имеет место так называемый «**масштабный эффект**», заключающийся в том, что после преодоления порога критической массы ВОВ в растворе начинается активное формирование («сборка»)

молекулярных структур качественно новых соединений, в частности, молекул ФК, которые более устойчивы к биодegradации.

Табл. 18. Баланс масс новообразованных ВОВ при трансформации, тотально меченного <sup>14</sup>C растительного опада в глубоко подзолистых легкосуглинистых почвах средней тайги, Вилегодский стационар Архангельской области (И.М. Яшин, 1993).

| Основные статьи баланса ВОВ по измерению активности <sup>14</sup> C   | Лесные                    |                                   | Пахотная автономная почва (плакор) |
|---|---------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
|   | Автономная почва (плакор) | Полугидроморфная почва (западина) |                                    |
| 1. <b>Остаток</b> в исходном растительном субстрате ( <b>консервация опада</b> );   | 16,1±0,3                  | <b>29,5±0,9</b>                   | 5,8±0,2                            |
| 2. <b>Поглощено</b> корнями растений и мхами (включение молекул ВОВ в <b>биогенный поток</b> миграции);   | 0,9±0,0                   | <b>7,4±0,6</b>                    | 0,1±0,0                            |
| 3. <b>Включено</b> в гумусовые соединения почвы в слое внесения радиоактивной метки (0...3 см) – <b>обновление структур</b> : прежде всего, фульвокислот; | 5,8±0,1                   | <b>18,2±0,4</b>                   | 4,1±0,1                            |
| 4. <b>Минерализовано ВОВ</b> до конечных продуктов (CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O и минеральных солей);  | <b>70,4±4,6</b>           | <b>32,4±2,5</b>                   | <b>83,0±4,1</b>                    |
| 5. <b>Включено в абиогенную миграцию</b> с потоком гравитационной влаги (нижняя граница зоны – 39...44 см).   | 6,8±0,2                   | <b>12,5±0,3</b>                   | 7,0±0,2                            |

\*Процент суммарной радиоактивности исходного органогенного субстрата через 2 года наблюдения; в исследованиях участвовали А.И. Карпунин и И.Г. Платонов.

По всей видимости, подобный порог не преодолевается в начальных биохимических реакциях, характерных для подзолистых почв, при образовании сложных структур типа гуминовых кислот. Иначе говоря, в почвах таежных экосистем для «сборки» молекул ГК не только не хватает подходящего сырья (компоненты ВОВ своеобразны по химическому составу, слабо закрепляются почвенными минералами и легко элюируются водой), но оно оказывается не соответствующего качества: ВОВ имеют очень низкое содержание N и Ca<sup>2+</sup>, избыток протонов, содержат низкомолекулярные органические вещества с кислотными функциями, заметно не насыщены ионами металлов.

Среди последних в индивидуальной группе ВОВ, выделенных из **гор. А<sub>0</sub><sup>T</sup>**, преобладают полифенольные компоненты, количество которых по углероду варьирует от 20 до 34% C<sub>общ</sub> данной группы ВОВ в свежем и от 12 до 24% в гумифицированном субстрате; урновые и другие органические кислоты. Их относительное содержание в водных вытяжках колеблется соответственно от 16 до 30% и от 8 до 16% из свежего опада; из гумифицированного – от 8 до 20% и от 2 до 10% от C<sub>общ</sub> данной группы ВОВ (И.М. Яшин, 1993).

**В подзоне средней тайги** процессы гумификации и гумусообразования тесно связаны, в частности, со степенью гидроморфности подзолистых почв и характером их использования (табл. 18). В автономных (на плакорах)

почвах элювиальных геохимических ландшафтов преобладают такие процессы, как *консервация и минерализация новообразованных ВОВ*, а в полугидроморфных аналогах (развитых в транс-аккумулятивных ландшафтах), основные статьи баланса новообразованных ВОВ выражены менее контрастно. Здесь *доминируют абиогенная миграция и включение ВОВ в биогенный поток*. Наряду с этими статьями установлено *очень слабое участие молекул ВОВ* в сорбционном обновлении нативных структур гумусовых веществ, варьирующее от 4,1...5,8% (автономные почвы) до 18,2% за 2 года (полугидроморфные почвы)<sup>16</sup>. В подобных реакциях участвуют ВОВ, обновляющие главным образом молекулярные *алифатические структуры ФК*, а среди них фракции свободных и связанных с полуторными оксидами Fe и Al.

Напомним, что принцип *метода радиоактивных индикаторов* базируется на положении, что радиоактивный изотоп или меченая молекула ведут себя идентично стабильному изотопу или немеченому веществу, входящему в сложное природное соединение (допустим, гумус почвы). Изотопные эффекты, связанные с наличием радиоактивности, отсутствуют или практически не влияют на биохимические и сорбционные процессы как в почвах, так и в экосистемах (В.В. Рачинский, 1988).

*Наряду со сложными балансовыми исследованиями трансформации растительных остатков и формированием групп гумусовых веществ в нативных почвах и ландшафтах, заметный интерес представляет оценка скорости превращения растительных остатков в реальной экологической ситуации. Этот вопрос и рассмотрим дальше.*

## **8.2. Диагностика коэффициента трансформации растительных остатков в почвах тайги**

Наряду с методами *диагностики коэффициентов гумификации и минерализации* растительных остатков важное значение имеет разработка методики, с помощью которой можно оценить интегральный параметр – коэффициент трансформации растительных остатков  $k_{тр}$ , который включает в диагностику коэффициента мобилизации  $k_{моб}$  компонентов ВОВ из твердой фазы (растительные остатки) в почвенный раствор (жидкая фаза).

Определение  $k_{моб}$  возможно двумя способами: в натурном опыте с помощью модификации метода сорбционных лизиметров (И.М. Яшин, 1993) и расчетным методом в рамках единого кинетического уравнения:

$$-\frac{dM}{dt} = k \cdot M^n. \quad (40)$$

---

<sup>16</sup> Величины **обновления молекулярных структур ГС** в первом приближении можно рассматривать в качестве  $k_{гум}$ , относящихся к группе фульвокислот. **Гуминовые кислоты** в подзолистых почвах средней и северной тайги, по-видимому, являются реликтами предшествующих эпох развития почв и ландшафтов.

Относительно процесса трансформации растительных остатков в сорбционных лизиметрах, локализованных на поверхности почвы или в толще генетических горизонтов, уравнение (40) запишем так:

$$-\frac{dM_{mp}}{dt} = k_{mp} \cdot M_{mp}, \quad (41)$$

где  $M_{тр}$  – трансформированная масса растительных остатков, г;  
 $a$  – масса растительных остатков в начале опыта ( $t = \text{нуль-момент}$ ), г;  
 $x$  – трансформированная масса растительных остатков, т.е. та часть массы ВОВ, которая мобилизовалась в раствор и была биохимически утилизирована, г;  
 $(a-x)$  – остаточная масса растительных остатков на момент времени  $t$ , г;  
 $k_{тр}$  – коэффициент трансформации (константа скорости трансформации) – зависит от природы веществ, а также гидротермических условий экосистемы и ландшафта;  $k_{тр}$  – интегральный параметр.

$k_{тр}$  включает, по крайней мере, три составляющие:

$k_{моб}$  – коэффициент мобилизации ВОВ из твердой фазы (растительных остатков);

$-k_{мин}$  – коэффициент минерализации большей части массы ВОВ и

$k_{гум}$  – коэффициент гумификации меньшей части массы ВОВ.

При оценке констант скоростей  $k_{моб}$ ,  $-k_{мин}$ , и  $k_{гум}$  в отношении ВОВ установлено, что они располагаются в следующий ряд:  $k_{моб} \geq -k_{мин} \geq k_{гум}$ .

Константа скорости гумификации молекул ВОВ оказывается самой малой величиной, а данная стадия самой медленной (лимитирующей)<sup>17</sup> в общем процессе превращения опада растений в различные продукты почвообразования и, в частности, гумусовые соединения почв.

Рассмотрим эти положения на конкретном примере.

Перепишем уравнение (29), отметив, что  $M_{тр}$  – грамм-моль веществ (текущая концентрация ВОВ, точнее их масса). Причем для ВОВ удобнее использовать массу (мг, г), поскольку эта группа соединений имеет переменный молекулярно-массовый состав, зависящий от содержания в трансформируемых остатках ионов  $Ca^{2+}$  и азота, а также *от ландшафтных условий их превращения и закрепления в почве*:

$$-\frac{d(a-x)}{dt} = k_{mp}(a-x). \quad (42)$$

Преобразуем данное выражение, чтобы оно было удобно для интегрирования (с учетом  $a = \text{const}$ , т.е. в нашем опыте – в сорбционных лизиметрах – не происходит привнос подобных веществ). Тогда:

$$\frac{dx}{a-x} = k_{mp} \cdot dt = \int_0^x \frac{dx}{a-x} = k_{mp} \int_0^t dt, \quad (43)$$

<sup>17</sup> Лимитирующая стадия позволяет оценить весь процесс трансформации с количественных позиций. Промежуточные продукты помогают понять механизм трансформационных превращений опада.

откуда

$$k_{\text{тр}} = \frac{1}{t} \ln \frac{a}{a-x}. \quad (44)$$

Подставив в последнее уравнение фактические данные лизиметрического опыта с сорбционными лизиметрами ( $t = 365$  сут;  $a = 7,5$  г  $C_{\text{орг}}$  в растительных остатках;  $x = 5,63$  г углерода ВОВ, которые сорбировались активированным углем и утилизировались в массе сорбента; степень утилизации – 75% от новообразованной массы ВОВ), рассчитаем значение  $k_{\text{тр}}$  для условий почв подзоны южной тайги (юго-запада Подмосковья):

$$\begin{aligned} k_{\text{тр}} &= \frac{2,303}{365} \lg \frac{7,5}{1,87} = 6,31 \cdot 10^{-3} \cdot (\lg 7,5 - \lg 1,87) = \\ &= 6,31 \cdot 10^{-3} \cdot 0,61 = \mathbf{3,9 \cdot 10^{-3} \text{ сут}^{-1}} \end{aligned} \quad (45)$$

Физический смысл  $k_{\text{тр}}$ : данный параметр соответствует той доле углерода исходной массы изучаемых растительных остатков, которая успела бы трансформироваться за единицу времени опыта (сут), если бы масса исходного органогенного субстрата оставалась равной единице (в единице объема).

Из стационарного опыта следует, что большая часть новообразованной массы ВОВ утилизируется (75...85% и более), но какие образуются при этом продукты реакций (при гумификации<sup>18</sup> и минерализации) можно узнать только *с помощью приема их сорбции на целевых сорбентах* ( $Al_2O_3$ , ионитах и активированном угле в сорбционных лизиметрах). До сих пор подобных сведений еще недостаточно и они получены в основном для ландшафтов южной, средней и северной тайги европейской территории страны (И.М. Яшин, 1993, 2012). В отношении других экосистем априори утверждается (в соответствии с фракционно-групповым составом гумуса твердой фазы почв), что преобладают гуминовые и фульвосоединения, хотя доказательств крайне мало. В почвах гуминовые и фульвокислоты могли остаться от предыдущих (с иными биоклиматическими условиями) циклов почвообразования при прохождении, например, гидроморфной стадии.

В принципе,  $k_{\text{тр}}$  отражает весь кинетический ход превращения растительных остатков, а в аддитивном виде  $k_{\text{тр}} = k_{\text{моб}} - (-k_{\text{мин}} + k_{\text{гум}})$  без учета миграционных потоков (абиотического и биогенного) – осадкообразования ионами металлов и сорбции коллоидами и детритом. Тогда  $k_{\text{тр}} \text{ ВОВ} \approx k_{\text{моб}} + k_{\text{мин}} \text{ ВОВ}$ . Масса углерода жидких ВОВ, уцелевших от биodeградации в сорбенте (активированном угле), весьма незначительна (для различных растительных остатков – «свежих» и гумифицированных) и колеблется от десятых долей до 2...3 (5%) трансформированной массы. Исходя из расчетной величины  $k_{\text{тр}}$  (для «свежих» листьев березы,

<sup>18</sup> Процесс формирования новых структур гумусовых веществ в почвах очень медленный и постепенный, поскольку вначале молекулы ВОВ должны активизироваться и преодолеть известный энергетический барьер прежде, чем вступят в реакции поликонденсации и т.д.

трансформировавшихся в сорбционных лизиметрах на поверхности дерново-подзолистой почвы), равной  $3,9 \cdot 10^{-3} \text{сут}^{-1}$ , найдем **период полу превращения** изучаемой массы опада по известному выражению:

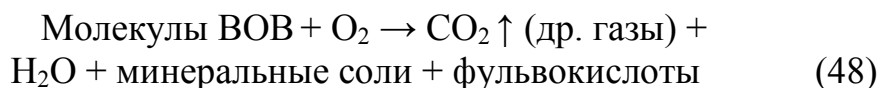
$$k_{\text{тр}} = \ln 2/T_{1/2} \quad (46)$$

Отсюда

$$T_{1/2} = \ln 2/k_{\text{тр}} = 0,693/3,9 \cdot 10^{-3} = 182 \text{ сут.} \quad (47)$$

При  $2T_{1/2}$  получим  $1/4$ , а при  $3T_{1/2} - 1/8$  указанного периода до завершения процесса. Причем *нисходящая экспонента (при  $-k_{\text{мин}}$ )* на графике в прямоугольной системе координат долго не достигнет оси абсцисс. Интересно другое: построив график двух экспонент с учетом  $k_{\text{моб}}$  и  $-k_{\text{мин}}$ , опустив затем перпендикуляр из точки пересечения кривых на ось абсцисс, получим значение времени установления квази стационарного состояния при трансформации молекул ВОВ. В этой «точке» функционирования таежной фации *скорости мобилизации ВОВ и их глубокой биodeградации* временно приходят в стационарное состояние. Это время нужно биоте для выбора направления в дальнейшей структурной перестройке ВОВ и формирования (отбора) новых молекул гумусовых веществ. *Здесь понадобится образец молекулы*. По-видимому, им будет не гуминовая (высокомолекулярная), а низкомолекулярная структура фульвокислоты. Она и образуется в лесной подстилке. Пойдем дальше. Рассчитаем коэффициент минерализации  $-k_{\text{мин}}$ .

**Процесс минерализации** или глубокой микробиологической биodeградации ВОВ схематично можно выразить так:



В почвах таежных фаций данный процесс не идет до конца. Часть молекул ВОВ сохраняется и превращается в новые, термодинамически более устойчивые структуры – фульвокислоты и их соли.

Масса углерода ВОВ, участвующих в реакциях окисления:

$$M_{\text{ВОВ}} = 12/44 \approx 0,273 \text{ (поправочный коэффициент).}$$

Тогда

$$-k_{\text{мин}} = 0,273(\ln 5,63/182) = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ сут}^{-1}. \quad (49)$$

Константа гумификации молекул ВОВ рассчитывается на основе предположений, что *малая часть массы ВОВ* превращается в специфические продукты (в экосистемах тайги – это фульвокислоты). Масса углерода ВОВ, участвующих в элементарных реакциях гумификации:

$$M_{\text{гум}} = 12/3500^{19} = 3,4 \cdot 10^{-3}. \quad (50)$$

<sup>19</sup> В числителе – атомная масса углерода, в знаменателе – средняя молекулярная масса фульвокислот (данные А.И. Карпухина, 1984).



А коэффициент гумификации будет равен:

$$k_{\text{гум}} = 0,0034 \cdot (\ln 1,87/182) = 5,0 \cdot 10^{-6} \text{сут}^{-1} \quad (51)$$

Следовательно, скорость реакций, определяющих формирование новых структур гумусовых веществ (преимущественно молекул ФК) и их обновление, примерно в 1000 раз меньше скорости минерализации групп ВОВ, т.е. скорости гумификации и минерализации явно неравнозначные -  $V_{\text{гум}} \ll V_{\text{мин}}$ .

Такое неравенство скоростей ряда процессов, участвующих в трансформации растительного опада таежных фаций, весьма важно в *экологическом отношении*: интенсивная биогенная утилизация опада освобождает пространство наземных экосистем от органогенных субстратов, служащих убежищем для многообразных групп живых организмов (в том числе и патогенных). Но это малая толика познания данного процесса. Главное – биодegradация молекул ВОВ способствует **высвобождению энергии**, накопленной при фотосинтезе в химических связях органических веществ, а также химических элементов – источников питания микроорганизмов.

### Вопросы для самоконтроля

1. Приведите пример расчета коэффициента обновления  $k_{\text{обн}}$  известной массы фульвокислот в дерново-подзолистой почве (гор.  $A_{\text{пах}}$ ) южно-таежного агроландшафта компонентами ВОВ (по данным лизиметрических опытов); конкретные параметры расчетов дает преподаватель.
2. Объясните, в чем заключается физический смысл  $k_{\text{обн}}$ ?
3. Что означают неравенства:  $k_{\text{обн}} > k_{\text{мин}}$  и  $k_{\text{мин}} > k_{\text{обн}}$  с почвенно-экологической точки зрения функционирования агроландшафта?
4. При соблюдении каких агроэкологических условий возможно установление динамического равновесного состояния в пахотных дерново-подзолистых почвах: когда а)  $k_{\text{гум}} \geq k_{\text{мин}}$ , б)  $k_{\text{обн}} = k_{\text{мин}}$ , в)  $k_{\text{мин}} < k_{\text{гум}} > k_{\text{обн}}$ ?
5. С какой целью рассчитывают коэффициент мобилизации?
6. Назовите барьеры в каштановой почве и черноземах.
7. Константа скорости гумификации – расчет и обоснование.
8. Теории гумификации.
9. Гумусообразование и гумификация.
10. Состав гумусовых веществ почв таежной зоны.
11. Кто предложил коэффициент миграции?
12. Кто предложил учитывать коэффициент мобилизации?
13. Экологическое значение процесса минерализации компонентов ВОВ.
14. Коэффициент трансформации растительных остатков в почве.
15. Коэффициент гумификации растительных остатков.
16. Что используют для дыхания микроорганизмы?
17. Процессы формирования молекул фульвокислот.
18. Гуминовые вещества в почвах таежной зоны.

#### 8.4. Комплексная оценка загрязнения почв и ландшафтов

Комплексная оценка эко-геохимического состояния ландшафтов (особенно вблизи городов и промышленных предприятий) включает ряд взаимосвязанных блоков.

Первый блок – источники загрязнения, к которым относят промышленные предприятия, транспорт, а в городах – жилищно-коммунальные объекты; второй блок – транзитные среды – ландшафты, которые принимают выбросы. Здесь происходит их частичная трансформация и транспортировка – по каскадным геохимическим ландшафтам;

третий блок – депонирующие среды – ландшафты, в которых накапливаются и преобразуются техногенные продукты: донные отложения в базисах эрозии (озёра, реки, ручьи, водохранилища...), почвы (особенно на карбонатном, глеевом, сульфидном, сорбционном... барьерах), растительность, лесные подстилки и опад, микроорганизмы и почвенные животные (Мур Дж., Рамамурти С., 1987), а в городах – люди, строения... (Экогеохимия городских ландшафтов, 1995).

Важное место отводится *инвентаризации и диагностике* основных видов техногенных загрязнителей и их потоков. Среди них отметим *атмосферные выпадения аэрозолей, пыли, сажы...*, *загрязнения почвенного покрова и загрязнения депонирующих природных систем*.

Атмосферные потоки в городах и промышленных центрах (равно как и вблизи них – в соответствии с розой ветров) сильно запылены. По сведениям Ю.Е. Саета (1988) и М.А. Глазовской (1988) запылённость промышленных городов центра Русской равнины составляет **50-150 кг/км<sup>2</sup>** в сутки, а в фоновых лесных ландшафтах она в **5-10 раз** меньше. Тонкодисперсные частицы пыли способны поглощать аэрозоли, содержащие новообразованные минеральные кислоты (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>...), а также химические элементы с высокими Кларками – **Fe, Mn, Zn, Cr и Cu**. Более токсичные тяжелые металлы – **Cd, Pb, Hg, Sb, As** обычно находятся в паро-газовой фазе аэрозолей. Среди других поллютантов особую опасность для биоты представляют полициклические ароматические углеводороды (**ПАУ**), а среди них, например, *3,4-бензпирен; формальдегид, оксиды S, N, P и галогены*.

Вследствие глобального переноса и перераспределения многих поллютантов (в частности, тяжёлых металлов) возникают определенные трудности *при диагностике фона* атмосферных выпадений на региональном уровне. Известно, что почвенный покров – основной поставщик в атмосферу тяжёлых металлов естественного генезиса. Однако пыль, оседающая из атмосферы (в сравнении с почвами), в 5-20 раз обогащена **Hg, Zn, Sn, Cd и Cu**. Считается, что для этих металлов, а также для сурьмы и мышьяка антропогенный вклад в их общую массу (в атмосфере) достигает > 50%. Поэтому понятие «фон» для атмосферных выпадений относительно. Техногенные аномалии, как правило, приурочены к промышленным зонам, свалкам, городам, крупным карьерам, хранилищам отходов, автострадам, аэропортам.

Особенно масштабные атмосферные выпадения отмечаются в горных котловинах (города Кызыл, Братск, Иркутск...), а наименьшие – в приморских ландшафтах, испытывающих активный ветровой режим, импульверизацию солей и частые атмосферные осадки.

Диагностику атмотехногенных загрязнений ландшафтов на европейском Севере России весьма эффективно осуществляют **в зимний сезон**. Снег обладает высокой *сорбцией экотоксикантов*, так что к периоду снеготаяния в нём сосредотачиваются заметные массы загрязнителей. После отбора, таяния и подготовки проб снега в лаборатории, исследуются вещества в двух фазах: первая – растворенная, прошедшая через фильтры с диаметром пор менее 0,45 мкм (приём ультрафильтрации) и вторая – оставшаяся на фильтре, которую затем полностью растворяют в сильных минеральных кислотах (здесь сосредоточены химические элементы во взвешях и коллоидах). Определив аналитические концентрации изучаемых элементов, рассчитывают их массы и коэффициенты *техногенной концентрации* (Геохимия..., 1990). Для полиэлементных аномалий используют суммарные показатели загрязнений  $Z_c$  или нагрузки  $Z_p$ . Они характеризуют степень загрязнения почв не одним, а несколькими тяжелыми металлами относительно фона (породы, коры выветривания):

$$Z = \sum_{i=1}^n k_c - (n - i), \text{ где} \quad (52)$$

$k_c$  – коэффициенты техногенной концентрации  $> 1$  (или 1,5). Геохимики считают, что при  $Z_c > 100-200$  ландшафты имеют высокий и опасный уровень загрязнения (Н.С. Касимов, 1993, 1995). Рассчитывается  $k_c$  как соотношение масс экотоксиканта в загрязненной и фоновой почвах. *Возникает непростой вопрос: что такое «фоновая почва»?* Чаще всего в расчетах используют значения, полученные не на фоновых почвах, а находящихся рядом с загрязненными аналогами. Ведь добраться в биосферный заповедник, например, ЦЛГПБЗ в Тверской области или на Соловецкий архипелаг за тысячи километров для отбора незагрязненных почв рискнет не каждый.

Выражение (53), нередко рассматривают как *суммарный индекс загрязнения почвы*, в частности, тяжелыми металлами. Это не совсем верно, поскольку нужно оценить загрязнение не только почвы, а и иных компонентов экосистемы – биоты, грунтовых вод, пород во взаимосвязи. В этом направлении под руководством И.М. Яшина (2010-2014) на Лесной опытной даче РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева выполнены исследования, которые позволили уточнить вышеуказанное выражение. Нами предложена формула (40а), которая отражает не только совокупность изученных экотоксикантов, но и основные компоненты экосистемы: почву, биоту, аэральные выпадения (по снеговой съемке), а также масштаб водной миграции загрязнителей (отчуждаемую массу мигрантов). Причем, вместо выражения  $(n-1)$  мы вводим другой математический параметр:  $(1 + (n/n-1))$ . Он равен примерно 2 и его следует прибавлять к индивидуальному коэффициенту при оценке загрязнения выше указанных компонентов

экосистемы. Отметим, что при диагностике загрязнения биоты рассчитываются индивидуальные коэффициенты биогенного накопления  $k_{бн}$  загрязнителей - в растениях, опаде, слоях лесной подстилки и корнях, которые суммируются и получается *общий коэффициент биогенного накопления  $k_{бн}$  экотоксикантов в биоте*. В подзолах, развитых на двучленных породах, содержание химических загрязнителей учитывается не в одном (верхнем) горизонте, как при агрохимических изысканиях, а во всем профиле мини подзола (данная масса почвы активно участвует в биогеохимическом круговороте – биогенной и водной миграции). Предлагаемая нами **интегральная оценка** химического загрязнения экосистемы по индексу суммарного загрязнения компонентов экосистемы рассчитывается по новому выражению:

$$J_{зз} = \Sigma k_{зб} + (1 + (n/n-1)) + \Sigma k_{зп} + (1 + (n/n-1)) + \Sigma k_{зс} + (1 + (n/n-1)) + \Sigma k_{миг} + (1 + (n/n-1)) \quad (53),$$

где  $J_{зз}$  – индекс суммарного загрязнения экосистемы (по количеству изученных ее компонентов – почв, растительности, вод, снега, водной миграции),

$\Sigma k_{зб} + (1 + (n/n-1))$  – суммарный коэффициент химического загрязнения биоты (растений, лесной подстилки, растительного опада и корней), например, ионами тяжелых металлов (ТМ) -  $Pb^{2+}$ ,  $Hg^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ; здесь  $n = 9$ ; данный коэффициент определяется при изучении биогенной продуктивности экосистем,

$\Sigma k_{зп} + (1 + (n/n-1))$  - суммарный коэффициент химического загрязнения почвы, как компонента и продукта экосистемы, теми же ТМ,

$\Sigma k_{зс} + (1 + (n/n-1))$  – химическое загрязнение снега аэральными выпадениями в условно абиотический период (при очень слабых эвапотранспирации и фотосинтезе в зоне тайги); концентрацию экотоксикантов в талой воде следует умножить на массу воды (согласно запасам снега на  $1 \text{ м}^2$ ), чтобы получить искомую массу загрязнителей на единице площади. Выделяют растворимые формы, например ТМ, и остающиеся на плотном бумажном беззольном фильтре (взвеси). Эти сведения важны при оценке миграционных параметров экотоксикантов в профиле почвы,

$\Sigma k_{миг} + (1 + (n/n-1))$  - суммарный коэффициент водной миграции и химического загрязнения лизиметрических вод почвенного индивидуума экосистемы. Он отражает долю наиболее миграционно способных форм экотоксикантов. Для ионов ТМ – это органоминеральные комплексные соединения. Возможен также их вынос *в составе коллоидов переходных металлов под «защитой» компонентов ВОВ* с кислотными свойствами.

$k_{\text{миг}}$  определяют с помощью метода сорбционных лизиметров. Учитывать необходимо также коэффициент мобилизации  $k_{\text{моб}}$  химических элементов в реальной экосистеме из твердой фазы в растворимое состояние.

Напомним, ТМ в форме оксидов практически не токсичны для биоты и не мигрируют в почве. Поэтому валовое содержание ТМ в форме оксидов удобно только для расчета их миграционных параметров в почве.

Наряду с миграцией веществ в насыщенных водой почвах важную (и специфичную) роль<sup>20</sup> играет диффузия. Этот процесс протекает круглый год и, в отличие от сорбции, приводит к рассеиванию ионов, молекул, радикалов из микронной локальной концентрации веществ на сорбционных барьерах по всему объему генетических горизонтов. Диффузия способствует сегрегации ионов Fe, Mn и молекул фульвокислот в конкреции **при оглеении**, куда стягиваются и ионы ТМ. Движущими силами диффузии являются: градиент концентрации, разность химических потенциалов элементов и гидротермический градиент. При отсутствии внешнего воздействия диффузионный поток мобильных веществ с равной вероятностью перемещается в любом направлении генетических горизонтов и почвенного профиля. Данный параметр в почве можно выразить через произведение концентрации вещества (моль·л<sup>-1</sup>) на скорость его направленного перемещения ( $v_1$  – м·с<sup>-1</sup>) через заданную площадь сечения миграционного потока  $S$  (м<sup>2</sup>) за время  $t$  (с).

*Геохимики выделяют пять основных групп экотоксикантов:*

- 1) Макрокомпоненты снеговых вод – пыль, частицы золы, сажи, анионы сильных минеральных кислот -  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  вблизи промышленных объектов и в сельских ландшафтах, а частицы  $\text{SiO}_2$  – появляются в воздушных массах вблизи цементных и кирпичных заводов, здесь же диагностируются ионы  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  и другие в цементной пыли, вызывающие бронхиты;
- 2) Тяжелые металлы (и микроэлементы);
- 3) Фенолы, формальдегид, аммиак, метан,  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$ ;
- 4) Полиароматические углеводороды - ПАУ;
- 5) Радионуклиды.

Иные, и весьма токсичные вещества, **полихлорбифенилы, диоксины, микотоксины** также загрязняют ландшафты, но они изучены слабо. Их то же следует включить в перечень выше названных экотоксикантов.

При эко-геохимическом картографировании учитывают вид производства и его влияния на кислотно-основные параметры. Например, *цементные и строительные предприятия, теплоэнергетика, заводы по производству аммиака и чёрная металлургия способствуют подщелачиванию почв* (а рН снеговых вод вблизи этих объектов составляет 8,5-9,4), увеличению в составе их поглощающего комплекса ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ . Напротив, **тепловые станции** на угле, коксо- и нефтехимические заводы, цветная металлургия и

---

<sup>20</sup> Особенно в почвах, испытывающих устойчивое или временное сезонное переувлажнение. Данные о водной миграции веществ следует дополнять информацией об их диффузии.

терриконы угольных шахт приводят к **подкислению почв** и природных вод в сравнении с фоновыми ландшафтами.

Химическое загрязнение почвенного покрова. По эффекту воздействия на почвы токсичные химические элементы и сложные вещества, содержащиеся в техногенных продуктах, могут быть дифференцированы на две группы: **первая** – биохимически (точнее, биогеохимически) активные соединения. В этом случае техногенные продукты, сорбируясь гумусом, коллоидами и тонкодисперсными вторичными минералами генетических горизонтов почв, изменяют кислотно-основные условия, окислительно-восстановительный потенциал, соотношение металлов по фракциям гуминовых и фульвокислот и т.д. Эти изменения в основном вызывают элементы с высокими Кларками и слабotoксичные – **Fe, Mn, Ca, Mg, Na, K** и анионы сильных и слабых минеральных кислот. Со временем и эти компоненты могут вызвать нарушения в сложившихся (генетическим путём) разнообразных динамических равновесиях природных систем. Со временем действие даже слабotoксичных веществ негативно отразится на микрофлоре и почвенных животных.

**Во втором случае** на почву действуют высокотоксичные элементы (и вещества): **Be, Hg, As, Cd, Se**, диоксины, опасность влияния которых реализуется не столько в изменении свойств почв, сколько в их *биогеохимической миграции*, попадании, например, в трофические цепи и живые организмы, где они аккумулируются и вызывают негативные изменения в биохимических реакциях, циклах обмена веществ и энергии, функционировании клеток и отдельных органов людей, животных, то есть вызывают экологические заболевания. Их диагностика только разрабатывается, хотя медики давно отмечают высокий уровень корреляции тех или иных заболеваний людей в зависимости от характера производств, их мощности, наличия (или отсутствия) очистных сооружений, реализации предупреждающих природоохранных мероприятий.

При картографировании следует учитывать местоположение источников загрязнения, транзитных и депонирующих сред в геохимических ландшафтах. Например, в степных и сухостепных ландшафтах (ЭГЛ) равномерное по профилю распределение поллютантов сменяется *поверхностно аккумулятивным*. В транзитных ЭГЛ чернозёмов ливневые осадки вызывают смыв и переотложение загрязнителей. В таёжных ландшафтах антропогенные аккумуляции экотоксикантов маскируют элювиально-иллювиальную дифференциацию веществ по почвенному профилю. В этих ландшафтах важной становится водная (абиогенная) миграция экотоксикантов в сопряжённых почвенно-геохимических катенах.

Содержание токсичных химических элементов в ландшафтах нормируется обычно путём сравнения трёх показателей:

- 1) почвенно-геохимического фона,
- 2) Кларка литосферы (кор выветривания и почвообразующих пород),

3) предельно допустимых концентраций – ПДК (точнее масс) конкретных элементов для конкретных элементарных геохимических ландшафтов. При этом нельзя использовать одни и те же значения ПДК для разных географических зон, ландшафтов и почв.

На наш взгляд, оценка ПДК\* по М.А. Глазовской (1988) затрагивает весьма высокий уровень организации веществ в ландшафтах. Автор отмечает «...Предельно допустимый уровень состояния почв – это тот уровень, при котором начинает изменяться оптимальное количество и качество создаваемого вновь живого вещества, т.е. биологическая продукция». Действие же экотоксикантов и, в частности, *нормирование ПДК* и загрязнения следует начинать с наиболее чутко реагирующих групп живых организмов – *микробиоты (и их сукцессий), червей, пчёл, лишайников* и других видов. Биопродуктивность – это интегральный показатель и он может проявиться только через ряд лет. Гораздо более эффективным параметром (наряду с биоиндикацией) может быть десорбция поллютантов *из коры сосны, являющейся мощным сорбентом различных веществ*.

При этом в почвах целесообразно различать уровни содержания и уровни загрязнения различными формами, в частности, тяжёлых металлов. Например, в работе Н.Г. Зырина и А.И. Обухова (1988) приведена следующая шкала нормирования тяжёлых металлов в почве. В ней, к сожалению, не указана форма тяжёлых металлов (табл. 19).

В то же время, указанные авторы отмечают, что средние уровни содержания тяжёлых металлов соответствуют около Кларковым значениям или немного ниже их. Поэтому, если у исследователей нет сведений о фоновой ситуации, то в качестве фона можно использовать значения Кларков элементов в литосфере.

Депонирующие среды. Гидрогеохимический состав природных вод (ручьи, озёра, грунтовые воды) в зонах загрязнения заметно отличаются от фоновых условий. Изменяется их степень минерализации, содержание, состав и соотношение основных компонентов. Особенно повышается содержание в водах техногенных ландшафтов синтетических веществ – *фенолов, углеводородов, моющих поверхностно-активных веществ, полихлорбифенилов*. В загрязнённых поверхностных водах увеличивается доля растворимых форм тяжёлых металлов, которые могут поглощаться гидробионтами.

Нередко особенности состава природных вод зон техногенеза свидетельствуют о характере и качестве работы очистных сооружений. Дополнительные сведения о масштабе загрязнения природных вод могут дать исследования **донных осадков** (илов).

---

\* ПДК – ориентировочный параметр. Требуется экспериментального (в опытах) обоснования.



**Табл.19.** Шкала экологического нормирования тяжёлых металлов для почв со слабо- и кислой реакцией среды - Н.Г. Зырин и А.И. Обухов (1988).

| Градации                      | Содержание, мг/кг |               |          |         |         |               |
|-------------------------------|-------------------|---------------|----------|---------|---------|---------------|
|                               | Pb                | Cd            | Zn       | Cu      | Ni      | Hg            |
| <b>1. Уровень содержания:</b> |                   |               |          |         |         |               |
| – очень низкий                | < 5               | < 0,05        | < 15     | < 5     | < 10    | < 0,05        |
| – низкий                      | 5-10              | 0,05-0,1      | 15-30    | 5-15    | 10-20   | 0,05-0,1      |
| – средний                     | 10-35             | 0,1-0,25      | 30-70    | 15-50   | 20-50   | 0,1-0,25      |
| повышенный                    | 35-70             | 0,25-0,5<br>0 | 70-100   | 50-80   | 50-70   | 0,25-0,5<br>0 |
| – высокий                     | 70-100            | 0,5-1,0       | 100-150  | 80-100  | 70-100  | 0,5-1,0       |
| – оч. высокий                 | 100-150           | 1-2           | 150-200  | 100-150 | 100-150 | 1-2           |
| <b>2. Уровень загрязнения</b> |                   |               |          |         |         |               |
| – низкий                      | 100-150           | 1-2           | 150-200  | 100-150 | 100-150 | 1-2           |
| – средний                     | 150-500           | 2-5           | 200-500  | 150-250 | 150-300 | 2-5           |
| – высокий                     | 500-100<br>0      | 5-10          | 500-1000 | 250-500 | 300-600 | 5-10          |
| – оч. высокий                 | > 1000            | > 10          | > 1000   | > 500   | > 600   | > 10          |

Кроме традиционного подхода при оценке экологического состояния ландшафтов используются технологии геоинформационных систем (ГИС); Chidly (1993); Le Bas, Jamange (1996); GIS... (1997); В.А. Рожков с соавт. (1996); И.Ю. Савин с соавт. (1998) и другие. Важным преимуществом ГИС является возможность выполнения совместного анализа множества отдельных слоёв информации с использованием математических приёмов геостатистики, моделирования и экспериментальных данных. Этот анализ осуществляется как для крупных пространственных объектов, так и для «точечных» – стационарных участков.

В частности, при анализе земельных ресурсов регионов широко используется пакет программ ГИС ILVIS версий 2.2 и более новых, являющийся сокращением от „Integrated Land and Water Information System“ – интегральная земельная и водная информационная система.

Подобная система была разработана в Международном институте аэрокосмической съёмки и наук о Земле (ITC) в Нидерландах в 1985 году.

### **ПДК: достоинства критерия и его недостатки**

В соответствии со статьёй закона РФ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» эпидемиологическая обстановка обозначает такое состояние общественного здоровья населения регионов России и среды обитания людей, при котором отсутствует опасное и вредное влияние её факторов на биоту и, в том числе, на человека. При этом экологические факторы действуют не по отдельности, а совместно. Их интегральный эффект и по масштабу, и по скорости воздействия может быть более значительным. Считается, что из экотоксикантов 70% регулярно попадает в

организм людей с пищей, 20% – из воздуха и 10% – с водой (Протасов В.Ф., 1999).

Для количественной оценки химического состояния окружающей среды и в особенности для принятия реальных мер на административном уровне, необходимо знать конкретные параметры содержания экотоксикантов в различных компонентах геохимического ландшафта (включая и продукты питания). Эти параметры, получившие название **ПДК** (предельно допустимых концентраций) учитывали предельно безвредное для человека (и биоты) содержание отдельных химических элементов (в том числе и техногенного генезиса).

**Табл. 20** Регионы России с весьма неблагоприятной (кризисной) экологической обстановкой (комментарии и уточнения – **И.Я.**)

| Регион                                 | Экологические проблемы, вызванные антропогенным воздействием  |
|--|---|
| 1. Кольский полуостров                 | Нарушение почвенного и растительного покрова горными выработками, истощение и загрязнение вод суши вследствие уничтожения биогенного и почвенного (сорбционного) барьеров. Разрушение кормовых угодий для диких животных. Активная эрозия (водная) веществ из терриконов и хвостохранилищ.      |
| 2. Московская область                  | Активное загрязнение атмосферы оксидами азота, серы..., ухудшение качества вод суши и сокращение их запасов, утрата плодородия почвами с.х. угодий, химическое загрязнение почв супераквальных и болотных ландшафтов, деградация лесных массивов (в том числе и вследствие масштабных пожаров). |
| 3. Калмыкия                            | Деградация естественных сухо-степных ландшафтов, опустынивание и интенсивная дефляция, экотоксиканты мигрируют в основном при ветровой эрозии и попадают в организм человека при дыхании. Резкое сокращение водных запасов. Засоление приморских ландшафтов.                                    |
| 4. Новая Земля (Архангельская область) | <u>Радиоактивное</u> загрязнение, поступление радионуклидов в трофические цепи и в организм людей, экологические заболевания. Влияние углеводородов и компонентов ракетного топлива.  |

ПДК вводились как нормирующие показатели во многих странах. Единые ПДК для почв, природных вод ... были введены и в СССР, а затем и в России. Кроме ПДК были введены и действуют другие нормативы, например ПДВ (предельно допустимый выброс загрязняющих веществ). Превышение ПДВ предприятиями конкретного региона теоретически должно было приводить к последующему превышению ПДК химического элемента в почве, водах, растительности... Были предложены и другие нормативы (предельно допустимые остаточные уровни – ПДОУ).

Нельзя не отметить положительные результаты использования на практике вышеназванных экологических нормативов. С их помощью выявлена острота экологической ситуации в ряде регионов России.

В Законе «**Об охране окружающей среды**», точнее ландшафтов, даны определения и понятия зон экологического неблагополучия. По предварительным подсчётам на территории России выявлено 2,5 млн. км<sup>2</sup> (15% всей площади страны) с острыми и очень острыми экологическими

ситуациями. Насчитывается более десятка таких регионов, включая ландшафты, прилегающие к зонам экологических катастроф в Чернобыле, Северном Прикаспии, а также прибрежные зоны Черного и Азовского морей (табл. 20), Протасов В.Ф. (1999).

Среди других регионов необходимо выделить Среднее Поволжье и Прикамье, где интенсивно проявляются обезлесение, деградация почвенного покрова и оврагообразование. Весьма неблагоприятная экологическая ситуация отмечена в ландшафтах Промышленной зоны Урала, в нефтегазопромысловых районах Западной Сибири, в Кузнецком бассейне и Норильском промышленном регионе.

Экологические и социальные признаки, характеризующие неблагоприятное экологическое состояние регионов, приведены в таблице 20. Специалистами в области почвоведения, геохимии ландшафтов и географами проводится определенная работа по диагностике зон с явно неудовлетворительной экологической ситуацией (Алексеев В.А., 1997...; Водяницкий Ю.Н. и Добровольский Г.В., 1998; Глазовская М.А., 1997; Касимов Н.С., Перельман А.И., 1993; Никонов В.В., Лукина Н.В., 1996; Саев Ю.Е., Ревич Б.А., 1988; Зырин Н.Г., 1985; Черников В.А. с соавт., 2001 и другие).

Однако в имеющихся картографических материалах нередко не учитываются ландшафтно-геохимические особенности регионов, а интерпретация опытных данных ограничивается констатацией уровней ПДК. Между тем параметр ПДК имеет ряд методических недостатков. Рассмотрим особенности ПДК на конкретных примерах. Известно, что для людей наиболее тяжелые, а главное – весьма быстрые последствия загрязнения связаны обычно с аномальными концентрациями экотоксикантов в питьевой воде и воздухе. Однако подобные концентрации в этих компонентах ландшафтов сохраняются недолго. Гораздо дольше большинство загрязнителей сохраняется в почвенном покрове за счет сорбции минералами, гумусовыми веществами и коллоидами. При этом в последующем (при исчерпании ёмкости поглощения) сами почвы могут стать источником экотоксикантов в ландшафтах. В этой связи особое внимание необходимо уделять оценке загрязнения почв.

С точки зрения экологии и почвоведения величины ПДК могут использоваться на практике только как предварительные параметры – ориентиры. На наш взгляд, единые ПДК для многообразных ландшафтов и различных типов почв отражают санитарно-гигиенический подход и не учитывают ведущую роль почвенно-геохимических факторов в ландшафтах. ПДК можно использовать, например в странах с одним типом почв и одним видом ландшафта. Но разве на Земле можно найти подобный регион?

Величины ПДК при оценке характера и степени загрязнения ландшафтов не

**Табл. 21.** Экологические и социальные признаки регионов с крайней степенью экологического неблагополучия (уточнения – **И.Я.**)

| Положения                                       | Степень неблагополучия  |  |
|---|---|--|
|   | Экологическое бедствие  | Экологический кризис   |
| 1. Состояние и устойчивость ландшафтов, почв... | Глубокие необратимые разрушения почв, растительности. Вода непригодна для питья.  | Устойчивые негативные изменения, ухудшающие продуктивность почв и их качество: резкое ухудшение качества воды.   |
| 2. Здоровье населения                           | Существенное ухудшение здоровья людей (особенно детей)  | Угроза здоровью людей.   |
| 3. Дegrадируемые экосистемы                     | Разрушение компонентов экосистем, разрушение экологических цепей и трофических цепочек: необратимая деградация всех экосистем; нарушение процессов фотосинтеза и гумусообразования; потеря естественных <u>барьеров</u> (почв) на пути миграции экотоксикантов. | Уменьшение видового разнообразия, сукцессии микроорганизмов (появление и активизация патогенных видов, в том числе и спор тех микроорганизмов, которые столетия назад попали в почвы...), исчезновение видов и животных из-за низкого уровня адаптации, нарушение геофонда из-за приёма пищи, содержащей экотоксиканты и модифицированные добавки. |

целесообразно использовать по целому ряду объективных причин.

**Первая.** ПДК не учитывает широкий спектр генетических типов почв России, их неоднозначное использование и различное залегание в геохимических (каскадных) ландшафтах. Допустим, оксиды Pb и Cd в составе техногенной пыли попали в почвы двух ландшафтов: таёжного (нативного) и степного (чернозём типичный, пашня). В фации ельника-черничника зеленомошного, развитого на сильноподзолистой среднесуглинистой почве и приуроченного к выровненному водоразделу, компоненты техногенной пыли будут испытывать активное влияние со стороны органических лигандов с кислотными и комплексообразующими свойствами, вызывая их стремительную трансформацию. Ионы  $Pb^{2+}$  и  $Cd^{2+}$ , мобилизованные в раствор, могут достаточно быстро включиться в биогеохимический цикл. В степном ландшафте миграция техногенной пыли, например, на склонах увалов чаще всего сопровождается не радикальным химическим её превращением, а механическим переносом при водной и ветровой эрозии. Поэтому ПДК для указанных почв должны быть разные и учитывать информацию изложенную в предыдущих главах настоящей монографии по трансформации веществ.

**Вторая.** ПДК были предложены в последние десятилетия XX-го века. Но этот параметр не учитывает пролонгированного действия многих экотоксикантов. Например, действие силикоза проявляется через десятки лет. К тому же многих загрязнителей ещё совсем недавно вообще не существовало, а на некоторые не обращалось внимания. Далее.

Определённые вещества могут вызвать генетические изменения, но они практически не опасны для живущих взрослых людей. Последствия загрязнения подобными поллютантами выявятся только в последующих поколениях. Поэтому ПДК на эти соединения не устанавливались, хотя их, безусловно, следует относить к наиболее опасным экотоксикантам.

**Третья.** Как правило, ПДК установлены в отношении немногих экотоксикантов. Причем учитывается негативное и быстрое влияние на людей одного вещества или химического элемента (Be, Sr, Cd, As, Pb...). В природной среде (почвах, поверхностных водах...) элементы токсиканты находятся совместно и во взаимодействии и их влияние будет совсем иное – ассоциативное и более сильное. Весь вопрос в методологии постановки таких модельных опытов, которые должны учитывать реальные (а не лабораторные) условия ландшафтов. Пока таких опытов не проводилось.

**Четвертая.** Ряд химических элементов (Ca-Sr, Ca-Ba, S-Se ...) может дублироваться (замещаться их химическими аналогами) в почвах, кормах, биоте... При этом у животных и человека возникают тяжёлые болезни. Например, уровская болезнь у людей возникает вследствие замещения Ca в костях на Sr (или Ba), что приводит к искривлению позвоночника, поражению суставов, ломкости костей, болезням зубов. Поэтому для геохимических двойников» Ca-Sr необходимо знать относительное содержание каждого из них, поскольку в одной ситуации концентрация Sr будет безопасной, а в другой – токсичной. Это положение следовало бы учесть при разработке ПДК.

**Пятая.** При обосновании величин ПДК не учтена токсичность химических элементов, которая зависит не только от концентрации (точнее, молярной массы), но и от формы химического элемента: коллоидная, тонкодисперсная, мономолекулярная, конституционная (например, в куске горной породы), металлоорганическая... Учесть все формы веществ в ПДК невозможно, поэтому нельзя разрабатывать пределы ПДК для больших территорий: ландшафтов. Рационально для элементарных фаций и урочищ.

**Шестая.** Различные почвообразующие породы (карбонатные, песчаные, морены...) содержат неодинаковое количество химических элементов. Так, в частности, в карбонатных породах (лёссы) хрома содержится в 100, а кобальта в 1000 раз меньше, чем в ультраосновных. В почвах (согласно рекомендациям СанПин) ПДК для Co – 0,005%, а для Cr – 0,01%. Соответственно их Кларки в ультраосновных породах равны 0,015% и 0,16%. Таким образом, сама природа как бы перечёркивает ПДК для почв с ультраосновными породами, поскольку гор. С здесь должен рассматриваться как очаг сильного загрязнения. А в карбонатных породах Кларк Co –  $1 \cdot 10^{-5} \%$ , а Cr –  $1,1 \cdot 10^{-3} \%$ , то есть содержание кобальта в 500, а хрома в 10 раз меньше предельно допустимого. Очевидно, вряд ли будут хорошо функционировать живые организмы если в гор. А содержание Co будет в 500 раз выше, чем в почвообразующей породе. Но ведь параметр ПДК предопределяет как раз такую ситуацию.

Табл. 22. ПДК токсичных элементов в пищевых продуктах, мг/кг  
(по Протасову В.Ф., 2000)

| Продукты  | Pb        | Cd        | As      | Hg        | Cu  | Zn   |
|---|-----------|-----------|---------|-----------|-----|------|
| – Зерно-бобовые                                   | 0,5       | 0,1       | 0,2-0,3 | 0,02-0,03 | 10  | 50   |
| – Молоко и жидкие молочные продукты               | 0,1       | 0,03      | 0,05    | 0,005     | 1   | 5    |
| – Масло растительное                              | 0,1       | 0,05      | 0,1     | 0,05      | 1   | 5-10 |
| – Овощи, ягоды и фрукты (свежие и свежемороженые) | 0,04-0,05 | 0,03      | 0,2     | 0,02      | 5   | 10   |
| – Мясо и птица свежие                             | 0,5       | 0,05      | 0,1     | 0,03      | 5   | 20   |
| – Мясо и птица консервированные в жестяной таре   | 1         | 0,1       | 0,1     | 0,03      | 5   | 70   |
| – Рыба свежая и мороженая                         | 1         | 0,2       | 1-5     | 0,3-0,6   | 10  | 40   |
| – Напитки   | 0,1-0,3   | 0,01-0,03 | 0,1-0,2 | 0,005     | 1-5 | 5-10 |

**Седьмая.** В ландшафтах все живые организмы взаимосвязаны потоками веществ и энергии. И если отмечена гибель рыбы, птиц, пчёл – значит опасность для человека уже «рядом». По этому поводу один из ведущих геохимиков России констатирует: «Загрязняя биосферу или её отдельные части и районы веществами, вызывающими смерть, болезни и мутации определённых организмов, но безвредными на каком-то первом промежутке времени для человека, мы создаём для людей бомбу замедленного действия. Раньше или позже эта бомба взорвётся» (Алексеенко В.А., 2000, с. 526).

Отсюда следует: выделение и диагностика ПДК только для человека (стоящего на вершине пищевой цепи) по крайней мере некорректно. Будет упущено время, в течение которого может быть поражена почти вся биота. ПДК следует разрабатывать не только для людей, а прежде всего для тех групп живых организмов, которые находятся в самом начале тропических цепей биогеоценозов (в основании пищевой и энергетической пирамиды). В этом и заключается принципиальная методологическая ошибка специалистов, разрабатывавших санитарно-гигиенический критерий ПДК для почв и экосистем. Выступая за резкое ограничение использования современных норм ПДК в практической деятельности, не следует забывать, что ПДК создавались вначале для оценки степени загрязнения продуктов питания и кормов (табл. 40). В этом направлении использование ПДК безусловно сыграло весьма положительную роль. Что предлагается специалистами вместо неудачно разработанных ПДК? Прежде всего, для техногенных зон следует подобрать местные (фоновые) содержания химических элементов в аналогичных почвах и ландшафтах, но не подвергавшихся антропогенным нагрузкам. С географической точки зрения фоновые территории должны быть достаточно крупные, чтобы учесть различные экологические факторы среды. Определение местных фоновых

значений экотоксикантов требует проведения специальных эколого геохимических изысканий. Пока чаще всего вместо фоновых значений используются Кларки химических элементов в земной коре.

**Табл. 23.** Техногенное накопление металлов в почвах г. Новороссийска (Алексеевко В.А., 2000)

| Металл | Фоновое содержание элементов в почвах ландшафтов, аналогичных существовавшим на месте города | Среднее содержание элементов в почвах городских ландшафтов, $n \cdot 10^{-3}\%$ | Количество металла, накопившегося в городских ландшафтах, тонн | ПОН – показатель относительного техногенного накопления |
|--------|--|---|--|---|
| Sr     | 30,0   | 48,0  | 2,200  | 73,3  |
| Zn     | 6,2  | 16,0  | 1190   | 191,9   |
| Pb     | 2,0  | 10,4  | 1000   | 500   |
| Cu     | 3,5  | 5,7   | 262  | 74,8  |
| Sn     | 0,31   | 0,65  | 43   | 138,7   |
| Mo     | 0,13   | 0,19  | 7  | 53,8  |
| Ag     | 0,012  | 0,02  | 1  | 83,3  |

Для конкретных элементов токсикантов (В.А. Алексеевко, 2000) предлагает параметр их абсолютного накопления (ПАН), показывающий, какая масса того или иного химического элемента (его соединений) накопилась в результате конкретных природных и техногенных процессов на единице площади в концентрациях, превышающих региональное фоновое содержание. Размерность ПАН –  $t/км^2$ . Чтобы узнать показатель относительного накопления (ПОН) химического элемента, следует вычислить данный параметр, как отношение величин ПАН и Кларка (если неизвестно фоновое содержание). Используя фактические данные (отобрано ~ 3000 проб), Алексеевко В.А. (2000) на примере почв г. Новороссийска, у которых удельный вес в среднем составляет  $1,7 г/см^3$ , а мощность 20 см, получил за 150 лет (со дня основания города) по абсолютному накоплению следующий ряд: **Sr, Zn, Pb, Cu, Sn, Mo, Ag** (табл. 23).

Однако с учётом фона природных ландшафтов и величины ПОН указанный ряд будет иным: **Pb, Zn, Sn, Ag, Cu, Sr и Mo**. Анализ экологических заболеваний показал, что у людей пока признаков уровской болезни нет, но есть болезни, провоцируемые повышенным содержанием **Pb и Zn**.

Дополнительным критерием к указанным выше показателям **ПАН и ПОН** может быть коэффициент мобилизации ( $k_{mob}$ ) конкретного химического элемента, поступающего в раствор из того или иного труднорастворимого соединения за единицу времени в реальном ландшафте. Данный параметр можно определить с помощью модифицированного варианта метода сорбционных лизиметров (Яшин И.М., 1993). Например, фактическое значение коэффициента мобилизации  $k_{mob}$  в отношении катионов кальция из образца  $CaCO_3$  (в сорбционном лизиметре, установленном в подзолистом



горизонте дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы Подмосковья) составило **0,0058**. Умножив его на 100, получим: **0,58%** или 580 мг/100 г мелиоранта (табл. 24). Следовательно, зная вносимую дозу CaCO<sub>3</sub> при регулировании почвенной кислотности, можно достаточно обоснованно уточнить константы обмена ионов водорода и алюминия почвы **катионами кальция** извести (*известно, что тонкодисперсные частицы извести сами не участвуют в ионообменных реакциях и только после взаимодействия с химически активными фульвокислотами они трансформируются – в раствор мобилизуются катионы Ca<sup>2+</sup>*).

Темп мобилизации в раствор ионов Ca<sup>2+</sup> из мелиорантов под воздействием ВОВ в колонках происходит в соответствии с произведением растворимости мелиорантов: фосфогипс > доломит > фосфорит. Находящиеся в мелиорантах Cd, Zn, Sr, Fe... также мобилизуются ВОВ в жидкую фазу и включаются в миграционные потоки (Яшин И.М., 1993). Масштаб миграции ионов Ca<sup>2+</sup>, рассчитанный на основе полученных данных, например, при трансформации доломита, составил 6164 мг/м<sup>2</sup>; пределы варьирования по повторностям – 5270-7140 мг/м<sup>2</sup> или 52,9-124,4 кг/га. При этом преобладающая часть ионов кальция обнаруживается не в сорбентах – активированном угле и катионите КУ-2 (H<sup>+</sup>), а в приёмниках лизиметрических вод сорбционных лизиметров.

Наибольшей химической активностью отличаются **компоненты ВОВ элювиального горизонта**: это, в частности, низкомолекулярные фракции фульвокислот. Однако данной информации недостаточно для объяснения химизма трансформации, например, известковых мелиорантов. Мы попытались осветить этот вопрос с позиции электролитической диссоциации частиц слабых электролитов (молекул ВОВ), в частности фульвокислот, исходя из известного закона разбавления **В. Оствальда** (1888):  $\alpha^* = \sqrt{K_d / C_{фк}}$

**Табл. 24.** Форма и масштаб мобилизации ионов Ca<sup>2+</sup> из порошка доломита (в сорбционных колонках) по профилю дерново-подзолистой почвы в течение года (стационар «Михайловское»; вырубка, разр. 6; наблюдения 1 год).

| Генетич. гор-т и глубина установки сорбц. лизиметров, см | Объём H <sub>2</sub> O в лизиметрах, л | Концентрация Ca <sup>2+</sup> , мг/л |                     | Диагностированная масса Ca <sup>2+</sup> , мг |                   | K <sub>моб</sub> * Ca <sup>2+</sup> из мелиоранта | Расчётный масштаб миграции Ca <sup>2+</sup> , мг/м <sup>2</sup> |
|--|--|--------------------------------------|---------------------|---|-------------------|---|---|
|  |  | В приёмниках лизим. вод              | Из КУ-2 в 0,1 н HCl | В приёмниках вод                              | В элюатах из КУ-2 |   |   |
| A <sub>0</sub> A <sub>1</sub> – 3                        | 1,7 ± 0,2                              | 10,8 ± 2,7                           | 4,4 ± 0,9           | 18,4  | 1,8               | 0,0013  | 2750  |
| A <sub>1</sub> – 18                                      | 1,4 ± 0,1                              | 37,4 ± 3,5                           | 22,0 ± 1,7          | 52,4  | 8,8               | 0,0037  | 7833  |
| A <sub>2</sub> (EL) – 25                                 | 1,8 ± 0,4                              | 46,2 ± 4,3                           | 43,1 ± 4,7          | 83,2  | 17,2              | 0,0058  | 12437   |
| A <sub>2</sub> B(EL/B) – 33                              | 1,4 ± 0,2                              | 24,8 ± 1,9                           | 20,4 ± 1,6          | 34,7  | 8,2               | 0,0025  | 5187  |

\* При небольших значениях  $\alpha$  можно считать, что  $1 - \alpha = 1$ ;  $\alpha = 1$  у полностью (на 100%) диссоциирующих молекул, например сильных минеральных кислот.

\* K<sub>моб</sub> – коэффициент мобилизации характеризует соотношение массы ионов Ca<sup>2+</sup> (г), мобилизованных из опытного образца Ca(Mg)CO<sub>3</sub> в раствор, к его исходной массе (г) в твёрдой фазе. K<sub>моб</sub> можно выразить через массовые доли %, умножив его на 100.

где  $\alpha$  – степень электролитической диссоциации молекул ФК в почвенном растворе;  $K_d$  – константа диссоциации ФК, найденная экспериментально (Яшин И.М., 1983):  $pK_1 = 3,25$ , а  $K_d = 5,62 \cdot 10^{-4}$  моль/л при концентрации  $C_{орг}$  ФК **180 мг/л** и молярной массе  $MM = 4300$  г·моль.

Молярную концентрацию ФК в водном растворе устанавливали через молярность. Вначале рассчитали число молей  $n$  фульвокислот –  $n = m/MM = 0,180$  г\*\*/4300 г·моль =  $4,19 \cdot 10^{-5}$  моль. Затем уточнили молярную концентрацию  $C_{фк} = n/V$ , где  $V$  – объём раствора ФК в опыте – 0,01 л), т. е.  $C_{фк} = 4,19 \cdot 10^{-5}$  моль/0,01 л =  $4,19 \cdot 10^{-5}$  моль/л. Степень электролитической диссоциации ( $\alpha$ ) ФК, *выделенных из горизонта лесной подстилки подзолистой почвы*, определяли по известному выражению:  $\alpha_1 = \sqrt{K_d / C_{фк}} = \sqrt{5,62 \cdot 10^{-4} / 4,19 \cdot 10^{-5}} = \mathbf{0,366}$ . Следовательно, только **36,6%** функциональных групп и молекул ФК в указанном горизонте диссоциировали на ионы.

Для горизонта  $A_2$  (EL) подзолистой почвы при концентрации  $C_{фк}$  **25 мг/л** по  $C_{орг}$  и молярной массе ФК **2020** г·моль величина степени электролитической диссоциации  $\alpha_2$  составит  $\sqrt{5,62 \cdot 10^{-4} / 1,24 \cdot 10^{-3}} = \mathbf{0,673}$ , то есть **67,3%** функциональных групп ФК диссоциирует на ионы, чем и определяется более высокая химическая активность ФК в гор.  $A_2$ (EL). При дальнейшем уменьшении концентрации ФК (и величин  $MM$ ) в почвенных растворах (до **10 мг/л**  $C_{орг}$ ) значение  $\alpha$  увеличивается ещё больше.

Таким образом, в лесных биогеоценозах (в том числе и на вырубках с обильной порослью) наблюдается устойчивая циркуляция в профиле почв подзолистого типа *ВОВ с ярко выраженными кислотными и комплексообразующими функциями*. При определённых термодинамических условиях почвы и *достижении известных масс ВОВ* при нисходящем вертикальном массопереносе происходит формирование новых молекулярных структур в составе ВОВ - фульвокислот. Очевидно, в основе данного механизма лежат *сорбционно-десорбционные, гетерогенные каталитические* (на поверхности раздела фаз коллоидов и почвенных минералов) реакции и комплексообразование (Яшин И.М., 1993).

**В пахотных почвах** по сравнению с лесными аналогами наблюдается не только меньшее число источников ВОВ, но и сами эти источники (пожнивные остатки, органические удобрения, сидераты...) – за исключением педогенного гумуса – эпизодичны и имеют малые массы. *Поэтому они не могут обеспечить естественного разнообразия органических лигандов и металлорганических комплексов*, которые имеются в нативных почвах и ландшафтах. Это сказывается на масштабах, формах и барьерах миграции веществ, а также на информационной ёмкости агроландшафтов и аллелопатических функциях компонентов ВОВ.

---

\*\* 0,180 г – это масса воздушно-сухого препарата ФК, использованная в опыте.

**Табл. 25.** Трансформация порошков доломита и цеолита в сорбционных лизиметрах, установленных в гор. А<sub>пах</sub> дерново-подзолистой окультуренной почвы (Полевая опытная станция РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; экспозиция: 11 июня – 8 сентября).

| Варианты опыта   | Объём лиз. вод, мл | Из сорбентов в 0,1 н. HNO <sub>3</sub> элюатах, мг/л |                   |                     | В приёмниках вод сорбционных лизиметров, мг/л |                  |                  | Расчётный масштаб миграции, мг/м <sup>2</sup> ± σ <sup>2</sup> ** |                  |
|--|--------------------|--|-------------------|---------------------|---|------------------|------------------|---|------------------|
|  |                    | Ca <sup>2+</sup>                                     | Zn <sup>2+</sup>  | Cd <sup>2+</sup>    | Ca <sup>2+</sup>                              | Zn <sup>2+</sup> | Cd <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup>  | Zn <sup>2+</sup> |
| 1. Контроль* (колонки с сорбентами: КУ-2 и уголь)                                    | 125                | $\frac{2,1}{0,4}$                                    | $\frac{0,4}{0,6}$ | $\frac{0,02}{0,03}$ | 1,2   | 0,33             | 0,02             | 41,9 ± 5,4  | 13,5 ± 3,7       |
| 2. Колонки с сорбентами (КУ-2 и уголь + 10 мг CdCl <sub>2</sub> )                    | 140                | $\frac{1,7}{0,2}$                                    | $\frac{0,9}{0,4}$ | $\frac{175,0}{9,7}$ | 2,4   | 0,44             | 5,43             | 65,8 ± 8,9  | 19,4 ± 4,2       |
| 3. Трансформация частиц Са(Мg)СО <sub>3</sub> + 10 мг CdCl <sub>2</sub> (и сорбенты) | 75                 | $\frac{9,2}{2,0}$                                    | $\frac{2,9}{2,4}$ | $\frac{51,0}{4,0}$  | 0,1   | 1,30             | 0,08             | 83,7 ± 11,7   | 54,1 ± 7,3       |
| 4. Трансформация частиц цеолита + 10 мг CdCl <sub>2</sub> (и сорбенты)               | 50                 | 7,3  | 0,4               | 107,3               | 0,7   | 0,30             | 0,04             | 80,7 ± 10,5   | 7,5 ± 2,2        |

Лизиметрические исследования по трансформации порошков доломита и цеолита\* (Na, Ca форма) в гор. А<sub>пах</sub> окультуренной дерново-подзолистой почвы Полевой опытной станции МСХА показали весьма низкую интенсивность процесса мобилизации ионов Ca<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> и Cd<sup>2+</sup> из мелиорантов в летний сезон. В контроле (колонки только с сорбентами) масштаб миграции (мг/м<sup>2</sup>) из почвы составил: для Ca<sup>2+</sup> – 41,9; Zn<sup>2+</sup> – 13,5; по Cd вынос не рассчитывали из-за очень низких концентраций этого элемента (табл. 25). Основная мигрируемая масса Ca<sup>2+</sup> диагностирована в приёмниках лизиметрических вод – 53,6%; с катионита КУ-2 вытеснено 39,3%, а с угля – 7,1% от общей его массы. Следовательно, кальций преимущественно мигрирует в форме отрицательно заряженных комплексов и почти 40% его массы переносится в форме катионов (простых и сложных), сорбируясь катионитом КУ-2 в Н<sup>+</sup>- форме.

Во втором варианте опыта (табл. 25), отличающегося от первого только добавлением в сорбционные колонки (в лаборатории) водного раствора CdCl<sub>2</sub>, масштаб миграции в почве для ионов Ca<sup>2+</sup> и Zn<sup>2+</sup> соответственно составил (мг/м<sup>2</sup>): 65,8 и 19,4. При этом преобладающее количество ионов

**Примечание:** числитель – десорбировано в статике из катионита КУ-2 (Н<sup>+</sup> форма); знаменатель – десорбировано в статике из активированного угля. Поглощение ионов Cd<sup>2+</sup> тонкодисперсными порошками доломита и цеолита рассчитывали по разности между внесённым (10 мг – общим) количеством и содержанием в сорбентах, плюс в приёмниках вод.

\* В контрольном варианте масштаб миграции C<sub>орг</sub> ВОВ в слое 0-15 см под культурой козлятника за период вегетации составил 6,7 ± 0,8 (2,1-9,5) г/м<sup>2</sup>. При этом катионит КУ-2 сорбировал 17,4% C<sub>орг</sub> ВОВ, а активированный уголь – 79,5%. В приёмники вод поступило 3,1% органического углерода от общей миграционной массы ВОВ.

\*\* σ<sup>2</sup> – дисперсия (квадрат среднеквадратичного отклонения) по 2-3 повторностям колонок и 4-6 слоям сорбентов. Данный параметр отражает пространственное варьирование масштаба миграции.

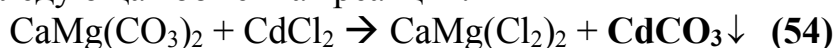
\* В вариантах 3 и 4 расчётный масштаб миграции Ca и Zn следует уменьшить соответственно на величины 65,8 и 19,4 мг/м<sup>2</sup>, отражающие значения контроля (вынос из гор. А<sub>пах</sub>, глубина 13-15 см).

$\text{Ca}^{2+}$  было также обнаружено в приёмниках лизиметрических вод – 77,3%, поглотилось катионитом КУ-2 – 20,5% и активированным углем – 2,3.

Для цинка выявлены следующие формы миграции в пахотном горизонте дерново-подзолистой почвы (вариант – контроль – % от общей массы): электронейтральные и отрицательно заряженные комплексы (не сорбирующиеся катионитом и углем) – 44,4; положительно заряженные комплексы (по сорбции на катионите КУ-2) – 22,2; прочие (в том числе и устойчивые цинк-органические соединения по сорбции на угле) – 33,4% от общей мобильной массы данных ионов.

Внесённый в сорбционную колонку кадмий (в лаборатории в виде водного раствора  $\text{CdCl}_2$ ) количественно поглотился сорбентами: катионит КУ-2 сорбировал 87,5%, а уголь – 4,9% Cd. В приёмники вод поступило 7,6% от исходной массы ионов  $\text{Cd}^{2+}$ . Таким образом, основная масса ионов  $\text{Cd}^{2+}$  в колонке (без мелиорантов и при небольшой массе ВОВ) мигрировала с потоком влаги в форме простых катионов.

В третьем варианте, где изучалась трансформация порошка доломита –  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  – с внесением 10 мг хлорида кадмия в виде водного раствора, происходила следующая обменная реакция:



Поскольку в данной реакции первый реагент заметно преобладал над вторым, имело место количественное осаждение ионов  $\text{Cd}^{2+}$  на карбонатном барьере. Действительно, в азотнокислых элюатах из сорбентов диагностировано 27,5% внесённой массы (в т. ч. из КУ-2 – 25,5%). В слое мелиоранта  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  было задержано 72,4%, а 0,1%  $\text{Cd}^{2+}$  проникла в приёмник вод.

Расчётный масштаб миграции кальция, с учётом трансформации доломита, за летний период составил 83,7 мг/м<sup>2</sup>. Для ионов  $\text{Zn}^{2+}$  он равен 51,4 мг/м<sup>2</sup> (данные рассчитаны без вычета массы ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$  в контроле).

При трансформации образцов тонкодисперсного цеолита\* (Na, Ca типа) в сорбционных лизиметрах обнаружены наименьшие объёмы лизиметрических вод – в среднем 50 мл, очевидно, из-за сильного уплотнения мелиоранта и слабой инфильтрации растворов в колонках.

В отличие от опытов с порошком доломита, где ионы кадмия задерживались по типу осадочной сорбции (с формированием труднорастворимого карбоната кадмия) на цеолите поглощение ионов  $\text{Cd}^{2+}$  из водного раствора хлорида кадмия иное – здесь преобладают эквивалентные ионообменные реакции.

Порошок цеолита, расположенный в верхней части сорбционных колонок, поглотил 45,7% ионов  $\text{Cd}^{2+}$  от внесённой массы. Большая часть внесённого в колонки  $\text{CdCl}_2$  (54,3%) прошла через 2 мм слой цеолита и была сорбирована нижерасположенным слоем катионита КУ-2 (53,7%). Уголь поглотил 0,06% массы  $\text{Cd}^{2+}$ . Ионообменная сорбция кадмия цеолитом сопровождается некоторой мобилизацией в раствор из твёрдой фазы цеолита

\* Частицы < 0,1 мм.

$\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$ . Расчётный масштаб миграции  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$  (при трансформации цеолита) за летний период составил соответственно ( $\text{мг}/\text{м}^2$ ): 80,7 и 7,5. Основными движущими силами трансформации химических соединений почв, продуктов техногенеза (в том числе мелиорантов) и т. д. являются низкомолекулярные органические лиганды с кислотными свойствами (в частности, *компоненты корневых выделений*, продукты жизнедеятельности микроорганизмов и превращений опада растений, гумусовых веществ и различные минеральные кислоты, появляющиеся в почве, например, вследствие аэрального выпадения промышленных и иных **«кислотных осадков»** –  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HNO}_2$  и др.). Последние, в частности, водные растворы  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , оказывают весьма своеобразное и масштабное (пока вокруг крупных городов и промышленных предприятий) воздействие на химические соединения почв\*. Некоторые результаты модельных опытов будут кратко изложены в дальнейшем.

Пока соотношение  $k_{\text{mob}}$  в отношении ионов кальция не рассматривается специалистами и не используется. Его редко определяют и в полевых опытах. Известь же вносят в почвы с кислой реакцией согласно величине гидролитической кислотности (хотя это только часть общей кислотности, причем подобного химического реагента как  $\text{CH}_3\text{COONa}$  нет в агроэкосистемах таежной зоны), что не соответствует экологическому подходу. *Биогеохимические аспекты кислотности, как и процессы почвообразования – глее- и подзолообразования, лессиважа и выщелачивания остаются пока без внимания.* Мы уже отмечали, что химический подход при оценке кислотности является частным, и относится к почве - подсистеме. Он обусловлен излишним «увлечением» почвами агроландшафтов, в которых роль таежной биоты «не просматривается», на что в свое время указывал еще В.Р. Вильямс. Поэтому он и рекомендовал травосеяние в севообороте в течение 3-4 лет. Химический подход при оценке кислотности почв пашни в таежной зоне априори издавна считается *единственно обоснованным и безальтернативным*. Возможно, он был заимствован отечественными специалистами из работ выдающегося немецкого агрохимика Ю. Либиха (имевшего всемирный авторитет). В то время немецкая школа почвоведов добилась заметных результатов в области аграрного почвоведения. В России это направление развивал и упорно отстаивал П.А. Костычев – один из непримиримых оппонентов основоположника научного (фундаментального) почвоведения В.В. Докучаева. На наш взгляд, необходимо исследовать кислотность на основе функционирования агроэкосистем (во взаимосвязи с элементарными геохимическими ландшафтами, *включая и целинные аналоги*), развивать экологическое мировоззрение, в частности, у агрономов при изучении ими не только ландшафтного земледелия, но и **экологического почвоведения**. Последнее научное направление должно быть

---

\* Наблюдается не только выщелачивание щелочноземельных оснований, но и мобилизация в раствор и последующая миграция некоторой массы фульвокислот.

сбалансированным, в равной мере охватывать генезис и функции почв лесных, пойменных, сенокосных, залежных, лугово-болотных, а также



Рис. 46. **Фоновая** северо-таежная фация сложного ельника-черничника на плакоре увала Музея деревянного зодчества «Малые Корелы» (в **25 км** на Ю-Ю-В от Архангельска); на **переднем плане сорбционные лизиметры** в профиле **глееподзолистой среднесуглинистой почвы**, развитой на бескарбонатной морене, заложенные для исследования водной миграции мобильных органических веществ с кислотными свойствами (фото И.М. Яшина, 2003).

полевых экосистем ландшафтов России. Нельзя «увлекаться» только пахотными угодьями, как это происходит в настоящее время. *Особое внимание в агрофирмах следует уделять соотношению площадей почв пашни, сенокосов, пастбищ, лесов и кустарников и болот. Причем доля пашни не должна превышать 15-25% от общей площади.* В Подмоскowie этот показатель достигает **58** и более процентов. А это способствует активному химическому загрязнению почвенного покрова, «почвоутомлению», появлению плужной « подошвы», подкислению и эрозии. С биогенной формой кислотности таежных экосистем (не только кислотности почв, как функции биоты) тесно связана эко-геохимическая диагностика функционирования элементарных геохимических ландшафтов. *Концепция биогенной кислотности* (И.М. Яшин, И.С. Кауричев, В.А. Черников, 1989, 1996) способствовала более полному пониманию процесса **таежного гумусообразования**. Например, если внимательно присмотреться к почве и таежной фации, что на **фото 46**, то можно «догадаться», что в нативных экосистемах тайги (да и в других ландшафтах) нет сильных химических реагентов, которые обычно применяют в лаборатории, в

частности, при изучении состава и свойств гумусовых веществ – NaOH, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и почвенной кислотности – растворы KCl, CH<sub>3</sub>COONa и т.д. *На наш взгляд, данное обстоятельство связано с дефицитом знаний у специалистов-химиков по экологии, физиологии растений и эко-геохимии ландшафтов.* Консерватизм в науке полезен и, в известной степени, нужен. Но отмеченные факты позволяют усомниться в правильности такого консерватизма, поскольку он приводит к неопределенности и артефактам.

**Например**, при взаимодействии водного раствора хлорида калия с образцом дерново-сильнопodzolistой почвы (при диагностике обменной кислотности) протекает химическая реакция по схеме:



Хлорид алюминия, являющийся солью сильной кислоты и слабого основания, подвергается кислотному гидролизу с водой в растворе:



с образованием хлористоводородной кислоты. Поэтому в лаборатории и диагностируется *очень сильноокислая реакция* солевых вытяжек дерново-подзолистых почв. Однако результаты лизиметрических опытов, проведенные с помощью *сорбции мигрантов на оксиде алюминия, активированном угле и ионообменных смолах* в подзолах и подзолистых почвах Карелии, Мурманской, Московской и Архангельской областях, показали, что формы миграции алюминия не только более разнообразные, но и иные, чем это видно по реакциям 54,55 (И.С. Кауричев, Е.М. Ноздрунова, 1968; Р.М. Евсеева, 1969; И.М. Яшин, 1973, 1993, 2013). В кислой среде *гидроксиды алюминия* подзолистых почв и подзолов активно трансформируются с участием алифатических органических кислот и фульвокислот, а *мобилизуемые в раствор катионы алюминия быстро вступают в реакции комплексообразования* с органическими кислотами (лимонной, фумаровой, щавелевой) и фульвокислотами, образуя устойчивые комплексные **AL-органические соединения (с разным знаком заряда)**, способные к дальней почвенно-геохимической миграции без разрушения. Эти соединения и были диагностированы вышеуказанными авторами в сорбционных лизиметрах. **Хлорид-ионов в почвах тайги почти нет (кроме приморских ландшафтов; сюда соли привносятся ветром при импульверизации)** из-за промывного водного режима: скорость их выноса (как и у нитрат-анионов) сопоставима со скоростью фильтрации воды. Из курса общей химии известно, что кроме катионов **серебра и ртути** хлорид-ионы образуют хорошо растворимые соли и не аккумулируются в почвах.

В этой связи нами разрабатывается **экологическое направление** при сопряженной диагностике в таежных экосистемах *гумусообразования и биогенной формы кислотности для уточнения движущих сил трансформации и водной миграции, в частности, ионов тяжелых металлов.*



В почвенном пространстве таёжных экосистем наблюдается заметная дифференциация масштаба миграции ВОВ и их состава в сезонных циклах водного массопереноса. При этом общий аккумулятивно-элювиальный характер перераспределения масс ВОВ и других продуктов почвообразования в профилях почв подзолистого типа наблюдается особенно чётко в условиях лесных экосистем, развитого микрорельефа и наличия латерального (бокового) потока влаги на склонах.

Главная особенность абиотических потоков ВОВ с кислотными свойствами – это осуществление *пространственной (и межгоризонтной) взаимосвязи* зон их формирования (лесные подстилки  $A^T_0$  и  $A_0A_1$ ) с зонами последующей миграции и трансформации как самих групп и молекулярных структур ВОВ, так и ионов металлов, вытесняемых из почвенных минералов. При насыщении ВОВ ионами металлов в составе ВОВ в нижних иллювиальных горизонтах подзолистых почв достоверно увеличивается доля специфических органических продуктов – **ФК**. В основе механизма внутрипрофильной вертикальной (водной) миграции ВОВ и их перегруппировки, на наш взгляд, лежат сорбционно-каталитические реакции с минералами, коллоидами и комплексообразование (А.И. Карпухин, И.М. Яшин, В.А. Черников, 1993). Установлено также, что *генетические особенности природных ФК* сопряжены с их молекулярно-массовым составом, ненасыщенностью ионами металлов и химическими свойствами (в частности, проявлением кислотных и иных функций), А.Д. Фокин и А.И. Карпухин (1977, 1979). Важную роль в этих реакциях играет *диффузия*, но ее особенности исследованы только в некоторых типах почв и в отношении радионуклидов – ионов стронция и цезия, а также кальция.

В то же время заметный интерес представляют фактические данные о соотношении в составе ВОВ двух групп органических веществ: 1-я группа – органические компоненты **индивидуальной** фотосинтетической природы – **ИОВ** (низкомолекулярные органические кислоты, полифенолы, аминоксахара; они элюируются с активированного угля сорбционных лизиметров 90% водным ацетоном) и 2-я группа – органические вещества, условно называемые **специфической природы** – это фульвокислоты – **ФК** (они элюируются с угля сорбционных лизиметров 2% водным раствором  $NH_4OH$ ). Используя метод сорбционных лизиметров сопряженно с аналитической схемой W. Forshyt, усовершенствованной И.М. Яшиным (1972, 1993), авторам удалось исследовать некоторые равновесные состояния данных групп органических соединений в лесных и пахотных почвах подзолистого типа южной, средней и северной тайги России (И.М. Яшин, В.А. Черников, И.С. Кауричев, 1996). Указанные соотношения, в известной мере, обуславливаются *процессами глее-, гумусово- и подзолообразования, лессиважем, подстилкообразованием и мобилизацией ВОВ из хвойно-мохового опада и лесных подстилок, обычно состоящих из нескольких разнокачественных органогенных слоев: очеса – торфяно-перегнойного – перегнойного (тонкого)*. Здесь формируются, при обязательном участии таежной микрофлоры, и ИОВ, и ФК. В полевых

опытах установлено, что при водной миграции ВОВ в профилях почв подзолистого типа с глубиной уменьшаются величины молекулярных масс ВОВ, а степень электролитической диссоциации, в частности молекул ФК, заметно возрастает. Для открытых термодинамических систем, какими являются почвы и ландшафты, применим принцип Ле-Шателье. Для более простых систем, например, компоненты почвенных растворов (жидкая фаза) и почвенные минералы, коллоиды Fe, Mn, Si, гумусовые вещества (твердая фаза) данный принцип также применим. В обратимой реакции  $\text{ИОВ} \leftrightarrow \text{ФК}$  с участием ионов железа  $\text{Fe}^{3+}$  возможно установление временных (по сезонам года) равновесных состояний, которые можно рассчитать на основе константы динамического равновесия  $k_p = [\text{ФК}]^2 / [\text{ИОВ}] \cdot [\text{Fe}^{3+}]$ . Концентрация ФК в почвенных растворах равна корню квадратному из произведения концентраций ИОВ и ионов  $\text{Fe}^{3+}$ . Последние находятся, в частности, в клетках растений (в хлорофилле) в форме внутрикомплексных соединений – железо-порфириновых колец и других соединений.

С помощью метода сорбционных лизиметров нами установлено, что величина  $k_p$ , например, в ельниках средней тайги (Няндомский стационар в Архангельской области) для оторфованной лесной подстилки (гор. О<sup>1</sup>) составила **1,8**. Для иллювиально-гумусово-железистого горизонта того же подзола – **64**. Это указывает, что **основная масса ФК** в подзолах средней тайги формируется в иллювиальном органоминеральном барьере миграции. По-видимому, низкий коэффициент динамического равновесия, установленный в лесных подстилках, указывает на активную минерализацию молекул новообразованных (и неустойчивых ФК), и возможное их «отвлечение» для участия в реакциях кислотного гидролиза. В иллювиальных горизонтах такого «отвлечения» масс ФК, по-видимому, не происходит: какие массы ФК здесь образовались, такие и сорбционно закрепляются на гидрогелях гидроксида железа песчаных подзолов. Ионы железа и ферменты микроорганизмов катализируют на частицах  $\text{SiO}_2$  (почвенных минералов в подзолах нет) гетерогенные реакции формирования молекулярных структур ФК в условиях достаточной аэрации.

Изучение масштаба миграции ВОВ и их компонентного состава в почвах таежной зоны показало, что если в почвенных растворах почв подзолистого типа отмечено преобладание масс ИОВ, то динамическое равновесие в обратимой реакции  $\text{ИОВ} \leftrightarrow \text{ФК}$  с участием ионов железа смещается в направлении формирования молекул ФК. Появление в почвенном растворе молекул ФК приводит к смещению равновесного состояния системы  $\text{ИОВ} \leftrightarrow \text{ФК}$  в обратном направлении – в растворах диагностируются исходные органические вещества ИОВ, доступные почвенной биоте. Следовательно, наряду с экологическими аспектами формирования состава ВОВ в почвах таежной зоны, важную и своеобразную роль в динамике их компонентов играют физико-химические реакции - сорбция, комплексообразование и катализ. Здесь необходимы дальнейшие изыскания.

Еще один важный аспект рассматриваемой экологической проблемы. Он связан с аномально высокими «выбросами» биотой низкомолекулярных

органических кислот (НМОК) в почвах подзолистого типа **на вырубках и трансформацией почвенных барьеров миграции**. Данный вопрос тесно связан с предыдущим: формированием, превращением ФК в почвах, а также химическим загрязнением экосистем и грунтовых вод тяжелыми металлами.

Накопленные фактические данные позволяют сформулировать основные положения концепции гумусообразования в таёжных экосистемах:

1. Основная масса источников гумусовых веществ – ВОВ – мобилизуется в растворимое состояние из биополимеров опада – лигнина, клетчатки, гемицеллюлозы и других высокомолекулярных веществ. Но в реакциях гумификации (формирование новых устойчивых гумусовых веществ) участвует незначительная масса компонентов ВОВ (7-12%);
2. Растительный опад таёжной растительности и органогенные субстраты лесных подстилок заметно обеднены азотом и обменным кальцием, но обогащены воском, смолами, солями органических кислот и терпенами;
3. В почвах подзолистого типа наблюдается избыток ионов гидроксония;
4. Промежуточные продукты трансформации хвойно-мохового опада и лесной подстилки – ВОВ с ярко выраженными кислотными, аллелопатическими и комплексообразующими свойствами – имеют низкие величины молекулярных масс ( $MM \leq 10000$  а.е.м.), что чрезвычайно неблагоприятно для биохимических реакций конденсации молекул ВОВ в гуминовые вещества вследствие кислотного гидролиза;
5. Наблюдается активная мобилизация и масштабный вынос ВОВ как с вертикальным, так и с латеральным потоками гравитационной влаги, особенно весной, осенью, а нередко и в дождливый летний период;
6. Компонентный состав ВОВ весьма разнообразен, а многие из органических веществ в составе ВОВ являются полидентатными лигандами, что способствует реакциям комплексообразования и формированию упрощенных молекулярных структур ФК с низкими величинами ММ и ярко выраженными кислотными свойствами;
7. Своеобразие макропроцесса гумусообразования в почвах подзолистого типа таёжных экосистем, в известной мере, состоит в сопряжённых и динамических процессах мобилизации, трансформации и миграции ВОВ; при оглеении почв биодegradация ВОВ заметно уменьшается;
8. Минеральный профиль подзолистой почвы получает из опада и лесных подстилок почти «готовые» (уже сформированные молекулярные структуры ВОВ), часть которых поглощается (хотя и непрочно) коллоидами и почвенными минералами генетических горизонтов, а часть выщелачивается, поступая в грунтовые, а затем и речные водные бассейны; вынос ВОВ не превышает 12% от исходной массы ВОВ;
9. Корневые выделения высшей хвойной растительности и наземного мохово-кустарничкового покрова также вносят свой вклад в баланс ВОВ, выполняя биохимические и аллелопатические функции и оказывая, в частности, влияние на сукцессии организмов в экосистемах;
10. Характер гумусообразования в подзолистых почвах таёжных экосистем отражает не столько функцию депонирования веществ в форме

гуминовых и иных высокомолекулярных соединений, сколько динамику взаимосвязанных циклов трансформации и миграции органических и органоминеральных соединений, очевидно, в виде своеобразного звена *биогеохимического круговорота углерода*;

11. Новообразованные массы ВОВ претерпевают интенсивную биodeградацию, что косвенно подтверждает их чрезвычайно важную роль в жизнедеятельности почвенной биоты. Фиксируемый вынос ВОВ составляет 1/5 – 1/10 часть исходно формирующихся масс, поэтому у специалистов нередко создаётся иллюзорное представление о реальных<sup>22</sup> масштабах мобилизации и миграции ВОВ в таёжных экосистемах; важную **экологическую роль** в формировании пула ВОВ играют микроскопические плесневые грибы-кислотообразователи;
12. Процессы минерализации ВОВ весьма актуальны с биохимической точки зрения: выделяющаяся энергия усиливает биологическую активность и способствует протеканию, например, химических реакций, в длительно охлаждённых почвах. Биodeградация ВОВ может реализоваться *по двум направлениям*: первый при доступе молекулярного O<sub>2</sub> путём быстрого окисления молекул ВОВ до конечных продуктов – CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и минеральных солей и второй – при дефиците O<sub>2</sub> путём медленного и неполного окисления компонентов ВОВ; при этом образуются различные промежуточные продукты кислотной природы (нередко с негативными аллелопатическими свойствами – масляная и валериановая кислоты);
13. Компоненты ВОВ выполняют связующую экологическую функцию между двумя природными макро процессами: фотосинтезом и гумусообразованием. ВОВ принимает непосредственно участие в функционировании живых организмов (например, высших растений) путём их поглотительной деятельности, приводящей к самообновлению сложных высокомолекулярных соединений растительных тканей (гемицеллюлоз, пектина, клетчатки, лигнина, белков...). Причём жизнедеятельность организмов связана не столько с накоплением веществ в клетках, сколько с их непрерывным круговоротом – переносом веществ (химических элементов) и энергии, а также их превращением в живых организмах и выделением. Отсюда следует: мерой биогеохимической активности конкретных сообществ организмов можно считать массу химических элементов, мобилизованных в почве (в раствор), а затем миграционно перемещённую в единицу времени в процессе метаболизма в единицу объема в реальных условиях геохимического ландшафта. Поэтому данные, например, зольного анализа, отражают только часть массы химических элементов, вовлеченных и аккумулированных в растениях при биогенном круговороте. *Реальные масштабы биогеохимической миграции, составными частями которой являются биогенный и абиотический потоки*, а также потеря части веществ на биогеохимических барьерах в

ландшафте, значительно больше. Подобной информации еще весьма недостаточно.

14. С эколого-химической точки зрения в ландшафтах тайги *нет необходимых условий для образования гуминовых веществ*<sup>21</sup> с высокими молекулярными массами. Гуминовые вещества весьма ценные для формирования благоприятных в агрономическом отношении физических свойств почв. В таёжных экосистемах непрерывно циркулируют разнообразные ВОВ, переходящие из одних состояний и форм миграции в другие. Поэтому, *в отличие от химических представлений, сложившихся, в частности, в кинетике гетерогенных реакций, в почвах таёжных экосистем, очевидно, не образуется конечного продукта гумификации, а резко преобладает цикличность частных взаимосвязанных процессов формирования и трансформации ВОВ.* При этом не исключено, что промежуточные *продукты минерализации ВОВ* имеют низкую каталитическую способность, недостаточную для активизации *реакций конденсации* и образования высокомолекулярных структур типа гуминовых веществ. К тому же низкую биологическую активность имеют и ферменты микроорганизмов подзолистых почв. Диагностика нативного процесса гумусообразования с эколого-динамических позиций (в отличие от статичного и лабораторного подхода) расширяет традиционные представления о генезисе и экологических функциях органических и органоминеральных соединений подзолистых почв, позволяя по-новому решать задачи, связанные, в частности, с оценкой гумусового состояния, миграцией продуктов техногенеза, кислотности почв агроэкосистем.

Изучаемый нами процесс таёжного гумусообразования на Европейском Севере России имеет *экологические особенности, которые еще неполно изучены, и не укладываются в традиционные рамки представлений, основанные на традиционном химическом познании гумусовых веществ.* Установлено, например, что вместо образования высокомолекулярных гуминоподобных веществ (ГВ) в таежных лесах - их функции выполняют биополимеры лесной подстилки и опада - в подзолистых почвах мигрируют низкомолекулярные и весьма разнообразные по составу и свойствам компоненты ВОВ. Они, очевидно, отражают один из уникальных *экологических механизмов адаптации биоты* к экстремальным условиям обитания в зоне тайги – *длительному промерзанию почв, ярко выраженному промывному водному режиму, высокой кислотности, оглеенности и ненасыщенности почв щелочноземельными основаниями, а также дефициту азота, кальция и фосфора.*

---

<sup>21</sup> Гуминовые соединения, очевидно, всё же частично образуются в подзолистых почвах в зимний период при длительной низкотемпературной дегидратации молекулярных структур ВОВ, а также вследствие старения гелеобразных (сорбированных) осадков ВОВ, т.е. **абиотическим путём**. Поэтому эти продукты легко трансформируются биотой и выщелачиваются атмосферными осадками.

На основании авторских фактических данных нами унифицированы некоторые показатели гумусового состояния почв тайги на экосистемном уровне. В качестве нового параметра предлагается использовать соотношение масс  $C_{орг}$  фульвокислот верхнего горизонта почвы и ВОВ (которые диагностируются с помощью сорбционных лизиметров в лесной фации) -  $C_{фк}/C_{вов}$ . Параметр  $C_{гк}/C_{фк}$  не актуален, поскольку в подзолистых почвах тайги гуминовых веществ фактически не образуется. Диагностируемые небольшие массы гуминовых веществ скорее связаны с артефактами, чем с их генезисом. Соотношение  $C_{фк}/C_{вов}$  имеет четкое экологическое и генетическое обоснование. ВОВ идентифицируются не в лабораторных водных вытяжках из образцов почв, а диагностируется на стационарах как параметр мобилизации ВОВ с кислотными свойствами в экосистеме, их водной миграции по генетическим горизонтам. Нами рассматриваются и другие показатели гумусового состояния почв тайги: коэффициенты мобилизации  $K_{моб}$  ВОВ и их водной миграции  $K_{миг}$ , а также оценка градиентов барьеров миграции ( $G$ ) почв катен в элементарных геохимических ландшафтах - аккумуляция и трансформация ВОВ на почвенных барьерах – сорбционном, оглеенном, органогенном.

Результаты исследований позволяют констатировать:

Химический подход, доминирующий при изучении ГВ почв, наряду с достоинствами, имеет известные недостатки, в частности, *ограничивая понимание нативных процессов гумусообразования в экосистемах*. Эти недостатки связаны, *во-первых*, с использованием весьма активных реагентов (растворов минеральных кислот и щелочей), *которых нет в таежных экосистемах*, *во-вторых*, растворы сильных кислот и щелочей вызывают полное разрушение исходной сложной системы ГС, но этот факт *обычно у почвоведов не вызывает озабоченности*; *в-третьих*, результаты опытов не поддаются однозначной (как в органической химии и биохимии) интерпретации: здесь очень сложно создать и *стандартные образцы ГВ*, поскольку они генетически связаны с ВОВ, а также с сезонной динамикой почвенных и биогеохимических процессов; *в-четвертых*, после применения для десорбции ГВ из почв растворов сильных электролитов специалисты имеют дело не с нативными, а с *трансформированными формами структур ГВ* разных периодов почвообразования; *в-пятых*, полученные результаты опытов имеют химическую направленность, их экологическая трактовка ограничена, а сам методический подход *требует сочетания с экологическими методами изучения экосистем*.

Критическая оценка традиционной парадигмы (химического познания ГВ в лабораторных условиях) необходима, *во-первых*, для выявления ее положительных и негативных аспектов, *во-вторых*, для перехода к *эколого-геохимической методологии* исследования гумусовых соединений почв с учетом эмиссии  $CO_2$  в наземных экосистемах в связи с глобальным изменением климата.

Химическая методология в изучении ГВ требует информации не только об объектах исследований, умения экологического картирования фаций для

выбора стационарных площадок, но и владения современными методами физико-химического анализа при оценке структуры и свойств ГВ.

*Становление экологической парадигмы* познания нативных форм ГВ наиболее удобно и наглядно можно проследить при изучении таежных экосистем. Здесь процесс гумусообразования взаимосвязан с *биогенным кислотообразованием* (с активным участием в лесных подстилках микроскопических плесневых грибов) и формированием разнообразных по составу, структуре и аллелопатическим свойствам ВОВ. Они отличаются химической активностью, доступностью биоте, *придают высокую кислотность почвам*, позволяя таежным фациям эффективно и устойчиво функционировать в суровых условиях климата, на бедных почвообразующих породах, при промывном водном режиме.



Рис. 47. Исследование миграции веществ (в том числе **и экотоксикантов**) в почвах с помощью метода сорбционных лизиметров в фациях Лесной опытной дачи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева проводят студенты-экологи **по сезонам года** (фото И.М. Яшина, 2009).

#### **Использованная литература:**

1. Агрэкология. Под ред. В.А. Черникова. М.: Колос. 2000. Т. 1.
2. Алексеенко В.А. Экологическая геохимия. М.: Логос. 2000. – 627 с.
3. Белоусова А.П., Гавич И.К., Лисенков А.Б., Попов Е.В. Экологическая гидрогеология. Учебник для вузов. М.: ИКЦ «Академкнига». 2006. – 397 с.
4. Биогеохимические основы экологического нормирования. В.Н. Башкин, Е.В. Евстафьева, В.В. Снакин и др. М.: Наука. 1993. - 304 с.



5. Беспмятнов Г.П., Кротов Ю.А. Предельно-допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в окружающей среде. Л.: Химия. 1985.
6. Варшал Г.М., Кашеева И.Я., Сироткина И.С. и др. Изучение органических кислот поверхностных вод и их взаимодействия с ионами металлов // Геохимия. 1979. № 4. – С. 598-607.
7. Васенев И.И., Таргульян В.О. Ветровал и таежное почвообразование (режимы, процессы, морфогенез почвенных сукцессий). М.: Наука. 1995. - 247 с.
8. Венецианов Е.В., Лепехин А.П. Физико-химические основы моделирования миграции и трансформации тяжелых металлов в природных водах. Екатеринбург. 2002. – 234 с.
9. **Водный кодекс** Российской Федерации. Федеральный закон № 167 от 16.11.1995.
10. Генезис и экология почв Центрально-лесного государственного заповедника. Сб. статей. Ред. Г.В. Добровольский. М.: Наука. 1979. – 271 с.
11. Голдовская Л.Ф. Химия окружающей среды. М.: Мир; БИНОМ; Лаборатория знаний. 2008. – 295 с.
12. **ГОСТ 17.1.1.01- 77.** Охрана природы. Гидросфера. Использование и охрана вод. Основные требования и определения.
13. Добровольский В.В. Геохимия почв и ландшафтов. Изб. Труды. М.: Научный Мир. 2009. - 752 с.
14. Зайков Г.Е., Маслов С.А., Рубайло В.Л. Кислотные дожди и окружающая среда. М.: Химия. 1991. – 134 с.
15. Карпухин А.И., Яшин И.М., Черников В.А. Формирование и миграция комплексов водорастворимых органических веществ с ионами тяжелых металлов// Известия ТСХА. 1993. Вып.2. - С. 107-126.
16. Морозова Р.М., Федорец Н.Г. Современные процессы почвообразования в хвойных лесах Карелии. Петрозаводск. 1992. – 282 с.
17. Почвы Карелии: геохимический атлас. Ред Н.Г. Федорец. Ин-т Леса РАН КНЦ. М.: Наука. 2008. – 47 с.
18. СанПин 2.1.4.1074-01. **Питьевая вода.** Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества.
19. Яшин И.М. Экологический мониторинг процессов миграции и трансформации веществ в почвах. М.: РГАУ-МСХА. 2013. – 183 с.
20. Яшин И.М., Кашанский А.Д. Ландшафтно-геохимическая диагностика и генезис почв Европейского Севера России. М.: РГАУ-МСХА. 2015. – 202 с.
21. Яшин И.М., Мухин Е.В., Карпухин А.И. Эколого-геохимическая характеристика почв лесных и лесопарковых ландшафтов низовья реки Северной Двины //Известия ТСХА. 2004. Вып. 4. – С. 19-37.
22. Яшин И.М., Кауричев И.С., Черников В.А. Экологические аспекты гумусообразования // Известия ТСХА. 1996. Вып. 1. С. 110-129.

## ТРАНСФОРМАЦИЯ БАРЬЕРОВ МИГРАЦИИ В ПОДЗОЛАХ ТАЕЖНОГО ЛЕСОПАРКА ПЕТРОЗАВОДСКА

Рассмотрим эти особенности на примере Петрозаводского стационара.

Антропогенное воздействие в лесопарках мегаполисов проявляется все более масштабно, негативно сказываясь на биоте, почвенных барьерах миграции и качестве природных вод. Почвы постепенно превращаются из хранилища важной экологической информации в «копилку» разнообразных ксенобиотиков. Изучение почвенных барьеров миграции, как звеньев биогеохимического круговорота веществ таежных экосистем, становится одним из перспективных научных направлений (РФФИ 2002-2004 гг.; грант Правительства РФ № 11.634.31.0079).

Объектами исследований были фоновые экосистемы в заповедниках «Кивач» и «Кижы» в Карелии. Антропогенно измененные таежные аналоги представлены лесопарком пригорода Петрозаводска. Стационар площадью 30х30м расположен вблизи ул. Университетская. В 70 м от него находятся крупная автомагистральная развязка и бензоколонка. Стационар приурочен к пологому Ю-В склону мореного увала, на котором локально отмечены бытовой мусор, остатки кострищ и несколько крупных муравейников. Фации ельников произрастают на подзолах контактно-осветленных песчаных на двучленах. Особенности почвенных барьеров миграции были изучены в катене: плакор (ельник мертвопокровный) – склон (вырубка и западина - черничник сфагновый) – подошва склона увала (опушка ельника-зеленомошника).

Методы исследований. В 2002-2004гг. И.М. Яшиным и аспирантом Е.В. Мухиным было проведено детальное картирование почвенного покрова стационарной площадки «Петрозаводская». Лизиметрические наблюдения осуществлялись с 2002 по 2014 гг. в них участвовали аспиранты П.В. Кузнецов, А.А. Петухова, Л.П. Когут и студенты-дипломники кафедры экологии – Елена Наумова, Иван Лямин, Герман Заблудин. На основе более чем 10-летних стационарных изысканий нами накоплены новые и актуальные экспериментальные данные. В этом разделе рассматриваются некоторые из них. Среди полевых методов был использован метод сорбционных лизиметров (сорбенты – активированный уголь, оксид алюминия и органические ионообменные смолы: катионит КУ-2 и анионит АВ-17). Сорбционные лизиметры устанавливались под генетическими горизонтами почв в 2 - 4-кратной повторности: под кроной зрелой ели, а также на вырубках – в западинах. Компонентный состав водорастворимых органических веществ (ВОВ) изучался с использованием аналитической схемы W. Forsyth в модификации Яшина И.М. (1972, 1993) – их сорбцией на низкозольном активированном угле «карболен» в колонках. Известно, сорбционные лизиметры сочетают приемы лизиметрии, сорбции и хроматографии. После извлечения колонок из почв, сорбированные

чистыми сорбентами ВОВ, последовательно вытеснялись в лаборатории из угля в динамике 90% водным ацетоном и водой, потом 1-2% водным раствором  $\text{NH}_4\text{OH}$  и водой (активация угля для новых опытов осуществлялась водным раствором 0,1 н. серной кислоты в динамике). Fe и тяжелые металлы (ТМ – Cd, Pb, Zn...) определяли в элюатах методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  смешивали с чистым песком (1: 1/5) и в виде кашицы наносили на дренаж колонок. Без песка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  слеживается и фильтрация растворов в колонке резко уменьшается: масштаб миграции снижается [2,5]. Ионообменные смолы использовали в колонках для сорбции из почвенных растворов подзолов мобильных органоинеральных веществ комплексной природы с разным знаком заряда.

Рассмотрим результаты исследований. На обсуждение выносятся концепция о трансформации подзолов на вырубках в подзоне средней тайги, в условиях западин, в генетический ряд почв: *подзол глееватый - подзол глеевый - болотно-подзолистая почва*. Положение о формировании лугов после сведения леса правомерно в основном для ландшафтов южной тайги ЕТС [4]. В подзонах средней и северной тайги почвы на двучленах после рубок превращаются в заболоченные массивы: резко уменьшается эвапотранспирация при  $\text{КУ} > 1,3$ . Наблюдается трансформация веществ генетических горизонтов, в которой активную и своеобразную роль играют компоненты ВОВ, а их масштаб резко увеличивается.

Новообразованные компоненты ВОВ интенсивно потребляются анаэробной микрофлорой. Плесневые грибы – кислотообразователи становятся доминантами и источниками, в частности, супертоксиантов – *микотоксинов*, а также антибиотиков и органических кислот. *Микроорганизмы затрудняют точную оценку масштаба миграции*, и способствуют динамике мобилизации и состава органических веществ. Биоразнообразие органических лигандов увеличивается: в составе ВОВ появляются *недоокисленные промежуточные продукты и новые педогенные молекулы веществ - фульвокислоты*. Их функции изучены пока неполно. В то же время, несмотря на глубокую очистку в препаратах ФК всегда обнаруживаются *ионы железа, кальция*, а также некоторое количество ионов тяжелых металлов (ТМ). Величины молекулярных масс ФК заметно возрастают при насыщении их ионами металлов. При этом ФК теряют мобильность и химическую активность [2]. Пока неясно, в частности, почему ВОВ *не осаждаются сразу под лесной подстилкой?* Возможно, это связано как с их ненасыщенностью ионами металлов и низкими величинами молекулярных масс, так и с избытком в растворах органических кислот и полифенолов. Причем, новые молекулы фульвокислот в составе ВОВ формируются уже в торфяно-перегнойном слое лесной подстилки, а также при водной миграции, проходя через сорбционные барьеры почв (этот факт был рассмотрен ранее). Не исключено формирование молекулярных структур ФК также *in situ* в гор. **В<sub>тн</sub>** вследствие комплексообразования и гетерогенных каталитических реакций. Следовательно, можно допустить следующие процессы

образования молекул ФК: сорбционно-каталитический, миграционный и комплексообразовательный. Установлено, что состав ВОВ определяется соотношением масс ИОВ и ФС, которое контролируется свободными ионами  $Fe^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$  - комплексообразователями [2]. В генезисе ФК определенную роль играет *их восходящая миграция из гор. В<sub>п</sub>*. В этом случае структуры ФК выступают **в качестве образца новых молекул**. ФК, возможно, образуются и как кластерные структуры сорбционного типа [3]. При этом роль матрицы выполняют кластеры конституционного типа. В подзолах – это оксиды Si, Fe, Al, а также их гидрогели гидроксидов. Подобное объяснение вполне логично, если рассматривать молекулы воды с позиции мерцающих кластеров. Особенности молекул воды проявляются и в неповторимости структур снежинок, и в ее аномальных свойствах. Так или иначе, но изучение функций ФК перспективно и важно для оценки направленности таежного гумусообразования, а также степени и характера *химического загрязнения почв и природных вод*.

Подчеркнем, в профиле трансформированного подзола стационара «Петрозаводский» (в западинках) морфологические границы между генетическими горизонтами *диффузионно-размытые* (см. фото N-а в Приложении), а верхний песчаный субпрофиль прокрашен «потечным гумусом», маскирующим нативные цвета почвенных горизонтов в сравнении с подзолами плакора. Нисходящая водная миграция продуктов почвообразования происходит в оглеенном профиле (табл. 26, разрез 5п). В профиле выявлены **«миграционные тяжи» светло голубого цвета**, косо ориентированные вглубь почвы и в виде бурой «рубашки» окруженные гидрогелями гидроксида железа. При подсыхании гор. **E<sub>Lhg</sub>** и **V<sub>fhg</sub>** сильно уплотняются, наблюдается сегрегация соединений Fe и Mn в мелкие конкреции. Они аккумулируют ионы ТМ, что ранее отмечено и в глееподзолистых почвах заповедника «Малые Корелы» (см. фото 46), и в дерново-подзолах на двучленах ЛОД МСХА [5]. В транс-элювиальных склоновых геохимических ландшафтах активно выражен боковой (**латеральный**) вынос мигрантов, который приводит к формированию еще более мощного контактно-осветленного горизонта **E<sub>Lg</sub>/V<sub>g</sub>**. Однако оподзоливание здесь характеризуется физико-химической направленностью элювиально-глеевого процесса в отличие от гор. **E<sub>hg</sub>**, развитие которого связано с биогеохимической миграцией веществ (биогенной и водной).

Водная миграция веществ в изучаемых подзолах таежного лесопарка Петрозаводска выражена активно. Заметно меньший масштаб абиотической миграции ВОВ отмечен в подзоле контрольного (**ненарушенного**) лесного ландшафта на плакоре (разрез 4п) и в заповеднике «Кивач» разрез № 1. Установлено, что компоненты ВОВ с кислотными свойствами слабо сорбируются на оглеенных почвенно-геохимических барьерах, с низкой емкостью поглощения, вследствие чего гумусовый горизонт (**A<sub>1</sub>**) в подзолах не формируется, и морфологически не диагностируется.

ВОВ с кислотными свойствами являются основной движущей силой трансформации продуктов почвообразования (соединений Fe, Ca, и Si), так

и ионов ряда тяжёлых металлов. Роль  $H_2CO_3$  второстепенна: эта кислота очень слабая и не содержит энергии в химических связях. В полевых лизиметрических опытах **обнаружен возврат части мигрантов** за счет восходящей миграции. Так, для соединений Fe он варьировал по повторностям от 272 до 623 мг/м<sup>2</sup> за 1 год. Еще более высокий масштаб восходящей миграции из **гор.**  $V_{hg}$  обнаружен для ионов  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$  и  $Ca^{2+}$  соответственно равный (мг/м<sup>2</sup> за 1 год): 2967, 1650 и 1701 - наблюдения 2008 - 2009 гг.

Табл. 26. Масштаб внутрипрофильной миграции компонентов ВОВ и соединений железа в подзолах контактно-глееватых на двучленах в лесопарке г. Петрозаводска<sup>1)</sup>, почвах заповедников острова «Кижы» (Онежское озеро) и «Кивач» Карелии.

| Горизонт и глубина установки сорбционных лизиметров, см  | С <sub>орг</sub> ВОВ, г/м <sup>2</sup> за 1 год   |  |  | Fe <sup>3+</sup> , мг/м <sup>2</sup> за 1 год           |   |
|--|---|--|--|---|---|
|  | В составе водо-ацетонового элюата из угля – (ИОВ) | В составе аммонийного элюата из угля - специф. группа ВОВ - (ФК) | По сорбции ВОВ на Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | После разрушения ВОВ, 20% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | % ионов Fe <sup>3+</sup> , прочно связанных с ВОВ |
| <b>Контроль: Разрез 4п.</b> Ландшафт автономный ( <b>плакор</b> ) нетрансформированный: ельник-черничник разнотравный. Наблюдения 1 год  |   |  |  |   |   |
| A <sub>0</sub> <sup>тн</sup> - 3   | 5,2 ±1,5  | 2,4 ±0,9   | 1,3 ±0,5   | 449,2   | 54,3  |
| E <sub>h</sub> - 14  | 4,6 ±1,3  | 2,1 ±0,8   | 0,9 ±0,1   | 316,6   | 59,6  |
| V <sub>f</sub> - 36  | 0,5 ±0,1  | 0,9 ±0,2   | 0,1 ±0,0   | 38,5  | 72,4  |
| <b>Разрез 5п.</b> Ландшафт транс-элювиальный. <b>Вырубка</b> (западника; фация черничника-сфагнового в средней части склона увала). Наблюдения: июль 2002 - июль 2003 гг.  |   |  |  |   |   |
| A <sub>0</sub> <sup>тн</sup> - 5   | 17,9 ±3,5   | 8,3 ±1,6   | 4,7 ±1,5   | 429,4   | 67,2  |
| E <sub>hg</sub> - 12   | 14,1 ±3,2   | 10,9 ±1,9  | 2,5 ±0,7   | 697,5   | 70,4  |
| V <sub>hg</sub> (тр.) - 39   | 3,7 ±1,1  | 14,4 ±2,4  | 0,8 ±0,3   | 722,5   | 70,8  |
| V <sub>h</sub> (не тр.) - 38   | 1,9 ±0,7  | 4,9 ±1,6   | 0,5 ±0,1   | 189,2   | 76,3  |
| <b>Разрез 5п.</b> Ландшафт транс-элювиальный. <b>Вырубка</b> (западника; фация черничника-сфагнового в средней части склона увала). Наблюдения: июль 2003 – июль 2004 гг.  |   |  |  |   |   |
| A <sub>0</sub> <sup>тн</sup> - 4   | 10,5 ±2,7   | 5,4 ±1,8   | 3,8 ±1,3   | 318,4   | 52,7  |
| E <sub>hg</sub> - 11   | 7,9 ±1,4  | 2,8 ±0,7   | 2,9 ±0,8   | 224,2   | 58,6  |
| V <sub>hg</sub> - 37   | 1,4 ±0,3  | 2,6 ±0,7   | 0,4 ±0,0   | 112,8   | 64,3  |
| <b>Разрез 3п.</b> Ландшафт транс-аккумулятивный. <b>Вырубка</b> на опушке леса - нижняя 1/3 склона увала (фация ельника-зеленомошника). Наблюдения: июль 2003 – июль 2004 гг.  |   |  |  |   |   |
| A <sub>0</sub> <sup>тн</sup> - 5   | 14,7 ±3,1   | 6,8 ±1,4   | 5,8 ±1,9   | 543,9   | 59,6  |
| E <sub>hg</sub> (тр.) - 15   | 8,5 ±1,8  | 9,6 ±2,2   | 4,1 ±1,3   | 705,3   | 38,4  |
| V <sub>fg</sub> (тр.) - 40   | 2,3 ±0,8  | 3,7 ±1,1   | 2,0 ±0,6   | 198,2   | 29,7  |
| <b>Фоновый мониторинг: Разрез 1 - заповедник «Кивач».</b> Ландшафт автономный лесной: «Сопохский бор» - беломошник. Почва – подзол иллювиально-железистый песчаный на флювиогляциальных бескарбонатных отложениях. Наблюдения: 28.09.1971 – 15.06.1972 гг. |   |  |  |   |   |
| A <sub>0</sub> <sup>тн</sup> - 5   | 5,1 ±0,9  | 3,3 ±0,7   | не исп.  | 521,7 ±24,1   | 68,1  |
| E <sub>h</sub> - 12  | 3,5 ±1,1  | 3,2 ±1,5   | не исп.  | 391,3 ±17,9   | 92,4  |
| V <sub>f</sub> - 37  | 4,1 ±0,7  | 3,7 ±1,3   | не исп.  | 286,8 ±18,4   | 100   |
| <b>Фоновый мониторинг: Разрез 2 – заповедник «Кижы»</b> в Онежском озере. Ландшафт полевой с луговым разнотравьем (склон гряды). Почва: дерновая шунгитовая среднесуглинистая на аллювиально-озерных отложениях. Наблюдения: 17.07.2003 – 20.07.2004       |   |  |  |   |   |
| A <sub>д</sub> - 4   | 3,4 ± 0,2   | 0,6 ± 0,1  | 0,9 ± 0,1  | 21,1  | 44,7  |
| A <sub>1</sub> - 10  | 0,9 ± 0,0   | 0,2 ±0,0   | 0,2 ±0,0   | 66,7  | 53,9  |

1) В полевых изысканиях участвовал аспирант кафедры экологии РГАУ-МСХА Мухин Е.В. Результаты исследований по **разрезу №1** - И.М. Яшина (1974).

Отмечается, если бы из почв подзолистого типа происходил только нисходящий вынос продуктов почвообразования (при промывном типе

водного режима), то они со временем вообще перестали бы существовать. На самом деле, происходит активное накопление различных мигрантов как в биомассе таежных экосистем, так и возврат их заметной массы в верхние почвенные горизонты с восходящими капиллярными потоками влаги (табл. 27). Таким образом, наблюдается пульсация мигрантов, образно говоря, «дыхание мигрантов», по-видимому, связанное с колебанием уровня залегания грунтовых вод. Особенности этого интересного процесса пока не совсем до конца понятны. Но они имеют место, как и физический процесс морозного выпучивания камней из нижних почвенных слоев в верхние. Так происходит разрыв однородного сложения генетических горизонтов, появление магистральных каналов миграции в профилях почв (фото 47, 48). Восходящий вектор водной миграции мобильных веществ обусловлен гидротермическим градиентом, возникающим в периоды промерзания или иссушения верхних почвенных горизонтов. В известной мере реализуется также концентрационный градиент, вызывающий диффузию веществ в оглеенных горизонтах. На глеевом барьере изменяется и форма миграции Fe, Si, Al Mn: наряду с ионами, «под защитой» ВОВ мигрируют и коллоиды. Происходит заиливание песчаного субпрофиля, усиление его оглеения и



Рис. 47. Лесная опытная дача РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева: фация сосняка лиственничного на плакоре увала с дерново-подзолом контактно-осветленным супесчаным, развитым на двучленных отложениях; профессор И.М. Яшин препарирует кутаны, взятые **из магистральных каналов** водной миграции при морфологическом исследовании почв на двучленах (автофото, 10.05.2006).

трансформация почвы сначала в глеевый подзол, а затем и в болотно-подзолистую почву. Здесь важную роль играет диффузия, а массоперенос веществ осуществляется в профиле локально - по магистральным каналам. Их еще нужно найти, ведь они то же заиленные. Гидроморфизм на вырубках усиливается и сказывается на соседних ареалах почвы. Коллоидная форма миграции, например Fe, четко выражена в нижней 1/3 склона увала, по западинкам, где происходит разгрузка латерального водного потока миграции (табл. 27). **Коллоиды Fe** при водной миграции

(под защитой ВОВ) могут увлекать при миграции и другие ионы металлов, а также молекулы ФК. Это одно из проявлений лессиважа, хотя данный процесс в таежной зоне России изучен недостаточно.

Интересный фактический материал по лессиважу накоплен европейскими и прибалтийскими почвоведом, хотя В.М. Фридланд изучал этот процесс еще в 1956 году, назвав его иллиммеризацией. По-видимому, в почвах таежных экосистем РФ, в условиях масштабной водной миграции ВОВ с кислотными свойствами, ведущим процессом является подзолообразование. Оно включает кислотный гидролиз первичных минералов и коллоидов, формирование комплексных органоминеральных соединений и их перераспределение в профиле почв подзолистого типа. В биоклиматических условиях средней и северной тайги России подзолообразование преобладает над лессиважем. Хотя в лесных ландшафтах южной тайги вполне возможно проявление процессов лессиважа наряду с оподзоливанием (И.М. Яшин, А.Д. Кашанский, 2015). Лессиваж – это процесс сезонного выноса тонкодисперсных частиц почвы под защитой ВОВ без их разрушения.

Табл. 27. Масштаб нисходящей и восходящей водной миграции соединений Fe и ВОВ в подзолах контактно-глеевых в таежном лесопарковом ландшафте г. Петрозаводска. Наблюдения: 2003 – 2004 гг.

| Горизонт и глубина установки колонок, см   | Сорг ВОВ, г/м <sup>2</sup> за 1 год            |   | Fe, мг/м <sup>2</sup> за 1 год                 |   |
|--|--|---|--|---|
|  | по сорбции катионитом<br>КУ – 2 Н <sup>+</sup> | по сорбции анионитом<br>АВ – 17 ОН <sup>-</sup> | по сорбции катионитом<br>КУ – 2 Н <sup>+</sup> | по сорбции анионитом<br>АВ–17 ОН <sup>-</sup> |
| <b>Разрез 5п. Ландшафт транс-элювиальный.</b>  |  |   |  |   |
| <b>Вырубка (западинка; фация черничника-сфагнового в средней части склона увала).</b>  |  |   |  |   |
| А <sub>0</sub> <sup>тп</sup> - 7   | 8,7 ± 3,4                                      | 8,6 ± 2,0                                       | 260,5 ± 63,8                                   | <b>322,4 ± 91,3</b>                           |
| Е <sub>hg</sub> - 12   | 7,4 ± 1,6                                      | <b>14,4 ± 3,8</b>                               | 142,5 ± 71,5                                   | 183,8 ± 75,2                                  |
| В <sub>hg</sub> – 36   | <b>2,1 ± 0,7</b>                               | <b>3,8 ± 1,7</b>                                | 74,2 ± 29,1                                    | 121,8 ± 59,3                                  |
| В <sub>hg</sub> (восх.)  | <b>6,6 ± 1,5</b>                               | <b>8,1 ± 2,2</b>                                | <b>305,1 ± 94,7</b>                            | <b>394,9 ± 123,7</b>                          |
| <b>Разрез 3п. Ландшафт транс-аккумулятивный. Вырубка на опушке леса - нижняя 1/3 склона увала (фация ельника-зеленомошника).</b> |  |   |  |   |
| А <sub>0</sub> <sup>тп</sup> - 5   | <b>10,8 ± 2,7</b>                              | <b>11,6 ± 2,7</b>                               | <b>327,5 ± 131,8</b>                           | <b>614,9 ± 204,3</b>                          |
| Е <sub>hg</sub> 14(транс. <sup>1</sup> )   | 3,9 ± 0,8                                      | <b>9,4 ± 2,9</b>                                | 397,4 ± 98,4                                   | 422,3 ± 143,8                                 |
| В <sub>hg</sub> 40(транс)  | <b>0,4 ± 0,0</b>                               | <b>5,7 ± 1,7</b>                                | 84,6 ± 29,5                                    | 130,7 ± 58,4                                  |

1) Транс. – трансформированные генетические горизонты.

Анализ результатов полевых опытов по изучению водной миграции ВОВ и соединений железа в таежном лесопарке Петрозаводска свидетельствует об активной миграции ВОВ, формирующихся в оторфованных лесных подстилках (табл. 27). Трансформирующийся иллювиальный горизонт (барьер миграции) подзола на вырубке наиболее интенсивно сорбирует органические мигранты в сравнении с транзитным - подзолистым. Установлено, что из иллювиального горизонта часть массы мигрантов может вновь возвращаться в верхние горизонты подзола.

Факт восходящей водной (пленочно-капиллярной) миграции отмечен нами и в отношении соединений железа. Вынос продуктов почвообразования наиболее активно проявляется в почвах подошвы склона.





Рис. 48. Крупный план профиля почвы, что на **фото 47**: отчетливо видны завуалированность *подзолистого* и *иллювиально-железистого* верхних горизонтов компонентами ВОВ (возможно, и частицами сажу), а контактно-осветленный горизонт на границе смены пород – ярко белесый; в профиле почвы на двучленах хорошо **выражены магистральные каналы** миграции углубляющиеся в красно-бурый горизонт **В**; в этой связи **места установки сорбционных лизиметров** в генетических горизонтах нужно выбирать с учетом данного сложения почвы (фото И.М. Яшина, 2006).



Рис. 49. Мощный вывал елей на стационарной площадке Петрозаводска: аспирант А.А. Петухова **изучает морфологию вывала** с субстратом песчаного сильнокаменистого микро подзола, и формирование здесь западин с близким залеганием водоупоров – тяжелосуглинистых иллювиальных горизонтов двучленных почвообразующих пород; в **западинах вывалов, как и на вырубках**, начинается активное заболачивание, а почвенный покров становится еще более контрастным по сочетанию почв; **ниже представлено фото** начального этапа трансформации барьера миграции – иллювиально-железистого горизонта подзола в 2002 году (фото И.М. Яшина, 2012).

## Экологическое состояние поверхностные вод и их загрязнение в ландшафтах Европейского Севера России

Компоненты биосферы (атмосфера, биота, почвенный покров, почвообразующие и подстилающие породы, а также поверхностные, грунтовые и артезианские воды) испытывают в настоящее время масштабную антропогенную нагрузку (Израэль Ю.А., 1979; Николис Г., Пригожин И., 2003; И.М. Яшин, 2000, 2004, 2013).



Фото 7. Стационар «Карельский» (пригород г.Петрозаводска).Сложная фация ельничка-сосняка разнотравно-черничного на подзоле контактно-глеевом, развитом на двучленных породах.  
На фото отчетливо заметна трансформации соединений железа –  $Fe(OH)_3$ -компонентами ВОВ и, очевидно, «кислотными дождями»- в горизонте  $B_{tr}$ . Здесь выделяются три зоны : 1- до деградации (исходная), ее площадь составляет примерно 35-45% от общей площади иллювиального горизонта  $B_{tr}$ , 2- зоны трансформации гидрогелей гидроксида железа, 3- зоны миграции и биохимической деградации органо-минеральных и иных соединений железа в результате чего образуются белесые пятна подзолистого горизонта-  $A_2$ ; их площадь не превышает 15%.Наибольшую площадь занимают участки зоны трансформации, что и указывает на негативные процессы деградации почвенных барьеров .

Указанная проблема имеет **глобальный характер**. Экотоксиканты не только постепенно внедряются в химические соединения почв, растений, донные осадки рек, озер и водохранилищ и коры выветривания, загрязняют поверхностные воды, но и вызывают изменения структурной организации веществ, *свойств гумуса, хлорофилла*, в той или иной мере уже влияя и на биоту — биологически взаимосвязанные генные программы их жизнедеятельности. Так постепенно или скачкообразно (вблизи крупных городов, промышленных объектов, свалок) изменяются состояние и **устойчивость** компонентов ландшафтов. Металлы — экотоксиканты, как известно, дифференцированы в три группы по степени токсичности, обычно выполняют функции **«двойников»**, например, в белковых

макромолекулах ферментов (Co, Cd), затормаживая самые различные биохимические реакции, включая процессы самовоспроизведения клеточных структур, ритм химических часов, дыхания.

Отмеченные нарушения весьма негативно сказывается на одной из таких важнейших функций биосферы - **самоорганизация веществ** в ландшафтах (И.М. Яшин и соавт., 2000). В свою очередь экологическая безопасность ландшафтов неразрывно связана с *экологической культурой индустриализации, быстрым ростом народонаселения* (особенно в крупных промышленных центрах), обозначившимся дефицитом продовольствия и утилизацией огромных масс твердых, жидких отходов производств и продуктов техногенных катастроф. Эти задачи решаются в развитых странах путём разработки и внедрения безотходных производств, в частности **в водоподготовке** при глубокой очистке природных вод для нужд населения. Более полная реализация данного вопроса предопределяет оценку экологической ситуации в бассейнах рек (по водосборам), как аккумулятивного геохимического ландшафта. Важную роль при оценке гидрохимического состава речных вод играет почвенный покров и экологическое состояние ландшафтов. *Масштабные вырубki лесов, пожары, засухи, большие площади распаханых лугов и пастбищ способствуют эрозии и химическому загрязнению поверхностных вод.*

Рассмотрим данное положение на примере экологического состояния поверхностных вод некоторых рек Европейского Севера России, поскольку этот вопрос напрямую связан с экологической безопасностью жизни людей.

Основные критерии и оценка химического состава, свойств речных, озёрных и иных поверхностных природных вод рассматриваются в дисциплинах «Гидрология», «Гидрогеология» и «Гидрохимия». На современном этапе накапливается всё больше новой информации об источниках загрязнения наземных ландшафтов, обуславливающих, в свою очередь, *гидрохимические особенности природных вод*. Например, в устьевой зоне р. Сев. Двины на долю естественных факторов загрязнения речных вод ТМ приходится **25-37%**, а остальные связаны с антропогенными воздействиями. Среди первых важную роль играют *почвообразующие, подстилающие и коренные породы* (Экология Северной Двины, 1998). Интенсивность мобилизации ионов ТМ в почвенный раствор, грунтовые и речные воды определяется целым рядом *внешних и внутренних факторов миграции*, среди которых важная роль принадлежит *мобильным гумусовым веществам и компонентам ВОВ* с кислотными свойствами. Так, в Беломорско-Кулойском плато, на глубинах 150-250м, мобилизация в раствор ионов  $Ba^{2+}$  и  $Sr^{2+}$  в основном связана с *гальмиролизом* — действием слабо минерализованных солевых растворов на минералы кор выветривания, роль ВОВ с кислотными свойствами опосредована.

Основными задачами при оценке экологической ситуации в бассейне реки являются: *диагностика уровня загрязнения, характеристика антропогенных нагрузок, выявление и изучение источников загрязнения,*

совершенствование существующих методов химического анализа, экологический прогноз миграции экотоксикантов в ландшафтах, *применение эффективных способов очистки вод от загрязнителей*, определение размеров экономического ущерба от загрязнения вод.

Для каждого водосбора и бассейна реки существуют свои экологические особенности самоочищения. Например, бассейн реки Волги начинается в болотах Подмосковья – в подзоне южной тайги, а ее устье – в полупустыне, с иными условиями климата, другими ландшафтами и почвами. Конечно, это сказывается на экологическом состоянии речных вод всего бассейна. При водопотреблении часть водных ресурсов безвозвратно изымается из природного круговорота воды, причем данный объем не должен превышать 10-20%. Специфика химического загрязнения поверхностных вод Европейского Севера (например, в долине реки Сев. Двины на участке от г. Котласа до г. Архангельска) неразрывно связана с функционированием *лесогаготовительной, лесоперерабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности, активным водопотреблением и молевым лесосплавом*. В последнем случае из древесины хвойных пород в речные воды дополнительно мобилизуются заметные массы компонентов ВОВ, в частности, органические (в том числе и ароматические) кислоты и полифенолы – активные химические восстановители, отнимающие из воды свободный молекулярный  $O_2$ . Функционирование гидробионтов и рыбы ухудшается. Аналогичная экологическая ситуация наблюдается на реках Печора, Мезень, Кулой.

Требования, предъявляемые к качеству поверхностных природных вод, должны учитывать интересы всех водопользователей. В настоящее время разработаны и утверждены только *санитарно-гигиенические и рыбохозяйственные нормативы* загрязнения. Экологических нормативов пока нет, а при их разработке следует учесть почвенно-геохимическую и геологическую информацию.

В связи с заметным разнообразием состава и свойств **сточных вод**, сбрасываемых в речные воды, возникает необходимость в выделении *небольшого числа репрезентативных показателей* для оценки качества вод. Сточные воды подразделяются на хозяйственно-бытовые, промышленные и атмосферные (ливневые) воды. Рассмотрим их некоторые особенности.

Бытовые сточные воды формируются при приготовлении пищи, мытье посуды, уборки помещений, автотранспорта, барж, вагонов и санузлов с помощью агрессивных моющих средств; к ним также относятся стоки банно-прачечных комбинатов и др. *Биохимическое потребление кислорода (БПК)* этих вод микроорганизмами, по данным, например, Василеостровской насосно-очистой станции С.-Петербурга, в течение суток колеблется в пределах 100-400 мг/л (Н.Ф. Возная, 1979). Бытовые сточные воды в основном связаны с жизнедеятельностью людей в городах и населенных пунктах. Компонентный состав таких вод обусловлен *органическими веществами растительного и животного генезиса*. Среди минеральных компонентов диагностируются частички песка, глины, мела,



шлаков, минеральных солей, масла, коллоиды железа, алюминия, марганца и кремния. Указанные компоненты, так или иначе, используются людьми для различных целей. Бытовые сточные воды содержат обычно микроорганизмы: бактерии, дрожжевые и плесневые грибки, а также мелкие водоросли, яйца гельминтов, вирусы. Эти воды *являются эпидемиологически опасными* для людей и животных, поскольку наряду с сапрофитными они содержат и болезнетворные микроорганизмы.

Атмосферные (ливневые) воды наряду с дождевыми, включают воды от таяния снега, поливки улиц, дренажные воды и многочисленных фонтанов. Эти воды весной обогащаются антигололедными реагентами, частицами песка и гранитной крошки, используемых зимой на автомагистралях.

Промышленные сточные воды образуются на фабриках и заводах после использования воды в производственных целях, а также при промывке аппаратуры, помещений, оборудования. В зависимости от характера производств, гидрохимический состав таких сточных вод различный. Например, сточные воды *гальванических цехов* существенно обогащены цианидами щелочных металлов, ионами хрома и меди. Причем, особенно вредно смешивание цианидов с кислотами, поскольку образуется синильная кислота – HCN. Эту кислоту утилизируют хлором в щелочной среде. Сточные воды, содержащие хромовую кислоту  $H_2CrO_4$ , очищают сульфитами натрия. Затем растворы подщелачивают. Сульфат хрома выпадает в осадок в форме гидрогеля гидроксида хрома.

Сточные воды кожевенных заводов весьма интересны в экологическом отношении: здесь очень много различных загрязнителей, а также споры сибирской язвы. Поэтому такие воды необходимо дезинфицировать хлорамином  $NH_2Cl$ . В сточных водах много хрома. Поэтому показатель БПК сточных вод отработанного дубильного раствора достигает 4340-5730 мг/л. Сточные воды зольного цеха кожевенного производства содержат много карбоната кальция и сернистого натрия. Наряду с этим в водах находится довольно высокие концентрации органических веществ и взвешенные частицы шерсти. По степени загрязненности сточные воды кожевенного завода, образующиеся при выработке 1 т шкур, эквивалентны бытовым сточным водам населенного пункта численностью 5 тыс. человек (Н. Wagner, 1950, S. 75-78). В Талдомском районе Московской области сточные воды подобного производства привели к загрязнению реки Дубна.

Для дезинфекции шкуры обрабатывают раствором, содержащим 2% соляной кислоты и 15% хлорида натрия, в течение 40 час. при температуре порядка  $30^{\circ}C$ . Сточные воды, образующиеся при мытье полов и стен кожевенного сырьевого завода обрабатывают хлорной известью, Контакт должен быть не менее 12 часов.

Промышленные сточные воды, содержащие жиры и масла, вследствие образования тонких пленок на поверхности воды могут прекратить доступ кислорода к воде и нарушить газообмен в системе вода-воздух. Растительные и животные масла сравнительно быстро утилизируются, а

минеральные (машинные масла) весьма устойчивые к биодegradации микроорганизмами. Весьма негативное влияние на гидробионты оказывают сточные воды химических производств – красители, полифенолы и фенолы, а также смолы – отходы термической переработки топлива. Указанные вещества являются восстановителями и активно потребляют растворимый в воде кислород. Рыбы и гидробионты страдают от нехватки кислорода а вода приобретает неблагоприятные органолептические свойства.

Растворенные неорганические вещества промышленных сточных вод (минеральные кислоты, щелочи, сероводород, тиосульфаты, сульфиты, сульфаты, соли тяжелых металлов) в воде подвергаются различным реакциям превращения, что влечет за собой заметное уменьшение содержания в воде кислорода. Вода приобретает негативные гидрохимические свойства.

Отметим, что *гидрохимический анализ сточных вод* на очистных станциях несколько иной в сравнении с аналогичным анализом поверхностных вод.

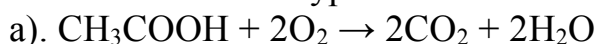
*В аналитической схеме сточных вод* диагностируются ионы тяжелых металлов (Fe, Hg, Cd, Mn, Cr, Co, Cu, Ni, Zn), цианиды, сульфаты, сульфиты, фенолы, формальдегид, синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), нефтепродукты, катионы аммония, ХПК, БПК и другие.

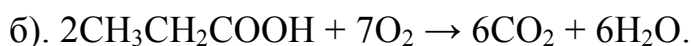
Среди методов оценки загрязнения рассмотрим параметр ХПК (химическое потребление кислорода восстановителями), содержащимися в сточных водах. Это могут быть органические кислоты и фенолы, спирты и кетоны, глицерин и высшие жирные кислоты, дубильные вещества и смолы, масла, а также неорганические восстановители. Таким образом, величина **ХПК** учитывает потребность в кислороде, необходимую для полного окисления восстановителей в сточной воде. Количественное определение ХПК в лабораторных опытах осуществляется окислением веществ с восстановительными свойствами «хромпиком» - раствором  $K_2Cr_2O_7$  в концентрированной  $H_2SO_4$ . В этих условиях все химические элементы окисляются до оксидов: углерод – до  $CO_2$ , сера – до  $SO_2$ , фосфор – до  $P_2O_5$ . По величине ХПК характеризуют обычно производственные сточные воды. Причем, показатель **ХПК заметно больше БПК**, поскольку при биохимических процессах *не все органические вещества сточных вод окисляются ферментами микроорганизмов*, Кроме того, при диагностике БПК следует помнить, что в воду возвращается часть массы органических веществ из клеток микроорганизмов (табл.28). Данные этой таблицы указывают, что величины БПК по абсолютному значению составляют 51-87% от ХПК. Примечательно, что значения ХПК промышленных сточных вод (если хотя бы ориентировочно известен состав органических веществ) можно установить расчетным путем. Рассмотрим это на примере.

**Пример.** В сточной воде содержится 1 г/л уксусной кислоты и 1 г/л пропионовой кислоты.

Решение.

Вначале составим уравнение окисления каждой органической кислоты:





Затем определим необходимое количество кислорода для окисления кислот:

а). для 60 г•моль/л  $\text{CH}_3\text{COOH}$  требуется 64 г•моль/л  $\text{O}_2$ ;  
 для 1 г•моль/л  $\text{CH}_3\text{COOH}$  требуется  $x_1$  г•моль/л  $\text{O}_2$ .

Отсюда  $x_1 = 1,0666$  г•моль/л.

б). для 74 г•моль/л  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$  требуется 112 г•моль/л  $\text{O}_2$ ;  
 для 1 г•моль/л  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$  требуется  $x_2$  г•моль/л  $\text{O}_2$ .

Отсюда  $x_2 = 1,5135$  г•моль/л.

$\text{ХПК}_{\text{общ}} = 1066,6 + 1513,5 = 2580,1$  мг•моль /л.

В то же время применение аналитического расчетного метода без ясного понимания сущности происходящих реакций обедняет его возможности и может привести к ошибкам при трактовке результатов исследований. Например, в методике определения органического углерода  $\text{C}_{\text{орг}}$  в почве используют следующее уравнение химической реакции:



В сущности, взаимодействие сложных молекулярных структур гумусовых веществ (ГВ) здесь сведено к **одному типу атомов углерода** – графиту.

Табл.28. Соотношение величин **БПК И ХПК** (для некоторых органических веществ промышленных сточных вод – **И.Я.**) по Н.А. Базякиной – Очистка концентрированных промышленных вод. 1958.

| Органические вещества | Химическая формула                  | На 1 г•моль (И.Я.)* органического вещества |             | БПК, % от ХПК |
|-----------------------|-------------------------------------|--|-------------|---------------|
|                       |                                     | ХПК  | БПК         |               |
| Этиловый спирт        | $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$     | <b>2080</b>                                | <b>1820</b> | <b>87,4</b>   |
| Ацетон                | $\text{CH}_3\text{COCH}_3$          | 2170                                       | 1680        | <b>76,5</b>   |
| Уксусная кислота      | $\text{CH}_3\text{COOH}$            | 1070                                       | 860         | 80,0          |
| Фенол                 | $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$     | <b>2380</b>                                | <b>1100</b> | 46,0          |
| Глюкоза               | $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ | 1010                                       | 600         | 59,5          |

\*Химическое потребление кислорода (ХПК) в фоновых водах реки Межа и Большом пруду Центрально-лесного заповедника в Тверской области (отбор 29.08.2015) соответственно составил –  $12,4 \pm 2,5$  и  $28,8 \pm 6,9$  (ПДК-30 мг/л); биохимическое потребление кислорода (БПК) –  $10,4 \pm 1,6$  и  $16,0 \pm 2,1$  (ПДК – 4,0 мг/л). Установленные значения гораздо меньше аналогичных величин сточных вод.

Подобная реакция конечно удобна для расчетов мольных соотношений окислителей (*дихромата калия и серной кислоты*) и восстановителя (молекул ГВ), но она *не отражает природы анализируемых гумусовых веществ*, которые имеют чрезвычайно сложный состав и структуру. Пока не найдено более точного уравнения окисления  $\text{C}_{\text{орг}}$ , необходимо отмечать *его условность* и особенности реализации. Исходя из элементного состава



гуминовых кислот, выделенных препаративно, например, из чернозема (данные Д.С. Орлова, 1990; С – 58%, Н – 4%, О – 36%, N – 3,8%), можно рассчитать элементарную структурную формулу одной молекулы гуминовой кислоты (ГК), приняв молекулярную массу (ММ) данных веществ за 50 000: в 1 моле ГК содержится  $50\,000 \cdot 58 / 12 \cdot 100 = 2000$  молей атомов водорода;  $50\,000 \cdot 36 / 16 \cdot 100 = 1125$  молей атомов кислорода;  $50\,000 \cdot 3,8 / 14 \cdot 100 = 136$  молей атомов азота. Приняв за единицу количество молей азота, получим искомую элементарную формулу одной молекулы ГК:  $C_{18}H_{15}O_8N$ , а ее молярная масса равна 373 г•моль:  $C(12 \cdot 18) + H(1 \cdot 15) + O(16 \cdot 8) + N(1 \cdot 14)$ . Если в **373 молях** содержится 18 молей атомов углерода, то в анализируемом почвенном образце ГК с ММ = 50 000 будет **2413** молей атомов углерода. Тогда вышеуказанная реакция окисления  $C_{орг} - 4\bar{e} \rightarrow C^{4+}$  и восстановления хрома  $Cr^{6+} + 3\bar{e} \rightarrow Cr^{3+}$  записывается иначе:



Напомним, что при любой химической реакции атомы и молекулы (при переходе реagens в продукты) *только перегруппировываются*, а число атомов и массы молекул остается постоянным (это известный закон сохранения массы веществ). Именно поэтому важно точно записывать химическую реакцию. Правило наименьших коэффициентов не является общим постулатом, поскольку оно не отражает природы реагентов и продуктов реакций. А ведь важно учитывать, какие молекулы ГК окисляются: из чернозема или подзолистой почвы – более упрощенной структуры, более молодые по возрасту, слабо сорбированные почвенными минералами и активно обновляющиеся компонентами ВОВ.

Кроме того, реальная реакция наглядно отражает ее масштабность<sup>22</sup> и то, что продуктами окисления молекул ГК дихроматом калия *не всегда становятся вода, CO<sub>2</sub> и минеральные соли*: нередко среди них можно обнаружить органические кислоты (бензойную, ди- и трикарбоновые кислоты) и иные продукты неполного окисления структур гумусовых соединений; например, дикарбоновые кислоты трансформируются при нагревании (с выделением CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) в циклические кетоны. Следовательно, рассматриваемая реакция (58), несмотря на кажущуюся простоту и завершенность, изучена недостаточно.

Новизну в ее осмысление внесли английские исследователи (Д.Л. Роуэлл, 1998), введя строгие химические расчеты и современную систему единиц измерения в соответствии с рекомендациями ИЮПАК: количество веществ (моль), молярную массу (г/моль), молярную концентрацию (моль/л) и молярный объем любого газа (л/моль), равный 22,4 л.

Кратко рассмотрим методику расчетов английских исследователей.

*На первом этапе* она включает определение молярности раствора окислителя  $K_2Cr_2O_7$  в той пропорции, в какой остаток

<sup>22</sup> Одновременное участие в реакции окисления-восстановления тысяч атомов и молекул предопределяет стадийность взаимодействий и возможность формирования промежуточных соединений.

непрореагировавшего дихромата калия взаимодействует при титровании с сульфатом железа (II) соли Мора (1 моль  $K_2Cr_2O_7$  реагирует с 6 молями  $FeSO_4$ ):  $n = 39,2 \text{ г } (K_2Cr_2O_7)/294 \cdot 2 = 0,0667^{23}$  моля, или 66,7 ммоль. Вычисляют число молей окислителя в 40 мл, которое используют в холостом опыте (кипячение раствора при  $t^\circ C \sim 130...135^\circ C$  в течение 2 ч):  $n = 0,0667 \text{ ммоль} \cdot 40 \text{ мл}/1000 \text{ мл} = 2,668 \cdot 10^{-3}$  моль, или 2,668 ммоль. Цель холостого опыта – стандартизация условий реакции. На холостое титрование 40 мл  $K_2Cr_2O_7$  идет порядка 36,7 мл  $\sim 0,4$  моли соли Мора.

На втором этапе проводят несколько рабочих опытов, каждый с 1 г почвы (все другие параметры повторяются). После окисления молекул гумусовых веществ почвы рабочий объем соли Мора составляет порядка 18,5 мл. Если этот объем меньше 15,0 мл, опыт прекращают и вновь его повторяют, уменьшив навеску почвы (уже не 1 г, а 0,5 г или 0,25 г). *Нужно узнать остаточное количество дихромата.* Оно равно:  $2,668 \text{ ммоль} \cdot 18,5 \text{ мл}/36,7 \text{ мл} = 1,345 \text{ ммоль}$ . А на окисление молекул гумусовых веществ пошло:  $2,668 \text{ ммоль}$  (холостое) –  $1,345 \text{ ммоль}$  (рабочее) =  $1,323 \text{ ммоль}$  дихромата калия.

На третьем этапе следует найти количество молей окисленных ГВ. Здесь нужна интерпретация химической реакции:  $2K_2Cr_2O_7 + 3C_{орг} + 8H_2SO_4 \rightarrow \dots$  Пока ограничимся прежними коэффициентами, когда 3 моля ГВ реагирует с 2 молями  $K_2Cr_2O_7$ . Тогда количество молей окисленного углерода составит:  $1,323 \text{ ммоль} \cdot 3/2 = 1,985 \text{ ммоль}$ . Молярная масса углерода равна  $12 \text{ г} \cdot \text{моль}$ , а масса окисленных ГВ составит:  $1,985 \text{ ммоль} \cdot 12 \text{ г/моль} = 23,82 \text{ мг } C_{орг}$  в 1 г воздушно-сухой почвы, или **2,38%  $C_{орг}$** .

На четвертом этапе полученный результат можно соотнести к абсолютной сухой почве. Так, если последняя содержит 5 г  $H_2O$  на 100 г абс. сухой почвы, то  $23,8 \text{ мг } C_{орг}$  ГВ присутствуют в  $100/105 = 0,952 \text{ г}$  абс. сухой почвы, а содержание  $C_{орг}$  будет равно  $23,8 \text{ г} \cdot 1/0,952 = 25,0 \text{ мг } C_{орг}$  в 1 г абс. сухой почвы.  $2,38\% C_{орг}$  можно перевести в массовые процессы гумусовых веществ. Если предположить, что в их составе содержание  $C_{орг}$  равно 58%, то переводной коэффициент будет равен  $1/0,58 = 1,724$ . Искомый результат – **4,1%**. На основе проведенных расчетов можно представить краткое уравнение для определения  $C_{орг}$  в почве:

$$N = 48 (1 - x/y)/m, \quad (59)$$

где 48 – переводной коэффициент молей окисленного углерода в массу  $C_{орг}$ , мг;  $x$  – рабочее титрование, мл;  $y$  – холостое титрование, мл;  $m$  – масса почвы, взятая для анализа, г.

Продолжим рассмотрение диагностики органического углерода.

Известно, что концентрацию  $C_{орг}$  в растворах часто определяют фотоколориметрически. Для гидрозолей гуминовых и гуминоподобных

<sup>23</sup> Здесь указаны: 39,2 г – масса высушенного дихромата; 294 г/моль – молярная масса дихромата калия; 2 – объем приготовленного раствора бихромата, л (английские специалисты к «хромпику» добавляют 40 мл концентрированной фосфорной кислоты и разбавляют водой).

соединений такой методических прием оправдан. В отношении ВОВ и фульвокислот (ФК) *прямая фотокolorиметрия не приемлема*, поскольку в составе указанных природных соединений присутствует значительная масса бесцветных компонентов, не регистрируемых данным прибором.

Причем, ошибки при диагностике *С<sub>орг</sub> в составе ФК и ВОВ* могут возникнуть и *на промежуточных этапах подготовки проб к анализу*. В частности, при *выпаривании аликвотов озерных, болотных и речных вод*, если ФК и ВОВ находятся в *кислотной, а не в солевой форме*, В этом случае *происходит термодеструкция многих низкомолекулярных органических компонентов индивидуальной природы (но не аминокислот)*, поэтому к исходным растворам перед их выпариванием досуха добавляют 10...20 мл насыщенного водного раствора Ca(OH)<sub>2</sub>. Наряду с отмеченными особенностями ошибки могут возникнуть и при диагностике *индивидуальных органических веществ* с помощью бумажной распределительной хроматографии, если их солевые формы не перевести в кислотные, что достигается путем добавления к аликвоту 1 н. раствора H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (до pH ~ 2,5...3,0). Затем «кислый» раствор хроматографируют. Подобная операция весьма эффективна при фракционировании групп ВОВ *на активированном угле*, поскольку добавленная H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> подавляет диссоциацию функциональных групп органических лигандов, а они в основном сорбируются (и разделяются) на угле по типу физической сорбции – неионизированных молекул органических веществ.

**В нативных поверхностных водах таежной зоны** вещества и химические элементы мигрируют в разных агрегатных состояниях и формах. Возможны *три формы миграции веществ* в ландшафтах со свободной движущейся водой: во взвесах, в форме истинно-растворимых и коллоидных соединений. Каждая из этих форм подразделяется в зависимости от химического состава и характера мигрирующих соединений.

Во *взвешенном состоянии* могут мигрировать различные тонкодисперсные частицы (пылеватые, илистые), первичные, вторичные минералы и органические вещества (детрит, растительные остатки), адсорбированные на минералах гумусовые вещества, а из химических элементов – золото, ванадий, главным образом, в речных и других поверхностных водах, открытых бассейнах – озерах, водохранилищах.

**В почвах** широко представлены *ионные формы миграции* веществ в виде катионов (K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> и др.) и анионов (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> и др.), которые или гидратированы, или мигрируют в форме комплексных и устойчивых органоминеральных соединений.

Среди веществ, мигрирующих в *форме истинных растворов*, особое значение имеют комплексные соединения, в которых лигандами могут выступать как неорганические, так и органические компоненты. Последние представлены веществами неспецифической и специфической гумусовой природы (И.С. Кауричев, 1965; И.М. Яшин, 1993, 2013).

Коллоидно-растворимые формы соединений Fe, Al и Si также широко участвуют в водной миграции, особенно в ландшафтах тайги. С ними, в частности, связана высокая цветность поверхностных вод.

При изучении генезиса различных типов почв экологи и почвоведы подробно рассматривают все указанные формы миграции веществ: *формирование профиля солонцовых почв, лессиваж, роль и активное участие органоминеральных соединений в миграции и трансформации веществ при подзолообразовании*. С ионными формами восходящей миграции водорастворимых солей связано развитие солончаково-солонцового процессов и деградация черноземов.

Для понимания и оценки геохимической обстановки конкретной территории речного бассейна (в конкретных ландшафтах) очень важно знать и оценивать *внешние условия* (факторы), способствующие развитию водной и ветровой миграции веществ. Это дает возможность прогнозировать и регулировать масштабы и пути миграции веществ на отдельных участках водосборов рек.

Внешние и внутренние экологические условия, характеризующие и определяющие миграцию химических элементов в речном бассейне, можно разделить на три группы:

1) Условия, влияющие на накопление и передвижение воды в почвенно-грунтовой толще.

2) Условия, определяющие химический и минералогический состав почвенно-грунтовой толщи, включая поступающие продукты антропогенного воздействия (удобрения, пестициды, вещества техногенного загрязнения).

3) Условия, определяющие различные свойства и режимы (пищевой, водный, газовый) почв. Они влияют на подвижность и растворимость компонентов почвы и поступающих в нее веществ.

Первая группа условий предусматривает оценку климатических параметров региона и их влияние на увлажнение территории (количество осадков, их режим, мощность снегового покрова, режим снеготаяния, КУ). Важно также учесть *конкретные локальные факторы*, определяющие водопроницаемость и водоподъемную способность почв, а также поверхностный сток: *гранулометрический состав, мощность гумусового слоя, почво-грунтов, условия рельефа, наличие растительности* и др. Для примера сопоставим условия миграции на покатом склоне мореного увала при различном механическом составе почвенно-грунтовой толщи. В одном случае это мощные покровные тяжелые суглинки, в другом – флювиогляциальные супеси или флювиогляциальные песчано-супесчаные отложения мощностью до **50 см** на суглинистой морене. Здесь наблюдаются существенные различия в абиогенной миграции веществ из-за различий в процессах поверхностной эрозии, внутрипрофильного стока, латерального потока и механизмах инфильтрации.

Рассматривая первую группу внешних условий, необходимо оценить дифференциацию ландшафтов в связи с их конкретной гидрологической характеристикой и прежде всего – по состоянию зоны выщелачивания.

Зона выщелачивания – это часть вертикального профиля почв ландшафта, в которой вещества мигрируют с гравитационной влагой вглубь под влиянием силы тяжести и кинетической энергии масс атмосферных осадков, достигших поверхности почвы.

Возможны следующие варианты и характеристика зон выщелачивания:

1) Выщелачивание веществ идет *до грунтовых вод*, которые геохимически связаны с поверхностными водами ландшафта. Зоны выщелачивания этого вида свойственны *супераквальным ландшафтам* (поймам). Здесь продукты миграции достигают грунтовых вод с возможным их загрязнением и выносом за пределы ландшафта в речные бассейны.

2) Выщелачивание веществ наблюдается глубже границы распространения корней, *но не достигает грунтовых вод* (элювиальный ландшафт тайги). Здесь наблюдается пульсирующее перераспределение мигрантов, связанное, частности, с восходящим потоком влаги и веществ.

3) *Поверхностно-элювиальная зона выщелачивания веществ* – атмосферная влага не проникает глубже корнеобитаемого слоя, что наблюдается в полупустынных и пустынных ландшафтах (при  $KU \ll 1,0$ ).

4) Зона выщелачивания веществ, формирующихся в условиях мерзлотных элювиальных ландшафтов. Она нами не рассматривается.

Вторая группа условий, обусловленная химическим и минералогическим составом почво-грунтов, *характеризует потенциальные возможности мобилизации* в растворимое состояние химических элементов и вносимых (поступающих извне) в почву веществ. Например, наличие солевых горизонтов в почвах свидетельствует о возможной мобилизации в раствор легкорастворимых солей при орошении и резком изменении масштабов их миграции в пределах элементарного геохимического ландшафта, а также возможном негативном влиянии на биоту.

Систематическое применение легкорастворимых удобрений (калийные соли, растворимые азотные удобрения) на легких почвах способствует повышенной миграции в почвах и ландшафтах ионов  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$ .

Третья группа условий характеризует свойства и режимы почв, усиливающие или затормаживающие мобилизацию химических элементов из сложных соединений в растворимую и доступную для растений формы. К ним следует отнести *щелочно-кислотные свойства, ОБ-состояние (режим) почв, сорбционную способность, микробиологическую активность и факторы, их определяющие*. Например, возникающие в почве временные восстановительные условия (поверхностно-оглеенные почвы) способствуют денитрификации ( $NO_3^- \rightarrow N_2 \uparrow$ ) и потере азота за счет его миграции в форме оксидов и  $N_2$  при воздухообмене; эти же условия приводят к образованию повышенного количества ВОВ и, как следствие, возникновению более активной трансформации различных элементов в растворимые и миграционные формы соединений: например катионные формы пестицидов,

образование *фосфорно-органических соединений нередко с ионами железа*. Почвы хорошо гумусированные более активно поглощают многие *пестициды*, ослабляя на время их водную миграцию в агроландшафтах.

Поскольку нами рассматриваются формы миграции химических элементов, целесообразно охарактеризовать методы подготовки вод для аналитической диагностики веществ в поверхностных водах.

Поверхностные воды нередко содержат в своем составе компоненты ВОВ, коллоиды, металлорганические комплексы, детрит, взвеси, загрязнители и микроорганизмы. Поэтому важная роль отводится их рациональному отбору и транспортировке. Полиэтиленовые сосуды перед заполнением на полную вместимость ополаскивают природной водой. В бутылки вносят несколько капель антисептика (толуол), а емкости по возможности быстро доставляют в лабораторию. Способы предварительной обработки, хранения и транспортировки проб воды освещены в работах О.А. Алекина, 1954; А.А. Резникова, 1963; Г.М. Варшал, 1977.

В.М. Заварзин (1970), например, предложил следующую схему анализа лизиметрических вод. Первая стадия – определение нестойких компонентов после отбора лизиметрической воды: рН и Eh потенциометрическим методом; кислотность, щелочность, содержание хлора объемным методом; закисное железо с  $\alpha$ ,  $\alpha$ -дипиридилем после предварительной стабилизации раствора буфером по Казариновой; нитраты дисульфифеноловым методом; аммиак колориметрически с реактивом Неслера; фосфаты методом Дениже в модификации Цинцадзе; органическое вещество ( $C_{орг}$ ) объемным методом по И.В. Тюрину\*<sup>24</sup>, в качестве катализатора и для связывания хлора используют немного  $AgNO_3$ . Вторая стадия – определение в речных, озерных и болотных водах *стойких компонентов* из сухого и затем прокаленного при 400...500°C остатка.

Полученный сухой остаток обрабатывают 1...5%-й HCl. Минеральные примеси отделяют фильтрованием. Затем сухой или прокаленный остаток *на фильтре обрабатывают щелочью*, чтобы перевести *кремнекислоту* в раствор. Проведение полного анализа по этой схеме требует значительного объема поверхностной воды (500...2000 мл) и продолжительного времени.

Перейдем к краткому рассмотрению методов определения веществ в поверхностных водах. При определении микроэлементов во многих случаях проводят *предварительное их концентрирование* из поверхностных вод. Методы концентрирования весьма разнообразные. Часто применяют *экстракционные методы*, характеризующиеся экспрессностью, простотой исполнения, позволяющие достичь абсолютных пределов обнаружения  $10^{-10}$ ... $10^{-13}$  г (Ю.А. Золотов, Н.М. Кузьмин, 1982). Экстракцию удобно сочетать с последующим спектральным определением элементов. В качестве *экстракционных реагентов* широко применяют дитиокарбамат, дитизон, 8-

---

<sup>24</sup> Метод детально описан в литературе по почвоведению. **Дополнения: пробы природных вод** (аликвоты по 20..40 мл) предварительно выпаривают досуха с 5 мл  $Ca(OH)_2$  для перевода свободных органических кислот в их гетерополярные соли, которые более устойчивы к температурной деструкции, чем кислоты (И.Я., 1973, 1993)).

оксихинолин. Спектрохимическое групповое определение микроэлементов в водах (до 13...15 элементов) основано на предварительном концентрировании экстракцией при pH~5 оксином в хлороформе и водным раствором карбамата (В.Я. Еременко, 1969; В.С. Аржанова, 1983). Применяют также смесь хелатообразующих веществ. В работе (Yu, Lo et al., 1982) использована смесь ПДКА<sup>25</sup> – ДЭДТК в хлороформе для экстракции из природных вод ряда ионов тяжелых металлов.

Более простым приемом является концентрирование химических элементов на целевых (чистых) сорбентах. В сорбционных лизиметрах концентрирование осуществляется в течение периода опыта (сезон, год). В лаборатории остается элюировать сорбированные вещества из сорбента и изучить их состав, свойства соответствующими методами.

Среди сорбентов применяют ионообменные смолы: катионит КУ-2 в H<sup>+</sup> форме для сорбции простых и сложных катионов металлов (Fe, Al, Ca) и анионит АВ-17 в OH<sup>-</sup> форме для сорбции анионов органических и минеральных кислот, а также анионных комплексных форм металлов (Fe, Al, Ca).

При анализе поверхностных вод используется концентрирование микроэлементов соосаждением на неорганических, смешанных и органических сорбентах. Среди минеральных соосадителей наиболее употребительны *оксиды, гидроксиды, сульфаты металлов*. Негативным моментом применения минеральных соосадителей является необходимость отделения определяемых микроэлементов от элемента-носителя. Преимуществом органических соосадителей является возможность удаления их из концентрата *простым озолением*, что значительно упрощает работу. Кроме того, органические соосадители позволяют проводить концентрирование микроэлементов на фоне высокого содержания макроэлементов, поэтому получаемые концентраты чище, чем при использовании неорганических или смешанных коллекторов. Спектрохимический метод определения микроэлементов в водах заключается в *предварительном концентрировании Cu, Co и Zn* при pH 6...7 осаждением в виде дитизонатов индифферентным соосадителем; после отделения осадка из фильтрата извлекают молибден соосаждением окисленным красителем Стенгауза.

При анализе грунтовых, лизиметрических, речных и озерных вод используют *атомно-абсорбционное определение группы элементов Cu, Cd, Pb, Zn* после их предварительного концентрирования соосаждением с применением органического реагента катиона С, тяжелого органического катиона – хлорида дифенилгуанидиния, индифферентного органического соосадителя – 2,4-динитроанилина. Органические соосадители могут быть растворены в подходящем растворителе с последующим их анализом пламенным атомно-абсорбционным методом.

---

<sup>25</sup> Пироллидиндитиокарбаминат аммония.



Концентрирование на металлах можно также отнести к сорбционным методам. Сущность метода сводится к следующему: проволоку из тугоплавкого металла (молибдена, вольфрама, тантала), предварительно активированного при высокой температуре, опускают в анализируемый раствор, определенное время выдерживают при перемешивании, а затем вводят в графитовый атомизатор (Wolf et al., 1981). Авторы применили этот прием для концентрирования Co, Cu, Pb, Zn из поверхностных вод.

При групповом определении микроэлементов в атмосферных осадках и грунтовых водах *используют рентгено-флуоресцентный метод*. Рекомендуется предварительно упаривать воды, сухой остаток таблетировать. В работе В.В. Добровольского (1961) водорастворимые формы микроэлементов изучали с использованием водной вытяжки при узком соотношении почвы к раствору – 1:2. Вытяжку выпаривали и в сухом остатке определяли большую группу элементов спектральным полуколичественным методом.

Атомный эмиссионный спектральный метод с индукционной плазмой быстрого определения 16 элементов в поверхностных водах предложен Томпсоном (Thompson et al., 1982). Для снижения потерь при выпаривании *в пробу добавляют активированный уголь*. Чтобы снизить мешающее влияние макроэлементов, выпаривание сочетают с экстракцией, что позволяет сконцентрировать пробу в 200 раз (Sperling, 1980).

Предложен метод *электрохимического концентрирования микроэлементов* в сочетании с атомно-абсорбционным определением, что позволяет использовать твердые электроды с выделенными на них элементами на стадии определения без дополнительных операций.

Высокий современный уровень инструментального анализа позволяет развивать прямые методы определения микроэлементов непосредственно из проб воды без концентрирования. При изучении вод Прибайкалья и Забайкалья с минерализацией до 4,0 г/л разработан прямой метод атомно-абсорбционного определения группы элементов (Cu, Pb, Mn, Zn, Au). Для получения атомных паров в пропан-воздушном пламени был применен графитовый электронагреваемый испаритель. Чувствительность метода в мкг/мл: для Pb – 0,004, Au – 0,008, Mn – 0,0004, Cu – 0,0015, Zn – 0,0002. Коэффициент вариации результатов 7...10%. Найдены оптимальные условия атомно-абсорбционного определения *цинка и кадмия* в водах с использованием пламени ацетилен-воздух и комбинированного атомизатора графитовый стержень-пламя. Элементы, образующие летучие гидриды (*мышьяк, сурьма, селен*), часто определяют методом атомно-абсорбционной спектроскопии с генерацией гидридов (Haring et al., 1982; Smith, 1981; Fic, Fuji, 1990).

Дальнейшее развитие получают не пламенные методы атомно-абсорбционного анализа. Определены следовые количества группы элементов (Pb, As, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Se, V) при использовании графитовой печи со стабилизированной температурой; пределы обнаружения – 1...0,1 мкг/л, точность определения – 10...15% (Manning,

Slavin, 1983). Для устранения влияния состава раствора при анализе с графитовой печью используют платформу Львова и матричные модификаторы (Koirtuohann, 1980). Авторы на примере определения Pb, Cr, Sn в поверхностных водах показали, что применение платформы, в особенности при одновременном введении 0,5%-й соли  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  в качестве модификатора, существенно уменьшает влияние состава.

Метод эмиссионной спектрометрии с индукционной плазмой позволяет проводить одновременное определение 24-х элементов в природных водах (Peck et al., 1979).

Предложен атомно-флуоресцентный метод определения Pb, Cu, Zn, Cd в природных водах (Л.В. Драчева, А.С. Гончаков, 1990). Метод не требует предварительного концентрирования.

Для определения меди и свинца в поверхностных водах разработан ионометрический метод. Метод использован для изучения форм миграции элементов.

Для определения микро содержаний элементов в природных водах используют кинетические методы, основа которых заключается в измерении скорости химических реакций. Скорость индикаторной реакции определяется концентрацией анализируемого вещества. Она зависит от концентрации реагирующих веществ, температуры, посторонних солей, присутствия катализаторов. Предел чувствительности кинетических методов составляет  $10^{-12} \dots 10^{-16}$  моль/л. Однако они пока не нашли широкого применения, так как при использовании большинства из них необходимо проводить сложную подготовку проб: удаление или маскирование мешающих определению компонентов.

Одной из главных методологических проблем аналитической химии является вопрос *о том, какие вещества следует считать истинно растворенными*. Авторы полагают, что растворенными следует считать вещества, которые остаются в растворе после фильтрации через мембранный ультрафильтр с диаметром пор 350...400 нм. Поверхностную воду рекомендуется фильтровать через этот ультрафильтр и концентрировать солевой остаток, используя метод вымораживания, предложенный А.В. Фотиевым (1964, 1965, 1966, 1968). Авторы нашли оптимальные условия концентрирования вымораживанием, обеспечивающие сохранение в растворе в нативной форме всех растворенных органических веществ. Предложенный способ концентрирования применим для вод высокой цветности (при коэффициенте концентрирования 10...13). Если необходимо получить сухие препараты ВОВ, авторы рекомендуют способ вымораживания сочетать со способом лиофильной сушки концентрата.

Г.М. Варшал (1974) с сотрудниками разработала две схемы препаративного фракционирования ВОВ речных вод. Хотя первая относится к **сточным водам**. Вторая рассматривает ход фракционирования ВОВ поверхностных вод. Сорбционный микрометод с использованием активированного угля БАУ предложен для оценки различных классов ВОВ,

получения их беззольных препаратов, необходимых для исследования процессов комплексообразования. В его основу положен метод W. Forsyth (1947), который основан на том, что высокозольный активированный уголь сорбирует из кислых водных растворов *фенолы, органические кислоты, кислые полисахариды, фульвокислоты*; плохо или совсем не сорбирует нейтральные и основные аминокислоты, углеводы, пуриновые основания и ряд других веществ. Предложенные схемы предусматривают отделение *гуминовых веществ коагуляцией* из солянокислых растворов, а оставшиеся в фильтрате ВОВ фракционируют с использованием микро варианта адсорбционно-хроматографического анализа на угле БАУ<sup>26</sup>. Для определения обменной емкости фульвокислот проводят исследования выделенных препаратов методами потенциометрического титрования, разделения на сефадексах и диализа через целлофановые мембраны.

Вторая схема анализа, в которой гель-хроматография использована в сочетании с целлюлозными ионитами, позволяет проводить фракционирование ВОВ по химической природе (И.С. Сироткина, Г.М. Варшал и др., 1974). Целлюлозные сорбенты наиболее пригодны для разделения сложных смесей органических веществ. Предложенная схема анализа сочетает разделение ВОВ на анионите ДЕАЕ (диэтиламиноэтилцеллюлоза), катионите СМ (карбоксиметилцеллюлоза) и на Сефадексах различных марок (G-10, G-15, G-25, G-75). Установлено, что основные классы ВОВ поверхностных вод сорбируются ионообменными целлюлозами. Ионообменные целлюлозы позволяют разделить ВОВ природных вод на три группы: кислотную, основную и нейтральную; в качестве десорбентов используют 0,1 н. раствор NaOH и 0,1 н. раствор HCl.

Хроматографическое разделение ВОВ на Сефадексах по их молекулярным массам дает возможность получения количественных данных, необходимых для изучения процессов комплексообразования. При проведении фракционирования ФК на Сефадексах обнаружено явление *обратимой и необратимой ассоциации ФК*. Это явление связано с изменением концентрации органических веществ и величины рН раствора. Экспериментально было установлено, что в интервале величин рН от 4 до 11 процесс ассоциации обратим. По мнению авторов, он осуществляется за счет водородных связей и определяется процессами диссоциации карбоксильных групп и фенольных гидроксидов ФК (Г.М. Варшал и др., 1975).

При использовании разработанных схем системного фракционного анализа ФК природных вод изучены особенности их взаимодействия с ионами металлов (Г.М. Варшал и др., 1979). В соответствии с характером взаимодействия этими авторами выделены три группы ионов металлов:

---

<sup>26</sup> **Активированный уголь БАУ** можно использовать только для сорбции ВОВ. При их фракционировании нужно применять **низкозольный активированный уголь «карболен»**, чтобы избежать мобилизации из высокозольного угля в раствор части зольных элементов, а они увеличивают долю ФК в составе ВОВ.

1) не гидролизующиеся ионы (Ca, Mg, Na и др.), образующие с ФК растворимые комплексные соединения в широком диапазоне щелочно-кислотных условий;

2) легко гидролизующиеся ионы (Au, Cu, Pb, Fe и др.), благодаря их комплексообразованию с ФК, растворимость этих элементов, а следовательно, и миграционная способность возрастают на 2...3 порядка; растворимые и устойчивые комплексы металлов образуются в результате реакции с ассоциированными формами фульвокислот;

3) ионы редкоземельных элементов образуют с ФК нерастворимые и растворимые комплексные соединения в зависимости от условий их образования.

Установлено, что в составе поверхностных вод доминируют высокомолекулярные гидрофильные гумусовые соединения, склонные к ассоциации и образованию полидисперсных систем с ионами металлов Fe, Ca, Al в диапазоне молекулярных масс от 300 до 60 000 дальтон. Взаимодействие ионов металлов с фульвокислотами сопровождается образованием ряда растворимых катионных, анионных и нейтральных комплексных соединений, а также нерастворимых форм. Характер образующихся соединений определяется прежде всего природой иона металла, *степенью дисперсности фульвокислот* в растворе, значением pH раствора и рядом других факторов. Изучение одновременно существующих форм металлов в природных водах имеет большое теоретическое и практическое значение. Состояние металлов в природных водах определяется в основном двумя процессами: гидролизом и комплексообразованием (Г.М. Варшал и др., 1972; А.И. Карпухин, 1984; А.И. Карпухин, И.М. Яшин, В.А. Черников, 1991). С использованием разнообразных методов проведено изучение форм миграции кальция и установлено, что в высокоцветных речных водах кальций находится преимущественно в виде анионных комплексов с ВОВ; этот эффект также наблюдал И.М. Яшин (1993) при изучении процессов трансформации известковых мелиорантов в подзолистых почвах подзон южной и средней тайги методом сорбционных лизиметров.

В перечень обязательных параметров оценки загрязнения речных вод включаются следующие *гидрохимические показатели*: бихроматная окисляемость (ХПК); биохимическая окисляемость ВОВ - БПК; растворенный кислород; поверхностно-активные вещества (ПАВ); ионы аммония; нефтепродукты; общая минерализация воды и ряд других.

Для оценки загрязненности реки, водосбор, который имеет большую залесенность и заболоченность, следует особо подходить к использованию таких показателей, как *перманганатная окисляемость воды, химически поглощенный  $O_2$  (ХПК) и фенолы*. Это объясняется высоким содержанием в речной воде ВОВ нативного генезиса, вследствие их вымывания из подзолов, вегетативных органов растений, лесной подстилки и торфов. Экологическая опасность здесь может заключаться в формировании новых токсичных *хлорорганических соединений*. Необходимо использовать

значения так называемых приведенных концентраций  $S_{\text{прив}}$ , характеризующих превышение загрязнителей над естественным фонов  $S_{\text{ф}}$  (т.е.  $S_{\text{прив}} = S_i - S_{\text{ф}}$ ). *Какие поверхностные воды считать в качестве фона в зоне тайги пока не ясно.*

Загрязнение поверхностных вод, в частности бассейна Северной Двины во многом обусловлено сбросом сточных вод предприятиями *целлюлозно-бумажной промышленности*. Основным ингредиентом состава сточных вод *сульфатного производства целлюлозы является лигносульфонаты и таловое масло, скипидар. Это трудно окисляемые соединения, и после биологической очистки их концентрация изменяется незначительно.*

Как известно, технологический процесс получения сульфатной целлюлозы сопровождается образованием  $\text{H}_2\text{S}$  и **метилсернистых соединений**, которые придают сточным водам устойчиво неприятный и специфический запах. В значительных количествах в сточных водах ЦБК *содержатся также скипидар, жирные и смоляные кислоты (таловое масло) и их соли (сульфатное мыло). Присутствие этих веществ в речной воде нарушает естественные процессы развития микрофлоры, снижает содержание растворенного кислорода, тормозит процессы нитрификации.* для оценки степени загрязнения речного бассейна сточными водами указанного выше производства в качестве репрезентативных показателей *рекомендуется водорастворимый сульфатный лигнин, скипидар, смоляные и жирные кислоты и метилсернистые соединения (Экология..., 1998).*

В качестве репрезентативных показателей состава бытовых сточных вод *рекомендуется выделять: взвешенные вещества, сухой остаток, БПК, ХПК, перманганатную окисляемость и минеральный азот, нефтепродукты, фенол, ионы тяжелых металлов.* Следует иметь в виду, что при оценке данного вида загрязнения поверхностных вод решающее значение приобретает не столько выделение самих специфических компонентов состава, сколько количественная оценка их соотношений. Например, рассчитанные соотношения  $\text{БПК}_5/\text{О}_{\text{KMnO}_4}$ ,  $\text{ВПК}_5/\text{ХПК}$ ,  $\text{О}_{\text{KMnO}_4}/\text{ХПК}$  для неочищенных сточных вод соответственно равны 3,3; 0,45 и 0,14. Используются такие соотношения для характеристики изменения качества воды в результате загрязнения бытовыми сточными водами или для оценки эффективности работы вводимых *очистных сооружений* и других мер по охране вод от загрязнения (К.Г. Боголицын и др., 1996, 1998).

Применяемый до настоящего времени способ оценки качества воды основан на сопоставлении результатов определения в отдельных точках объекта *химического состава, физических и бактериологических характеристик поверхностных вод с соответствующими нормативными показателями ее качества (предельно допустимыми концентрациями — ПДК): «Нормативные данные по предельно допустимым уровням загрязнения вредными веществами объектов окружающей среды» - Справочный материал. СПб. Научно-технический центр «АМЕКОС» АО «Буревестник». 1993.*

**Основное требование к качеству воды** может быть представлено в виде условия:

$$S_i \leq \text{ПДК}_i \quad (60),$$

где  $S_i$  — концентрация лимитируемого вещества (мг/л);

$\text{ПДК}_i$  — предельно допустимая концентрация того же вещества в воде (мг/л).

В списках утвержденных ПДК все химические вещества, оказывающие вредное действие на здоровье человека, *санитарное состояние и рыбную продуктивность водных объектов*, подразделяются на группы по так называемому лимитирующему признаку вредности (ЛПВ). При гигиеническом нормировании качества воды выделяются три группы загрязняющих веществ:

- санитарно-токсикологического,
- обще санитарного,
- органолептического действия.

При рыбохозяйственном нормировании дополнительно выделяются еще две группы веществ: *токсикологического и рыбохозяйственного действия*. В соответствии с этим С.Н. Черкинский (1977) ввел в практику гигиенического нормирования качества воды принцип учета *аддитивного действия* загрязняющих веществ, основанный на том, что все вещества, относящиеся к одинаковым по ЛПВ группам, оказывают суммарное воздействие. Например, суммарное воздействие десяти веществ одного ЛПВ, каждое из которых имеет предельно допустимую для него концентрацию, будет таким же, как если бы любое из этих веществ, присутствуя в единственном числе, имело бы концентрацию, равную десяти ПДК.

В существующих нормативах указано, что при поступлении в водные объекты нескольких веществ с одинаковым ЛПВ сумма отношений концентрации каждого из этих веществ ( $S_1, S_2, \dots, S_n$ ) к соответствующим ПДК ( $\text{ПДК}_1, \text{ПДК}_2, \dots, \text{ПДК}_n$ ) не должна превышать единицы, т.е.

$$\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{\text{ПДК}_i} \leq 1 \quad (61).$$

Отсюда норматив содержания конкретного загрязнителя  $i$  (в случае, если в воде присутствует  $n$  веществ), аналогичного  $i$ -му веществу лимитирующего показателя вредности, будет иметь вид:

$$S_i = \text{ПДК}_i \left( 1 - \sum_{i=1}^{n-1} \frac{S_{n-1}}{\text{ПДК}_{n-1}} \right) \quad (62).$$

Следует подчеркнуть, что *при оценке качества поверхностных вод* необходимо учитывать все содержащиеся в водах вещества, лимитируемые по токсичности.

По мнению И.Д. Родзиллера (1984) ПДК надо оставить роль исходного критерия, сопоставлять же качество воды следует с некоторой нормативной концентрацией  $S_{\text{норм}}$ , устанавливаемой в каждом случае в зависимости от конкретных ландшафтных условий.

Концентрация (точнее масса:  $C \cdot V$  – И.Я.) загрязнителя зависит от гидрологического режима реки:

$$g = S_i (Q_i/Q_p), \quad (63)$$

где:  $Q_i$  – расход воды в речном створе на момент отбора пробы воды ( $m^3$ );

$Q_p$  – расчётный расход речной воды ( $m^3$ ).

$S_i$  – концентрация загрязнителей (мг/л).

В.В. Мороков (1987) предложил рассчитывать коэффициент загрязнения речной воды по выражению:

$$K_{\text{загр}} = Q_i/Q_p \left[ \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{\Pi D_i} \right]_{K_m} \text{, где } \partial \sum e S_i / \sum \Pi D_i \text{ – максимальная сумма отношений (из 5 групп ЛПВ) концентраций загрязнителей} \quad (64).$$

Общая нагрузка загрязнителей может быть выражена средней концентрацией  $S_n$  изучаемого загрязнителя по известной в гидрологии формуле:

$$S_n = \frac{Q_{cm} \cdot S_{cm} + S_c(Q_c - Q_{cm})}{Q_c}, \text{ где } Q_c \text{ и } Q_c - \text{соответственно расход воды и концентрация загрязнителя в реке выше сброса сточных вод} \quad (65);$$

$Q_{ct}$  и  $S_{ct}$  – расход сточных вод и концентрация того же загрязнителя ниже сброса сточных вод.

Предприняты попытки введения интегральных показателей оценки загрязнённости природных вод. Так, А.С. Шайн (1984) предложил обобщенный индекс  $J$ , который учитывает 27 показателей:

$$J = J_{oc} \cdot \sigma(J_{пр}) \cdot \varepsilon \quad (66),$$

где:  $J_{oc}$  – общесанитарный индекс,  $\sigma(J_{пр})$  – функция от индекса примесей,  $\varepsilon$  – функция, выражающая недоучёт в воде тех или иных загрязнителей.

**Индекс примесей  $J_{пр}$**  определяется по 3 частным индексам:

- индексу по металлам  $J_m$  (включая 11 металлов),
- индексу токсичных веществ  $J_t$  (для 6 групп веществ) и
- $J_z$  – индексу загрязнителей, к которым относятся нефтепродукты, фенолы и иные экотоксиканты.

Оценка современной экологической ситуации в бассейне реки Сев. Двины, в частности, должна включать определение степени и характера загрязнения также и донных отложений, особенно в устьевой зоне реки, впадающей в морской бассейн. Здесь транспортируемые речным водным потоком ВОВ, продукты эрозионного смыва и почвообразования, вещества-загрязнители вступают в физико-химический контакт с солевыми растворами – морской водой. Наблюдается активное образование и коагуляция коллоидных систем **Si, Fe, Mn, Al**, являющимися сорбентами с очень развитой удельной поверхностью раздела фаз. Поэтому донные



осадки дельты р. Сев. Двины (как и нижние слои аллювиальных почв островной поймы реки) обогащены в той или иной мере экотоксикантами.

Участок устьевой дельты р. Сев. Двины является седиментационной ловушкой для веществ-мигрантов. Эффективность «работы» такого маргинального фильтра весьма впечатляющая: концентрация взвесей до и после данного гидрогеохимического барьера изменяется с 340-510 мг/г до 0,8-2,9 мг/л (и меньше). В морской бассейн удаётся проникнуть только низкомолекулярным «устойчивым органоминеральным соединениям Fe, Al... и ВОВ их ионам и молекулам — истинно растворимым формам веществ. С эколого-геохимической точки зрения важно понять механизм естественного самоочищения вод реки на устьевом взморье во время морских приливов и «морян.» По мнению А.П. Лисицина (2002) на гидрогеохимическом двустороннем и комплексном барьере в устье р.Сев. Двины возникает не только сезонная «иловая пробка», где задерживается более 90% взвесей, но и «биологическая пробка», располагающаяся на внешней стороне барьера от «иловой». Именно на гидробиогенном барьере растворимые формы ГС и элементы питания превращаются во взвесь — органическое вещество фитопланктона. Последний играет очень важную роль, поскольку через него растворимые формы мигрантов переводятся в донные илистые осадки — флоккулы. Фитопланктон является бионасосом 1-го рода и пищевой основой для зоопланктона, который выполняет масштабную биофильтрацию веществ.

Так, рачки-фильтраторы размером 1-3 мм — по мнению автора — весь объем воды в эстуариях рек Оби и Енисея отфильтровывают за 1,5 суток. Это бионасос 2-го рода. Примечательно, что фильтраторы планктона не только отделяют тонкодисперсные взвеси из воды, но и преобразуют, концентрируя их в крупные новообразования — **пеллеты**. Коллоидные системы Fe, Si, Al, Mn в принципе это своеобразные микрослоистые органоминеральные соединения. **Пеллетный поток** (биогенное осаждение тонкодисперсных минеральных взвесей и ВОВ) имеет большую пищевую ценность, являясь питательными гранулами для рыб и зоопланктона осенью и зимой.

Фильтраторы бентоса образуют особые трофические (пищевые) цепи в экстуариях рек, впадающих в морской бассейн. Именно здесь зафиксированы **с помощью методов седиментационных ловушек** и планктонных сеток максимальные величины их биомассы. С учетом геологического масштаба времени подобные зоны седиментации в устьях рек (привнос и захоронение) органических веществ (растворимые и взвешенные формы) с учетом массы веществ самого эстуария: фитопланктона, зоопланктона, бентоса и макрофитов — представляют несомненный интерес для обоснования более полной модели формирования залежей нефти, газа, угля — каустобиолитов.

В устьях северных рек и на морском арктическом шельфе мощность коры выветривания составляет первые километры, а на территории континентов — несколько десятков километров. Поэтому пеллеты при

прогибании осадочного бассейна (в частности, под тяжестью ледниковых полей) быстро попадают в благоприятные термобарические условия зон нефти— и газообразования. В этих зонах наблюдаются главные по масштабам современные (для четвертичного периода) процессы геохимической седиментации и трансформации глобального цикла органического углерода. Одновременно на рассматриваемом *комплексном геохимическом барьере миграции* происходит накопление ТМ (при развитии сульфидного барьера), а также **Sr, Ba, радионуклидов**. Однако эти химические элементы «разбавляются» огромным количеством тонкодисперсного терригенного осадочного вещества.

Подтверждением указанных выше положений является открытие в 90-х годах 20-го века *на шельфе Белого и Баренцева морей* крупного месторождения нефти с запасом порядка 100 млрд. т. (Экология Северной Двины, 1998).

Экологическая ситуация **в речных водах Москвы-реки**, протекающей через столичный мегаполис, по-видимому, иная. Рассмотрим ее.

### **Пространственно-временное загрязнение вод Москвы-реки в пределах столичного мегаполиса\***

Поверхностные воды Москвы-реки были изучены в период 2010-2014 гг. *до мегаполиса, в центре и за пределами города Москвы*. Площадь бассейна Москва-реки составляет 17640 км<sup>2</sup>. В верхнем течении ширина реки изменяется от 2 до 10 м, в черте российской столицы она составляет примерно 100 м, а в устье - 150 м. От истока к устью увеличивается и глубина реки: около Звенигорода она составляет 1,5 м, а в устье - 5 м. Протекая по равнинным ландшафтам южной тайги, в Москва-реку впадает ряд крупных притоков (Руза, Истра, Пахра, Северка и другие), вода которых в той или иной мере уже загрязненная. Водохранилища руслового типа, сооруженные на реке, играют исключительно важную роль в снабжении города Москвы водой. Так, в 1959 году, недалеко от Можайска, было создано *Можайское водохранилище*, имеющее ширину 1-3 км и глубину 5-10 м. В 1966 году было создано *Рузское водохранилище*. Его площадь достигает 3270 га, длина - 36 км, ширина 0,5 - 2 км, а глубина водохранилища в среднем достигает 6-7 метров. *Озернинское водохранилище* также предназначено для водоснабжения столицы. Его площадь составляет 2300 га, длина 29 км, ширина местами достигает 3 км. На территории этого водохранилища оборудовано множество лодочных станций. *Истринское водохранилище* было создано в 1935 году; длина - 28 км, площадь - 3360 га, средняя глубина водохранилища - 6 м.

Методы исследований. Отбор проб воды проводили согласно ГОСТ. Катионы железа, меди, марганца, аммония, нитритные анионы в речных водах определяли с помощью фотоэлектроколориметрического метода, на приборе КФК-3; БПК по методу Винклера; фенолы - флюориметрическим методом на Флюорате 02-3М; нефтепродукты - ИК-спектрометрическим

методом, на приборе КН-2; цинк - вольтамперометрическим методом; рН – <sup>27</sup>потенциометрически. Были использованы методы в соответствии с ГОСТ в сертифицированной лаборатории. Результаты анализов вод апробированы с помощью метода вариационной статистики.

<sup>27</sup>Установлено, что 83 км Москвы-реки (из общих 478 км), которые проходят в столице, успевают масштабно загрязниться промышленными стоками, что сказывается на ее неблагоприятном экологическом состоянии и качестве воды. Обстановку обостряют *Курьяновская и Люберецкая станции аэрации*, расположенные на «выходе» из города. Эти станции из-за устаревшего оборудования не справляются с очисткой воды.



Рис.51. Слева – исток Москвы-реки из верхового болота в Подмоскowie; справа – одна из подземных галерей, в которые упрятаны многие реки в мегаполисе.

Почему так происходит? В известной мере, это связано со следующими социально-экономическими факторами. В последние 70 лет мощная антропогенная нагрузка на подмосковные *малые реки* возросла особенно сильно, поскольку в 1918-1923 гг. промышленными рубками были охвачены массивы лесов в 30-ти верстной зоне вокруг столицы. За годы Отечественной войны Подмоскowie потеряло еще пятую часть площади своих лесов. Все эти масштабные процессы уменьшили водоносность рек и увеличили их загрязнение тонкодисперсными частицами, органическими веществами и тяжелыми металлами. Большое отрицательное воздействие на реки столичного региона оказала также *разработка и массовое осушение болот в Тверской, Московской и Владимирской областях*. Последствия этих масштабных мероприятий остро ощущаются до сих пор: бассейн реки Волга существенно обмелел, торфяники горят, что весьма негативно сказывается и на прилегающих аграрных ландшафтах и подземных водах.

*Мощное негативное воздействие на малые реки в черте города оказало градостроительство*. Около 90 малых рек Москвы заключены в подземные галереи и трубы (рис.51), а общая протяженность всех 150 подземных и наземных малых рек достигает 400 км. Воды рек подвержены в столице техногенному воздействию промышленности (сточные воды), водного и

<sup>27</sup> Аналитические результаты по загрязнению вод получены соискателем И.Е. Гареевой.

автотранспорта, антигололедных реагентов. На малые реки в Подмосковье, в частности, влияют значительная распаханность ландшафтов (53-64%), «чистые пары» и животноводческие комплексы. Они приводят к эрозии почвенного покрова и загрязнению вод родников, ручьев, прудов и озер. За последние годы в Москве было засыпано *более ста прудов* с площадью зеркала около 170 га. На их месте построены здания, проложены улицы, почвы которых «запакованы» асфальтом. Летом, при температуре более 30<sup>0</sup>С, из асфальта в воздух активно выделяются *бенз(а)пирен, фенол, формальдегид и иные токсиканты*. Таким образом, видна недооценка значения небольших водоемов в создании ландшафтно-архитектурного облика столицы и обустройстве комфортных зон отдыха для людей (кроме известных лесопарков – Лесной опытной дачи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; Измайловского, парка Лосинный остров и др.).

Воды малых рек (Яузы, Сходни...) заметно загрязняют акваторию Москвы-реки в черте города. Например, в воде реки Яуза, как одном из самых загрязненных притоков, концентрация *нефтепродуктов, железа и аммония превышают нормативы в пятьдесят-сто раз* (рис. 4-10). Ниже впадения Яузы в Москву-реку качество воды резко ухудшается: в 3 раза повышается содержание *нефтепродуктов*, на порядок – бактериальное загрязнение, в шесть-восемь раз – содержание взвешенных веществ. Поэтому воды Москвы-реки ниже города *не могут быть использованы ни для хозяйственно-бытовых, ни для рекреационных целей*. Кроме того, промышленными предприятиями столицы ежесекундно сбрасывается более 73 м<sup>3</sup> плохо очищенных промышленных стоков – столько же, сколько выносит и Москва-река при выходе из столицы.

Косвенным показателем низкого экологического качества воды в Москве-реке являются величины концентрации ионов водорода – рН (рис. 52). При

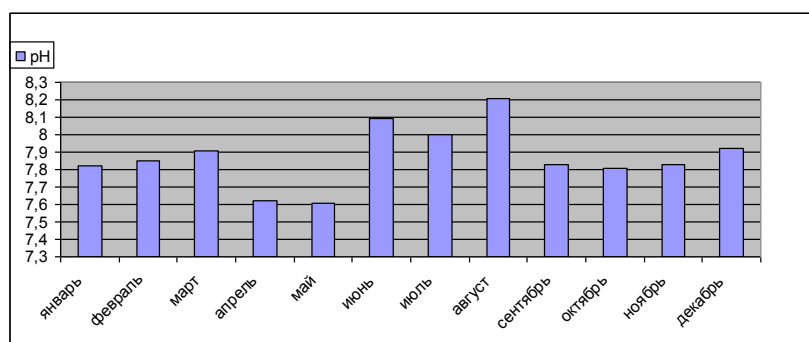
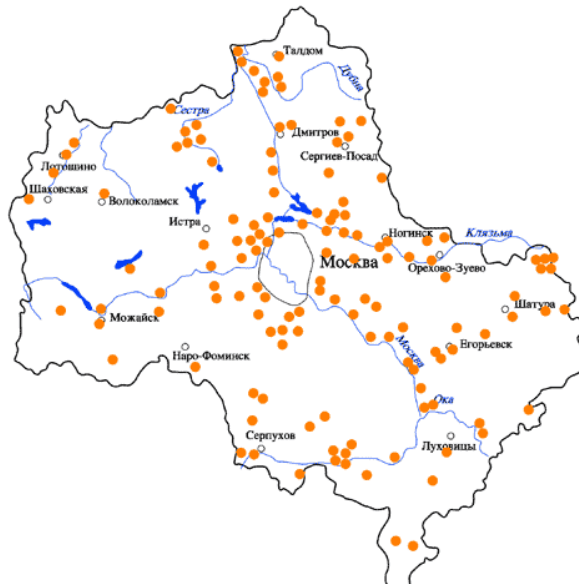


Рис. 52. Сезонная динамика *средних значений рН* воды в Москва-реке за 2010-2013 гг.

Косвенным показателем низкого экологического качества воды в Москве-реке являются величины концентрации ионов водорода – рН (рис. 52). При норме рН 6,8-7,6 величины рН сдвинуты в слабощелочной интервал, в частности, в летний сезон. Очевидно, вследствие сброса синтетических поверхностно-активных веществ (СПАВ) - моющих средств, содержащих фосфор. Визуально это проявляется в наличии пены на поверхности воды. Отметим еще один важный нюанс. Анализ картосхемы, где расположены

места свалок в Подмоскowie, показывает, что их большинство (почти 80%) расположено в поймах малых рек и в придолинных ландшафтах (рис.53). Это приводит к масштабному химическому загрязнению плодородных аллювиальных почв (и овощной продукции) и поверхностных вод. Непонятно одно: кто же контролирует эту опасную экологическую ситуацию в Подмоскowie, и почему так происходит? Ведь свалки должны располагаться на плакорах увалов, на мощных суглинистых породах, а не в поймах рек.



Основные известные свалки на территории Московской области.

Ежегодно в области образуется 6 млн. куб. м бытовых отходов и свыше 1,4 млн. куб. м промышленных отходов. Кроме того, из Москвы в область вывозится свыше 9 млн. куб. м бытовых и 1 млн. тонн промышленных отходов, включая 55 тыс. тонн токсичных.

По: Состояние окружающей среды Московской области в 1994 году, 1995.

Рис.53. Большинство свалок в Подмоскowie незаконно размещено в поймах рек: это приводит к активному химическому загрязнению плодородных аллювиальных почв (и растениеводческой продукции), а также грунтовых и речных вод (к 2013 году эта ситуация не изменилась).

При значительном и продолжительном загрязнении сточными водами в воде Москвы-реки заметно изменяются процессы жизнедеятельности водных организмов (гидробионтов и рыбы), большая часть растворенного в воде кислорода расходуется на окисление органических веществ (включая и СПАВы): водоток реки превращается, образно говоря, в «канализационный коллектор», ухудшая эстетический облик столичной реки. Прогулки людей на катерах и пассажирских судах утрачивают былую привлекательность.

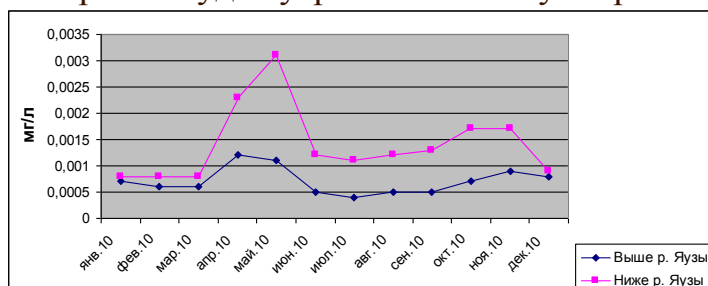


Рис. 54. Концентрация фенолов в контрольных створах р. Москвы в пределах г. Москвы в 2010 г.

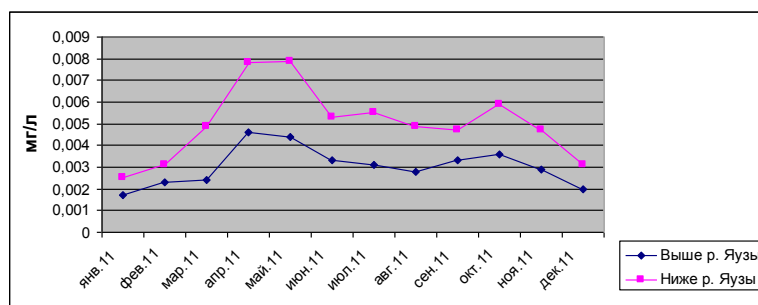


Рис. 55. Концентрация фенолов в контрольных створах р. Москвы в пределах г. Москвы в 2011 г.

Качество воды в Москве-реке в пределах города и ниже по течению – низкое. Это обусловлено тем, что соотношение *сточных и природных вод* близко к 2:1 (то есть сточных вод больше, чем природных). После очистки сточные воды *не удовлетворяют требованиям* по содержанию органических веществ, нефтепродуктов, ионов аммония и тяжёлых металлов.

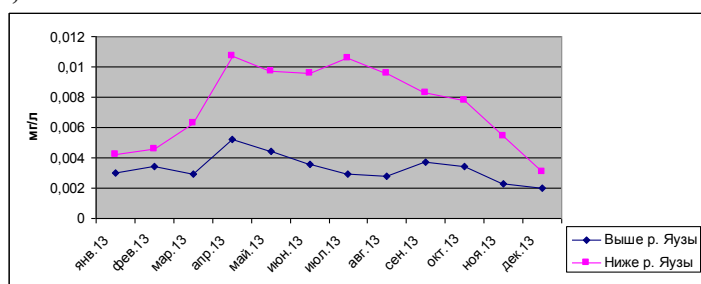


Рис. 56. Концентрация фенолов в контрольных створах р. Москвы в пределах г. Москвы в 2013 г.

*Фенолы* могут быть продуктами разложения нефтепродуктов (их низкокипящих фракций), а также гумусовых веществ почвы (рис. 54-56). Наибольшую опасность представляют эти *соединения с хлором*. При этом могут образовываться и *диоксинподобные вещества* – суперэкоотоксиканты. Поэтому хлорирование вод при их водоподготовке в настоящее время не проводят. Наиболее загрязненными являются участки реки около районов Нагатино, Марьино и Капотня. В черте города Москвы выделяются **три участка** с разной степенью химического загрязнения речных вод:

1-й - от входа в город до Крымского моста (участок традиционно является наиболее экологически безопасным);

2-й - центральная часть города в пределах *Садового кольца*, где качество воды по нефтепродуктам и металлам заметно колеблется как в течение года, так и вдоль реки, здесь оно низкое;

3-й - участок нижнего течения реки, где Курьяновская станция аэрации приводит к увеличению концентрации биогенных элементов (аммония, нитритов, фосфатов), а также нефтепродуктов *часто заметно выше значений ПДК*. Однако параметр ПДК ориентировочный: неясно *о какой воде идет речь?* Требуется унификация данного параметра. Методология экологической оценки загрязнения поверхностных вод разработана неполно и требует *экспериментального обоснования*.

Концентрация *ионов железа* в воде Москвы-реки приведена на графиках 57,58.



Наличие соединений железа в поверхностных водах свидетельствует о процессах деградации гумусовых веществ почв и эрозии почвенного покрова.

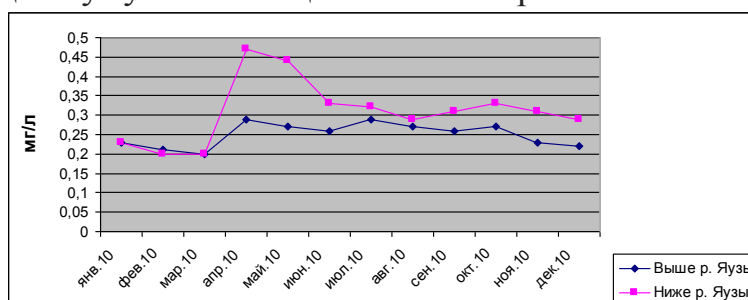


Рис.57. Концентрация ионов Fe(III) в контрольных створах р. Москвы в пределах г. Москвы в 2010 году.

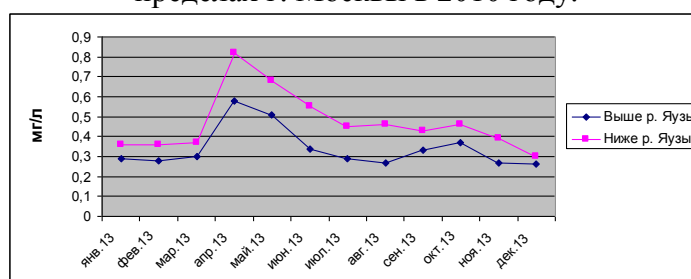


Рис. 58. Концентрация ионов Fe(III) в контрольных створах р. Москвы в пределах г. Москвы в 2013 г.

Динамика концентраций соединений железа в воде Москвы-реки указывает на устойчивый *аккумулятивный тренд* данного химического элемента: ситуация в ландшафтах, окружающих речные бассейны рек, постепенно ухудшается. Это связано также с пожарами, рубками леса и незащищенностью почв биотой.

Концентрация ионов аммония в речных водах приведена на рис. 59,60. Загрязнение поверхностных вод Москвы-реки ионами аммония устойчивое. Оно связано как с неочищенными стоками (ниже Курьяновской станции аэрации - КСА), так и со смывом удобрений с полей в местные базисы эрозии

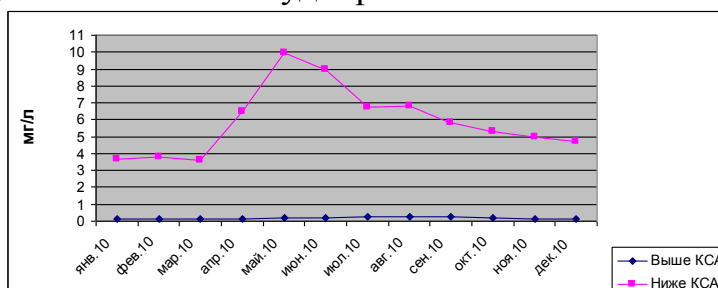


Рис. 59. Концентрация аммонийного азота в контрольных створах р. Москвы в пределах г. Москвы в 2010 г.

при их нерациональном внесении. Динамика концентрации ионов аммония в речных водах *имеет благоприятный тренд*: в сравнении с 2010 г., когда в воде диагностировалось 10,3 мг/л ионов  $\text{NH}_4^+$ , в 2013 г. отмечено только 2,6 мг/л ионов аммония.

Сезонная динамика биологического потребления кислорода (**БПК**) имеет два *выраженных максимума*: весной, т.е. в период наиболее интенсивного



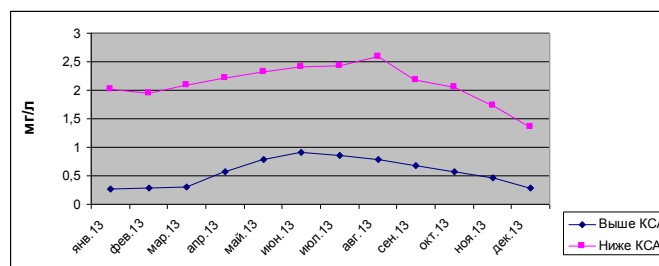


Рис. 60. Концентрация аммонийного азота в контрольных створах р. Москвы в пределах г. Москвы в 2013 г.

поступления талых вод и осенью, в период активного выпадения атмосферных осадков и поступления их в реки (рис. 60,61).

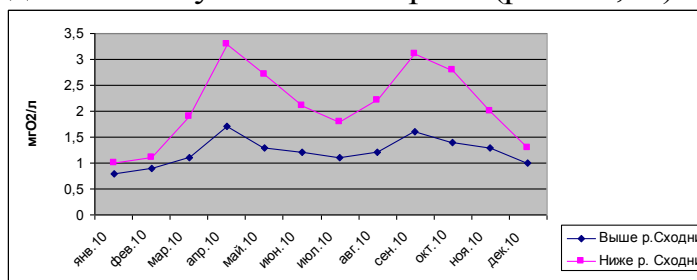


Рис.61. Изменение концентрации биологического потребления кислорода в контрольных створах р. Москвы в пределах г. Москвы в 2010 г.

При этом в 2013 году отмечен сдвиг БПК в осенний период, что обусловлено спецификой водного баланса ландшафтов и почв (и выпадением осадков).

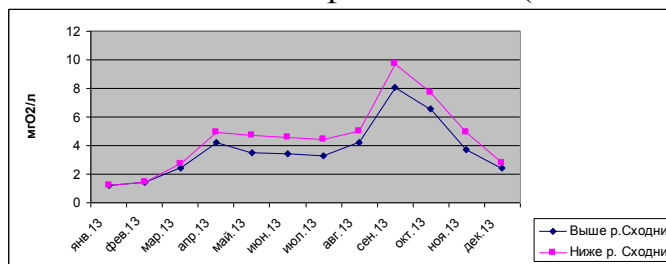


Рис.62. Изменение концентрации биологического потребления кислорода в контрольных створах р. Москвы в пределах г. Москвы в 2013 г.

Максимальные количества нефтепродуктов в речных водах наблюдались ежегодно в период *весеннего половодья* и *в осеннюю межень*. По-видимому, сбросы нефтепродуктов попадают в Москву-реку преимущественно с поверхностными водами и плохо очищенными стоками (рис. 63-67). Так, в воде р. Сходня концентрация нефтепродуктов варьировала в сезонном и годовом циклах в пределах 0,24-0,43 мг/л с заметным уменьшением концентрации экотоксиканта в 2012 году – 0,15 мг/л. *Наиболее активное загрязнение Москвы-реки вызывают воды реки Яузы*. До впадения этой реки концентрация нефтепродуктов в воде заметно меньше, чем ниже по течению. Нефтепродукты способствуют формированию на поверхности водоема очень *тонкой «радужной» пленки* (такие пятна нередки на воде), которая резко уменьшает кислородный обмен на границе воздух – вода. Поэтому часто

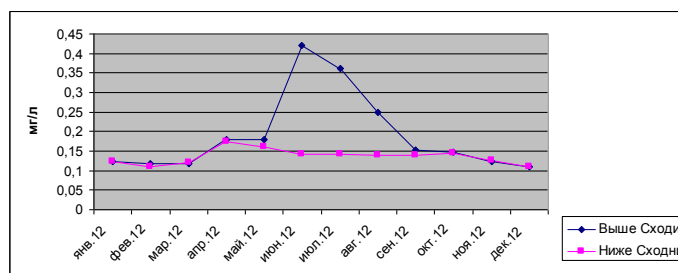


Рис.63. Концентрация нефтепродуктов в контрольных створах р. Москвы в пределах г. Москвы в 2012 г.

ощущается дефицит кислорода в воде, опасный для биоты – рыбы, рачков.

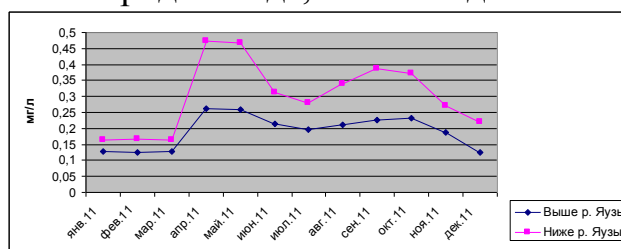


Рис.64. Концентрация нефтепродуктов в контрольных створах р. Москвы в пределах г. Москвы в 2011 г.

*Нефтепродукты*, попавшие в речные воды, содержат различные классы органических веществ, отличающихся по токсичности, устойчивости к осаждению и способности к дальней водной миграции. Наиболее опасными для биоты являются *легко летучие фракции нефти*. Тяжелые компоненты

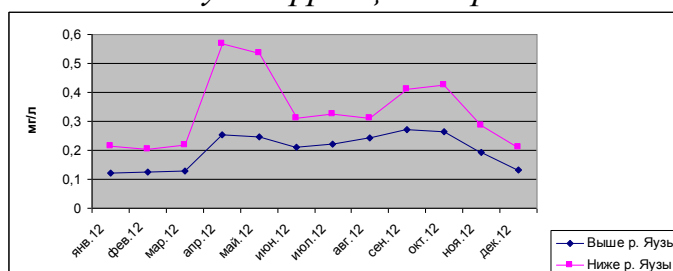


Рис.65. Концентрация нефтепродуктов в контрольных створах р. Москвы в пределах г. Москвы в 2013 г.

нефтепродуктов довольно быстро осаждаются, образуя на дне реки черные вязкие сгустки. Постепенно вещества сгустков (смолы, воск, гудрон и иные ароматические вещества гидрофобного характера) трансформируются, загрязняя воду и донные осадки. Их экотоксическое действие пролонгированное. Данные вещества весьма негативно влияют на жизнедеятельность рачков-фильтраторов воды и иных гидробионтов. Очистка речной воды гидробионтами заметно ухудшается. Получается *двойное негативное воздействие нефтепродуктов* на качество воды и биоту: сверху образуется пленка поверхностно-активных веществ, затрудняющих воздухообмен, а снизу – в донных осадках - накапливаются гидрофобные органические вещества (экотоксиканты) пролонгированного действия (табл. 1). Притоки Москвы-реки загрязнены многими химическими элементами. Результаты опытов, приведенные в таблице 29 указывают на активную динамику гидрохимического состава вод Москвы-реки в пределах изучаемых створов. Это связано с турбулентностью водных потоков. Причем наряду с экотоксикантами в речные воды *сбрасываются «залповые» стоки, имеющие*

Табл.29 Концентрации растворимых веществ (мг/л) в притоках Москвы-реки за 1-3 кв. 2014 г.(данные И.Е. Гареевой).

| Анализируемые вещества и (х.э.) | Исследуемые створы притоков Москвы-реки |             |             |               |             |             |             |             |             |             |             |
|---------------------------------|---|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                                 | ниже п. Рублево                         |             |             | Спасский мост |             |             | ниже Сходни |             |             | выше Сетуни |             |
| NH <sup>4+</sup>                | 0,13                                    | 0,18        | 0,16        | <b>0,33</b>   | <b>0,27</b> | 0,35        | 0,21        | 0,22        | 0,2         | 0,21        | 0,22        |
| NO <sup>2-</sup>                | 0,09*                                   | 0,12        | 0,09        | 0,12          | 0,13        | 0,07        | 0,08        | 0,24        | 0,14        | 0,09        | 0,24        |
| NO <sup>3-</sup>                | <b>1,8</b>                              | <b>3,3</b>  | <b>3,3</b>  | <b>1,3</b>    | <b>4</b>    | 0,89        | <b>4</b>    | <b>2,1</b>  | <b>1,3</b>  | <b>1,3</b>  | <b>2,1</b>  |
| Fe                              | 0,1                                     | 0,11        | 0,08        |               | 0,14        | 0,09        |             | 0,23        | 0,11        |             | 0,23        |
| Mn                              |   | 0,06        | 0,04        |               | 0,05        | 0,04        |             | 0,06        | 0,04        |             | 0,06        |
| Cu                              |   | 0,001       | 0,003       |               | 0,001       | 0,003       |             | 0,003       | 0,003       |             | 0,003       |
| Zn                              |   | 0,005       | 0,005       |               | 0,005       | 0,005       |             | 0,006       | 0,005       |             | 0,006       |
| Ni                              |   | 0,001       | 0,001       |               | 0,001       | 0,001       |             | 0,001       | 0,001       |             | 0,001       |
| Pb                              |   | 0,001       | 0,001       |               | 0,001       | 0,001       |             | 0,001       | 0,001       |             | 0,001       |
| Co                              |   | 0,001       | 0,001       |               | 0,001       | 0,001       |             | 0,001       | 0,001       |             | 0,001       |
| Al                              | 0,04                                    | 0,08        | 0,07        |               | 0,08        | 0,05        |             | 0,15        | 0,09        |             | 0,15        |
| Фенол                           | 0,003                                   | 0,005       | 0,009       | 0,003         | 0,005       | 0,01        | 0,002       | 0,006       | 0,009       | 0,003       | 0,006       |
| Формальдегид                    | 0,05                                    | 0,02        | 0,02        | 0,048         | 0,02        | 0,02        | 0,022       | 0,02        | 0,02        | 0,02        | 0,02        |
| Ан. ПАВ                         | 0,03                                    | 0,03        | 0,02        | 0,03          | 0,03        | 0,03        | 0,03        | 0,03        | 0,03        | 0,03        | 0,03        |
| S-                              | 0,003                                   | 0,002       | 0,002       | 0,005         | 0,002       | 0,003       | 0,004       | 0,002       | 0,004       | 0,002       | 0,002       |
| As                              |   | 0,008       | 0,005       |               | 0,005       | 0,005       |             | 0,005       | 0,005       |             | 0,005       |
| Cr                              |   | 0,001       | 0,001       |               | 0,001       | 0,001       |             | 0,001       | 0,001       |             | 0,001       |
| Ca                              |   | <b>52,1</b> | <b>59,1</b> |               | <b>50,3</b> | <b>58,6</b> |             | 40,4        | 53,7        |             | 40,4        |
| Mg                              |   | <b>13,5</b> | <b>17,1</b> |               | <b>13,9</b> | <b>17,2</b> |             | 11          | 16          |             | 11          |
| K                               |   | <b>2,6</b>  | <b>3,09</b> |               | <b>2,7</b>  | <b>3,27</b> |             | <b>2,6</b>  | <b>3,17</b> |             | <b>2,6</b>  |
| Cr <sup>6+</sup>                | 0,01                                    | 0,01        | 0,01        | 0,01          | 0,01        | 0,01        | 0,01        | 0,01        | 0,01        | 0,01        | 0,01        |
| t° C                            | <b>23,4</b>                             | <b>18,9</b> | 14,1        | <b>23,1</b>   | 19,8        | 15,2        | <b>22,3</b> | <b>25,0</b> | 15,5        | <b>27,3</b> | <b>25,0</b> |
| F-                              | 0,28                                    | 0,12        | <b>1,3</b>  | <b>0,36</b>   | 0,3         | 0,3         | 0,26        | 0,46        | 0,35        | 0,1         | 0,46        |
| Na                              |   | <b>10,9</b> | <b>14,3</b> |               | 11,3        | <b>14,9</b> |             | 11,7        | <b>14,3</b> |             | <b>11,7</b> |
| Mo                              |   | 0,001       | 0,001       |               | 0,001       | 0,001       |             | 0,001       | 0,001       |             | 0,001       |

\*Заштриховано: значения выше оптимальных величин.

повышенную температуру. Это характерно для р. Сетуни, Сходня и участка вблизи п. Рублево, где в период отбора проб воды ее температура варьировала в пределах 23,1-27,3<sup>0</sup> С. В речных водах преобладают педогенные химические элементы – кальций, магний, калий, натрий. Концентрация растворимых в воде форм тяжелых металлов – низкая. В речных водах отмечена повышенная концентрация нитрат-анионов и аммонийных катионов, которые совместно с фосфатами способствуют эвтрофикации стариц Москва-реки.

Донные осадки Москвы-реки заметно загрязнены тяжелыми металлами и нефтепродуктами (рис. 66,67). Среди первых преобладают марганец и цинк. Анализ литературных данных показывает, что экологическая ситуация в настоящее время по сравнению с 2012 годом по загрязнению донных осадков не улучшилась. Хотя известно, что зимой «Мосводоканал» и «Мосводосток» периодически открывают шлюзы на некоторых водохранилищах и с помощью гидроудара промывается русло Москвы-реки.

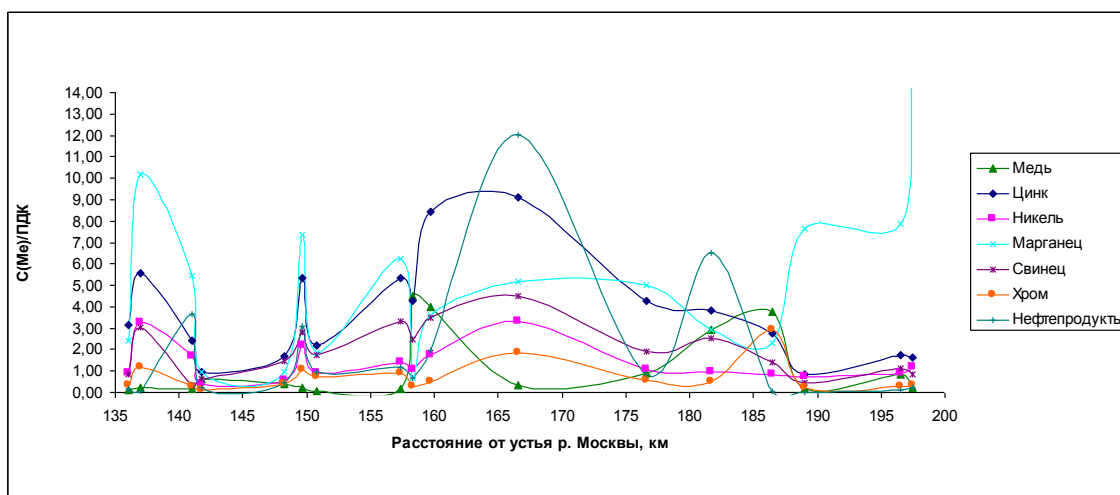


Рис. 66. Загрязнённость донных осадков Москвы-реки ионами тяжелых металлов и нефтепродуктами в черте г. Москвы (отбор проб - июль 2010 г.).

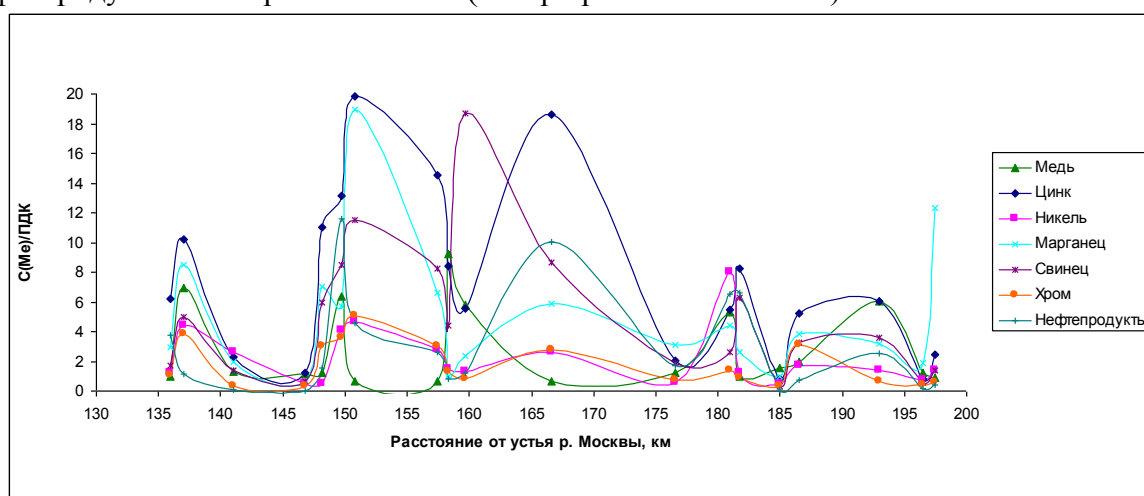


Рис. 67. Загрязнённость донных осадков Москвы-реки ионами тяжелых металлов и нефтепродуктами в черте г. Москвы; отбор проб - июль 2012 г. **Сведения по загрязнению донных осадков на рис. 66,67** соответствуют следующим точкам отбора проб: 136 км – 100 м выше Бесединского моста; 137 км – устье р. Городни, 141 км – 200 м ниже Братеевского моста; 146,8 км – ниже ОКСА; 148 км – выше ОКСА; 149,7 км – устье р. Нищенки; 150,8 км – выше Перервинской плотины; 157,4 км – р-н ЗИЛа; 158,3 км – 5 м ниже устья р. Котловки; 159,7 км – 20 м ниже устья р. Яузы; 166,6 км – 20 м ниже устья р. Яузы; 176,6 км – 20 м ниже устья р. Сетунь; 181,7 км – 20 м ниже устья ручей Ваганьковский Студенец; 186,5 км – 5 м ниже устья р. Таракановки; 189 км – 200 м выше шлюза №9; 196,5 км – ниже устья р. Сходни; 197,5 км – выше устья р. Сходни.

В качестве фоновых (не загрязненных) водных источников нами были выбраны два водоема Центрально-лесного биосферного заповедника в Тверской области: *река Межа (в 200 м от конторы)* и *Большой пруд у д. Федоровское*. Отбор проб воды был проведен 27.08.2015 г. Экологический мониторинг в лесных, луговых и полевых ландшафтах, а также водных экосистем нами в заповеднике проводится с 2011 года. Почвенный покров заповедника контрастный. Широко распространены, в частности, дерново-подзолы контактно-осветленные супесчаные на двучленных отложениях в южно-таежных лесах России. Для них характерна почти провальная водная

миграция органических веществ и различных форм соединений железа в верхних песчано-супесчаных слоях двучленов - рис. 68.



Рис. 68. А – профиль дерново-подзола контактно-осветленного супесчаного на двучленных отложениях в сложном ельнике, на плакоре увала, квартал 95 ЦЛГПБЗ; В – одна из многочисленных лесных речушек, впадающих в реку Межа: воды ее притоков заметно обогащены *органическими и органоминеральными соединениями*, поэтому имеют интенсивно желтовато-бурый цвет, но прозрачные и без запаха (фото И.М. Яшина, 2012,2013).

В водах **реки Межа (рис.69) и Большого пруда (местные базисы эрозии)** была соответственно выявлена следующая концентрация химических **соединений (мг/л): железа**  $0,87 \pm 0,17$  и  $1,79 \pm 0,27$  (ПДК – 0,3 мг/л); **нитратов** –  $0,7 \pm 0,13$  и  $0,43 \pm 0,08$  (ПДК – 45 мг/л); **pH** –  $7,4 \pm 0,2$  и  $7,1 \pm 0,2$  (ПДК –  $7,5 \pm 1,0$ ); **марганца** -  $0,13 \pm 0,1$  и менее 0,001 (ПДК – 0,1 мг/л); **алюминия** –  $0,01 \pm 0,2$  и  $0,09 \pm 0,2$  (ПДК – 0,2 мг/л); **цинка** –  $0,61 \pm 0,09$  (ПДК – 1,0 мг/л); **общая минерализация** (сухой остаток) составила -  $381 \pm 34$  и  $55 \pm 10$  (ПДК – 1000 мг/л); **химическое потребление кислорода (ХПК)** –  $10,4 \pm 2,5$  и  $28,8 \pm 6,9$  (ПДК-30 мг/л); **биохимическое потребление кислорода** –  $12,4 \pm 1,6$  и  $16,0 \pm 2,1$  (ПДК – 4,0 мг/л); **нефтепродукты** в воде не обнаружены.

Таким образом, поверхностные воды **Центрально-лесного биосферного заповедника** только по концентрации *соединений железа и биохимическому потреблению кислорода* превышают показатели ПДК. На наш взгляд, это связано с активным продуцированием органических кислот и фульвокислот из мощных лесных подстилок микроорганизмами. В профилях подзолов, развитых на двучленных почвообразующих породах, *органические кислоты мобилизуют в растворимое состояние соединения железа, которые при нисходящей водной миграции поступают в грунтовые, а затем и речные воды.* Данный процесс реализуется очень активно вследствие сезонного избыточного увлажнения лесных почв. Здесь активно реализуется *лессиваж. Буроземный процесс* здесь, на наш взгляд, не выражен из-за широкого распространения двучленных пород.



В целом поверхностные воды заповедника экологически безопасные. Воды Москвы – реки содержат *меньше соединений железа и органических веществ* (за исключением искусственных компонентов – нефтепродуктов, формальдегида и фенолов) в сравнении с водами заповедника.



Рис. 69. Заболоченная пойма и русло реки Межа в Центральном-лесном биосферном заповеднике Тверской области (в 32 км к северу от г. Нелидово) – фото И.М. Яшина, май 2014.

На основе экологической оценки вод Москвы-реки можно заключить:

1. Наиболее активное загрязнение эко-токсикантами (нефтепродуктами, фенолами, ионами аммония и железа) вод Москвы-реки происходит *около Нагатино, Марьино и Капотня*. Выявлена сезонная и годовая флуктуация концентрации экотоксикантов в воде.
2. Экологическую ситуацию «обостряют» *Курьяновская и Люберецкая станции аэрации*, расположенные на «выходе» из столицы. Эти станции должны основательно очищать промышленные и бытовые стоки; однако экологическое качество воды оказывается низким. Очевидно, указанные станции не справляются с возросшими объемами стоков и требуют модернизации оборудования.
3. Динамика концентраций соединений железа в водах Москвы-реки указывает на устойчивый *аккумулятивный тренд* данного химического элемента. Это значит, что экологическая ситуация в ландшафтах и почвах, окружающих речные бассейны рек в Подмосковье, постепенно ухудшается. Чему способствуют усиливающаяся эрозия почв, рубки лесов и жилые постройки в водоохранных зонах рек, водохранилищ, а также большое число неконтролируемых свалок в поймах рек: наблюдается химическое загрязнение почв, овощной продукции и грунтовых вод.
4. Максимальные количества нефтепродуктов в речных водах наблюдались ежегодно в период *весеннего половодья и в осеннюю*

*межень*. По-видимому, сбросы нефтепродуктов попадают в воды Москвы-реки преимущественно с поверхностными водами и плохо очищенными стоками. Воды ЦЛГПБЗ экологически безопасные, но обогащены мобильными формами железа и органических веществ

5. Установлено заметное преобладание величин ХПК (химического потребления кислорода в воде) над БПК (биологическим потреблением кислорода), что указывает косвенно на присутствие значительного количества органических веществ не только педогенной, но и антропогенной природы (моющие средства, нефтепродукты, СПАВы).

Литература к разделу «Экологическая оценки качества вод Москвы-реки»:

1. Алимов А.Ф. Элементы теории функционирования водных экосистем//Труды ЗИН. Т. 283. СПб. Наука. 2000. – 147 с.
2. Андреева Е.Е. Гигиеническая оценка качества воды поверхностных водоемов города Москвы //Профилактическая и клиническая медицина. 2014. № 3 (52). - С. 51-57.
3. Воронина Е.О. Экологическое состояние водных объектов Москвы // Научный вестник Московского государственного горного университета. 2013. № 12. - С. 17-21.
4. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ». 2010. – 336 с.
5. Елецкая А.Ю., Барабаш Ю.А., Тихонова И.О. Экологическое обследование малых рек г. Москва – р. Серебрянка // Успехи в химии и химической технологии. 2014. Т. 28. № 5 (154). - С. 18-21.
6. Карпухин А.И., Яшин И.М., Черников В.А. Формирование и миграция комплексов водорастворимых органических веществ с ионами тяжелых металлов//Известия ТСХА. 1993. Вып. 2. – С. 107-126.
7. Кауричев И.С., Фокин А.Д., Аргунова В.А., Яшин И.М. Состав органического вещества, состояние  $R_2O_3$  и фосфатов в водах, дренирующих подзолистые почвы //Известия ТСХА. 1973. Вып. 2. – С.99-105.
8. Касимов Н.С., Перельман А.И. Геохимические принципы эколого-географической систематики городов // Вестник МГУ. Сер. География. 1993. № 3.- С.16-21.
9. Лурье Ю.Ю. Унифицированные методы анализа воды. М.: Химия.1971. – 375 с.
10. Мусатов А.П. Оценка параметров экосистем внутренних водоемов. М.: Научный мир. 2001. – 191 с.
11. Петрухин В.А. Фоновое содержание Pb, Hg, As, Cd в природных средах (по мировым данным) //Мониторинг фонового загрязнения природных сред. Л.: Гидрометеиздат. 1986. Вып. 3. – С. 3-27.
12. Постников Д.А., Чинина Н.В. Локальный мониторинг водной экосистемы Бутаковского залива г. Химки //Известия ТСХА. 2004. Вып. 1. – 40-47.



13. Ростанец Д.В., Хазанова К.П., Хромов В.М. Проблемы использования фитопланктона в гидробиологическом мониторинге рек высоко урбанизированных территорий (на примере реки Москвы) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 3-2. С. 677-684.
14. Учеваткина Н.В., Базаева М.Г., Нефедкин С.И. Определение критических нагрузок на реку Москву// Экология промышленного производства. 2006. № 3. - С. 24-27.
15. Черников В.А., Соколов О.А., Байбеков Р.Ф. Экологические основы качества воды и здоровья человека //Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН. 2004. – 192 с.
16. Яшин И.М., Шишов Л.Л., Раскатов В.А. Водная миграция химических элементов в почвенном покрове. М.: МСХА. 2003. – 316 с.
17. Яшин И.М. Мониторинг процессов миграции и трансформации веществ в почвах. М.:РГАУ-МСХА. 2013. – 183 с.
18. Яшин И.М., Кашанский А.Д. Ландшафтно-геохимическая диагностика и генезис почв Европейского Севера России. М.:РГАУ-МСХА. 2015. - 202 с.
19. Яшин И.М., Гареева И.Е., Атенбеков Р.А., Васенев И.И. Экологический мониторинг воздействия антропогенеза на поверхностные воды. М.:РГАУ-МСХА. 2015. – 167 с.
20. Яшин И.М., Васенев И.И., Рикардо Валентини, Черников В.А. Методические указания по диагностике органического углерода, азота, нефтепродуктов и состава гумусовых веществ почв. М.:РГАУ-МСХА. 2012. – 131 с.
21. Andreas N. Grohmann, Martin Jekel, Andreas Grohmann u.a. Wasser: chemie, mikrobiologie und nachhaltige Nutzung. Berlin-New York. 2011. 368 s.
22. Bade K., Manz W. und Szewzyk U. (2000): Behavior of sulfate reducing bacteria under oligotrophic conditions and oxygen stress in particle-free systems related to drinking water. FEMS Microbiol. Ecol. 32. 215-223 P.
23. Garbrecht G. (1985): Wasser – Vorrat, Bedarf und Nutzung in Geschichte und Gegenwart. Taschenbuch.
24. Luhr H.-P.(2001): Umgang mit wassergefahrdenden Stoffen. Taschenbuch der Wasserwirtschaft. Berlin.

Литература к разделу по трансформации почвенно-геохимических барьеров миграции.

1. Алексеенко В.А., Алексеенко Л.П. Геохимические барьеры. Учебное пособие. М.: Логос. 2003. 144 с.
2. Бабенков Е.Д. Очистка воды коагулянтами. М.: Наука. 1977. – 356 с.
3. Возная Н.Ф. Химия воды и микробиология. М.: Высш. шк. 1979.- 340 с.
4. Иванов А.Н, Неговская Т.А. Гидрология и регулирование стока. М.: Колос. – 384 с.

5. Карпухин А.И., Яшин И.М., Черников В.А. Формирование и миграция комплексов водорастворимых органических веществ с ионами тяжелых металлов // Известия ТСХА. 1993. Вып. 2. С. 107-126.
6. Наумов Г.Б. Миграция химических элементов. В кн. Геохимия биосферы. М.: Академия. 2010. – С. 227-250.
7. Жуков А.И., Мангайт Л.И., Родзиллер И.Д. Канализация промышленных предприятий (очистка сточных вод). М., 1962.
8. Яшин И.М., Кузнецов П.В., Петухова А.А. Эко-геохимическая оценка почв и лесопарковых фаций Петрозаводска // Известия ТСХА. 2011. Вып. 4. – С. 30-43.
9. Яшин И.М., Сердюкова А.В., Петухова А.А., Грачев Д.А. Изучение миграционных потоков тяжелых металлов для диагностики загрязнения таежных экосистем // Известия ТСХА. 2012. Вып. 2. – С. 20-31.
10. Яшин И.М., Мухин Е.В., Карпухин А.И. Эколого-геохимическая характеристика почв лесных и лесопарковых ландшафтов низовья реки Северной Двины // Известия ТСХА. 2004. Вып. 1. – С. 107-126.
11. Яшин И.М. Мониторинг процессов миграции и трансформации веществ в почвах. М.: РГАУ-МСХА. 2013. – 183 с.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. На чем основан спектральный анализ?
2. От каких факторов зависит интенсивность спектральных линий?
3. Охарактеризуйте метод фотометрии пламени. Какие основные приемы работы используются в методе фотометрии пламени? Достоинства и недостатки этого метода.
4. В чем состоит сущность определения химических элементов: а) флуориметрическим методом (Zn, В), б) фосфориметрическим методом (Be), в) экстракционно-флуориметрическим методом (Al, Ga, In)?
5. Элементы группы меди (Cu, Au, Ag) можно определить методами атомно-абсорбционной (ААС) и эмиссионной спектроскопии (ЭС). Объясните, почему метод ААС имеет более низкий предел обнаружения?
6. Какой атомизатор (пламенный или непламенный) предпочтительнее использовать при анализе органических растворов, компонентов гумусовых веществ?
7. В чем сущность ядерного магнитного резонанса (ЯМР)?
8. Какие вещества используются в качестве стандартов при снятии спектров ЯМР?
9. В чем сущность: а) метода эталонной шкалы, б) метода градуировочного графика, в) метода добавок?
10. Какой свет рассеивается в наибольшей степени почвенными частицами, находящимися, допустим, в лизиметрических водах, во взвешенном состоянии: а) желтый, б) синий, в) зеленый и г) красный?
11. На чем основаны потенциометрические методы анализа?

12. Что представляют собой электроды I и II рода? Примеры этих электродов.
  13. Что такое солевой мостик?
  14. Назовите основные типы ионоселективных электродов. Как они устроены? Какие имеют характеристики?
  15. Сущность метода хроматографии. Типы сорбентов. Аппаратура. Виды хроматографического анализа.
  16. Какие используют критерии для определения хроматографического разделения?
  17. Что такое коэффициент селективности работы колонки?
  18. Коэффициент распределения  $K_p$  для вещества А > вещества В в хроматографической колонке. Какое вещество первым выйдет из колонки?
  
  19. Основные классы загрязняющих веществ.
  20. Санитарно-гигиеническая диагностика степени загрязнения почв.
  21. Источники загрязняющих веществ.
  22. Транзитные ландшафты.
  23. Процессы трансформации веществ в таежной экосистеме на плакоре.
  24. Трансформация веществ в сосняке на 2-й надпойменной террасе реки.
  25. Недостатки ПДК.
  26. Расчет параметров ПДК: нонсенс или реальность.
  27. Биогеохимические параметры оценки загрязнения.
  28. Определение коэффициента мобилизации  $K_{\text{моб}}$ .
  29. Биогенная кислотность в таежных экосистемах.
  30. Экологическая концепция таежного гумусообразования.
-



## Задачи к курсу «Экогеохимия ландшафта»

### Задача 1

Определите градиент барьера миграции соединений кадмия в таежной агроэкосистеме (в частности, в гор. А<sub>1</sub> почвы), если известно, что масштаб миграции М ионов кадмия «на входе» гор. А<sub>1</sub> составляет 5,0 мг/м<sup>2</sup>·год<sup>-1</sup>, а на «выходе» из гор. А<sub>1</sub> – 2,6 мг/м<sup>2</sup>·год<sup>-1</sup>. Мощность горизонта А<sub>1</sub> I достигает 22 см.

### Задача 2

Уточните коэффициент мобилизации  $k_{\text{моб}}$  ионов свинца из доломитизированного известняка, внесенного в гор. А<sub>1</sub> дерново-подзолистой почвы южно-таежной агроэкосистемы, если известно, что в твердой фазе мелиоранта содержится 0,004% PbCO<sub>3</sub>, а за 1 год (по данным метода сорбционных лизиметров) из мелиоранта мобилизуется 0,02г/100г ионов Pb<sup>2+</sup> в растворимое состояние (коэффициент мобилизации  $k_{\text{моб}}$  ионов свинца равен 0,0002).

### Задача 3

Рассчитайте массу ионов свинца, мобилизуемую в раствор из доломитизированного известняка, если известно, что  $k_{\text{моб}}$  равен 0,0032 (в частях), а в мелиоранте содержится 37,5 мг/кг PbCO<sub>3</sub>.

### Задача 4

Исходя из величин Кларка и масштаба водной миграции, определите, какой химический элемент интенсивнее мигрирует в течение 1 года в таежном агроландшафте: ионы железа или кремния? В частности, в профиле подзолистой почвы. Известно, что масштаб миграции  $m_{\text{миг}} \text{Fe}^{3+} = 326 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{год}^{-1}$ , а кремния – 3108 мг/м<sup>2</sup>·год<sup>-1</sup>; общие Кларки  $n_x$  железа и кремния соответственно составляют 2,7% и 54%.

### Задача 5

В схематическом уравнении материального баланса гумуса в гор. А<sub>пах</sub>  $O_{\text{п}} \cdot k_{\text{г}} = B \cdot k_{\text{мин}}$ , допустим, величина  $O_{\text{п}}$  (масса ежегодного опада растительных остатков) в агроэкосистеме существенно (в десятки раз) уменьшилась вследствие сжигания стерни и отчуждения послеуборочных остатков. Прокомментируйте, как будут изменяться величины В (запасы гумуса) и  $k_{\text{г}}$ , если  $k_{\text{г}}$  – коэффициент (константа) скорости гумификации много меньше  $k_{\text{мин}}$  (коэффициента минерализации): соответственно 0,01 и 0,65.

### Задача 6

Прокомментируйте схематическое уравнение материального баланса гумуса:  $O_{\text{п}} \cdot k_{\text{г}} = B \cdot k_{\text{мин}}$ , если произошло техногенное разрушение 75% гор. А<sub>1</sub> и гумуса в профиле дерново-подзолистой почвы подзоны южной тайги.

### Задача 7

Рассчитайте импульс миграции  $I_{\text{м}}$  углерода ВОВ в гор. А<sub>1</sub> дерново-подзолистой почвы южно-таежного агроландшафта, если известно; а) масштаб миграции  $M$  на «входе» в гор. А<sub>1</sub> – 36 г/м<sup>2</sup>, а на «выходе» – 12 г/м<sup>2</sup>; б) время наблюдений  $t$  – 8,4 мес; в) мощность  $I$  в гор. А<sub>1</sub> равна 22 см.

### Задача 8

Исходя из величины  $k_{\text{моб}}$ , Кларка  $n_{\text{х}}$  Fe в почве (4,5%),  $a_{\text{х}}$  – сухого остатка в речной воде (0,25%), определите коэффициент миграции  $k_{\text{миг}}$  ионов железа в таежном заболоченном ландшафте. Известно, что коэффициент мобилизации  $k_{\text{моб}}$  ионов  $\text{Fe}^{3+}$  в раствор равен 0,005 (в долях). Охарактеризуйте Эко-геохимический смысл константы интенсивности миграции  $k_{\text{миг}}$ .

### Задача 9

1. Рассчитайте коэффициент миграции  $k_{\text{миг}}$  для ионов кремния и цинка в таежном ландшафте, если известны следующие параметры:

а) для кремния:

$m_{\text{х}} - 1 \cdot 10^{-2}$  г/л (концентрация ионов элемента в жидкой фазе),

$a_{\text{х}} - 0,5$  г/л (сухой остаток),

$n_{\text{х}} - 29,5\%$  (Кларк элемента, или валовое содержание).

Б) для цинка:

$m_{\text{х}} - 5 \cdot 10^{-5}$  г/л,

$a_{\text{х}} - 0,3$  г/л,

$n_{\text{х}} - 8,3 \cdot 10^{-3} \%$ .

Сделайте вывод, во сколько раз один химический элемент мигрирует интенсивнее другого в ландшафте. Объясните возможные формы их миграции и активность на барьерах миграции.



## РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ И ОТВЕТЫ

### Задача № 1

Градиент миграционного барьера равен соотношению разности величин мигрируемых масс ионов кадмия (на «входе» и «выходе» из барьера) к мощности самого барьера миграции, выраженного в метрах. Отсюда:

$$G = \frac{m_1 - m_2}{l} = \frac{5,0 \text{ мг/м}^2 - 2,6 \text{ мг/м}^2}{0,22 \text{ м}} = 10,9 \text{ мг/м}^3 \cdot \text{год}^{-1}.$$

**Ответ:** 10,9 мг/м<sup>3</sup>·год<sup>-1</sup> Cd<sup>2+</sup>.

### Задача № 2

Коэффициент мобилизации  $k_{\text{моб}}$  равен отношению масс мигранта в жидкой и твердой фазах конкретного вещества. Следует помнить, если величину  $k_{\text{моб}} \times 100 =$  массовая доля (%), что удобно в расчетах. Отсюда: 1) проводим пересчет: 0,004% – это 0,004 г/100 г.

2) находим  $k_{\text{моб}} = 0,02 \text{ мг/4 мг} = 5,0 \cdot 10^{-3}$  или 0,005, т.е. 0,5% в массовых долях.

**Ответ:** 0,005, или 0,5% (или 500 мг Pb<sup>2+</sup>/100 г Ca, Mg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>).

### Задача № 3

Массу PbCO<sub>3</sub> следует выразить на 100 г. Получим: 3,75 мг/100 г. Тогда: 0,032·3,75 мг=0,12мг.

**Ответ:** 0,12 мг Pb<sup>2+</sup>/100 г мобилизуется в водный раствор из твердой фазы.

### Задача № 4

Известно (Кауричев, Яшин, 1996), что коэффициент миграции  $k_{\text{миг}} = m_{\text{миг}}/A$ . Тогда для ионов Fe<sup>3+</sup> получим  $k_{\text{миг}}$ : 326 мг/2700 мг = 0,12, а  $k_{\text{миг}}$  для кремния: 3108 мг/54000 мг = 0,06.

**Ответ:** ионы железа мигрируют в 2 раза активнее, чем ионы кремния.

### Задача № 5

а) *Математическое обоснование:* 1. Величина  $O_p \rightarrow k \cdot \text{min}$ , поэтому этой величиной можно пренебречь. 2. Тогда равенство  $O_p \cdot k_r = B \cdot k_{\text{мин}}$  превращается в неравенство:  $k_r < B \cdot k_{\text{мин}}$ . 3. Отсюда  $B$  (запас гумуса) зависит от соотношения величин  $k_r$  и  $k_{\text{мин}}$ , точнее  $k_{\text{мин}}$  гумуса. В оптимуме  $k_r = k_{\text{мин}}$  для гумусовых веществ.

б) *Почвенно-экологическое обоснование.* В почве остались лишь корневые остатки. Поэтому  $k_{\text{моб}}$  будет порядка 1/20 общей (исходя из массы корней) массы ВОВ. В этих условиях скорость и масштаб обновления гумуса компонентами ВОВ будут заметно меньше скорости минерализации самого гумуса. Запасы гумуса будут быстро уменьшаться, ВОВ выполняют функцию обновления гумусовых

веществ. Но новообразованные массы ВОВ малы, чтобы пополнить запас ГС. В итоге – деградация гумуса.

### Задача № 6.

**Ответ:** В этих условиях величиной В (запасы гумуса) можно пренебречь. Тогда вносимые при рекультивации органогенные субстраты будут трансформироваться в направлении: а) формирования групп ВОВ и б) как гумификации, так и минерализации ВОВ (при этом  $k_{\text{гум}} \ll k_{\text{мин}}$ ). Накопление гумуса (и сорбция ВОВ почвой) будет весьма медленное. Для этой стадии характерно неравенство:  $k_{\text{мин}} \gg \text{Оп} \cdot k_{\text{гум}}$ .

### Задача № 7

Известно, что коэффициент накопления  $k_n$  химического элемента равен соотношению его масс в растении и твердой фазе почвы. *Решение:* 1. рассчитаем массу золы – 2г-100г, а х (грамм) в 120 граммах.  $X=2,4$ г. 2. На долю кальция приходится 10% или 0,24 грамм. 3. Исходя из Кларка кальция в литосфере ( $1.8 \cdot 10^{-3}\%$ ) и массы кальция в растениях, найдем:  $k_n=0,24/0,0018=133$ .

**Ответ: 133.**

### Задача №8

Показатель круговорота того или иного химического элемента равен произведению величин коэффициента накопления и скорости круговорота:  $P_k = k_n \cdot v_k = \dots$  или  $P_k = k_n / T_k$ . Причем скорость круговорота и *период круговорота* связаны зависимостью:  $T_k = 1/v_k$ ; отсюда период круговорота  $T_k$  равен:  
 $T_k = 1 / 0,025 \text{ г/час} = 40 \text{ час}$  при «прокачке» 1 грамма ионов кобальта через свой организм.

**Ответ:**  $T_k = 40$  часов для ионов  $\text{Co}^{2+}$ .

### Задача № 9

$P_k = k_n \cdot v_k = 13 \cdot 0,025 \text{ г/час} = 0,33 \text{ г/час}$ , или  $7,92 \text{ г/сут}$   $C_{\text{орг}}$  и  $C_{\text{норг}}$  или  $594 \text{ г/75 сут.}$  за весь период вегетации оз. пшеницы.

**Ответ:** 594 г.

### Задача №10

Коэффициент накопления  $k_n$  можно установить 2 способами:

а) **расчетным путем по выражению:**  $k_n = m_{\text{х.э.раст}}/m_{\text{х.э.почвы}}$  ;

б) **опытным.** Экспериментально найти  $k_n$  из выражения  $k_n = P_k \cdot T_k = 0,33 \cdot 40 = 13,2$ ; округленно 13. При биогенной миграции растения «прокачивают» намного больше химических элементов через свой организм, чем содержится в их биомассе.

**Ответ:**  $k_n = 13$ .



## ТЕСТЫ

### по дисциплине «Экогеохимия ландшафтов»

#### Тест 1.

1. Охарактеризуйте **испарительный геохимический барьер**, развитый в аридных зонах Земли. Перечислите, какие химические элементы на нём аккумулируются:

- а) Fe и Ca,
- б) Si, Al и P,
- в) K и Na,
- г)  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,
- д) органические лиганды,
- е) I, F, Cl, Se, Sr;
- ж) другие...

2. Объясните, почему различные виды растительных остатков (хвоя ели, опад листьев берёзы, корни злаковых трав...) трансформируются в одинаковых почвенно-климатических условиях (например, в зоне тайги) в различными скоростями и различными **конечными продуктами гумификации?**

3. Объясните, методику расчёта **коэффициента миграции ( $k_{\text{миг}}$ )** в геохимическом ландшафте по А.И. Перельману (1975), а также параметры «**масштаб миграции**» мигранта по И.С. Кауричеву (1959), «**поле миграции**» по И.М. Яшину (1993).

4. Укажите точные координаты широты подзон южной (А) и средней (Б) тайги европейской территории России:

- А: а)  $34^\circ$  с.ш., б)  $49^\circ$  с.ш., в)  $37^\circ$  ю.ш., г)  $55^\circ$  с.ш., д)  $59^\circ$  с.ш.  
Б: а)  $67^\circ$  с.ш., б)  $60^\circ$  ю.ш., в)  $37^\circ$  с.ш., г)  $59^\circ$  с.ш.

5. Рассчитайте **прирост массы (Pr)** углерода фульвокислот за 10 лет — при постоянной скорости процесса, если известно, что исходный **запас углерода фульвокислот** в гор. А<sub>1</sub> дерново-подзолистой почвы Подмосковья составляет  $1,8 \text{ кг/м}^2$ , а прирост массы ФК за 1 год достигает 1,5% и не изменяется во времени.

#### Тест 2.

1. Что такое «**биогенное кислотообразование**»? Какие методы используются для оценки и **обоснования экологической кислотности?**

Варианты:

а) потенциометрическое титрование, б) кондуктометрия, в) сорбционные лизиметры, г) радиоактивные индикаторы, д) биотестирование?

2) Какие методы используются при **глобальном (А)** и **локальном (Б)** уровнях изучения ландшафтов:

А: а) метод эталонов, б) методы ландшафтного профилирования, в) методы дистанционного зондирования, г) метод экологических шкал.

Б: а) метод фитометров, б) метод укусов, в) стационарный метод, г) метод ключей, д) метод картографирования.

3) Что такое **«опустынивание ландшафтов»**? Назовите основные факторы опустынивания (естественные):

а) умеренно-холодный климат, б) промывной режим почв, в) лесистость местности, г) аридизация суши, д)  $KY \ll 1$ , е) импัลверизация солей, ж) эоловый перенос мелкозёма.

4. Перечислите основные радиальные **геохимические барьеры** в ландшафтах:

а) профилированная дорога, б) лесополоса, в) водохранилища, г) горизонты почв и почвообразующих пород, д) долина реки; е) другие...

5. Рассчитайте величину **ёмкости круговорота (А)** кобальта, прошедшего через лесной фитоценоз (подрост), если известно, что показатель круговорота  $P_k = 0,5$  г/ч, биомасса на  $1 \text{ м}^2$  равна 20 кг, кларк кобальта  $1,8 \cdot 10^{-3}\%$ , время опыта — 0,5 года. **Объясните**, почему искомая величина (А) оказалась больше биомассы растений?

### Тест 3.

С помощью **каких методов** осуществляется лабораторное **озоление** растительных проб и продуктов растениеводства? Варианты:

а) мокрое озоление, б) сухое озоление, в) биодеструкция, г) в лизиметрах.

2. Какими **методами** в полевых опытах определяют коэффициент гумификации? Варианты:

а) метод Кьельдаля, б) метод Тюрина, в) метод отмывки корней, г) метод сорбционных лизиметров, д) метод «мешочков», е) другие.

3. Какими методами в почвах агроландшафтов наиболее корректно изучать миграцию химических элементов? Варианты:

а) с помощью лизиметров типа ГГИ-500, б) тензиометров, в) сорбционных лизиметров, г) компенсационных лизиметров, д) стоковых площадок.

4. Какие аналитические методы обеспечивают наиболее высокий **класс точности (1-2%)** работ? Варианты:

а) спектрографические, б) пламенно-фотометрические, в) объемные, г) атомно-абсорбционные, д) радиометрические.

5. **Какие методы** могут быть использованы для выделения в естественных условиях основных **типов ландшафтов** (с географической и геохимической точки зрения)? Для каких геохимических ландшафтов (автономных, каскадных) может быть использована **расчётная формула** оценки водной миграции того или иного химического элемента? Дать обоснование  $k_{\text{миг}}$  по уравнению профессора А.И. Перельмана (1975). В каких единицах измерения используется  $k_{\text{миг}}$ ?

#### Тест 4.

1) Какие **«точки»** наблюдений используются при полевом ландшафтном картографировании:

а) «опорные», б) специализированные, в) временные, г) основные, д) картировочные, е) почвенно-экологические?

2. Для определения **фосфора** в почвенном растворе предложен колориметрический метод. Органические формы фосфора в лаборатории нужно перевести в **ортофосфаты**. Вопрос: с каким реактивом (реактивами) реагируют минеральные соединения фосфора при их диагностике:

а) щавелевая кислота, б) трилон Б, в) молибдат аммония, г) аскорбиновая кислота, д) молибдат аммония плюс аскорбиновая кислота?

3. Как рассчитывается **коэффициент трансформации** растительных остатков:

а) по кинетическому уравнению (1-го, 2-го порядков), б) по уравнению Лэнгмюра, в) по уравнению Дарси, г) простым сложением коэффициентов  $k_{\text{моб}}$ ,  $k_{\text{мин}}$ , и  $k_{\text{гум}}$ ?

4. Приведите формулы расчёта **средней** и **истинной** скоростей трансформации растительных остатков в почве.

5. Определите градиент барьера миграции ( $G$ ) соединений кадмия в таёжной агроэкосистеме (например, в гор.  $A_{\text{пах}}$ ), если известно, что масштаб миграции ( $M$ ) ионов  $\text{Cd}^{2+}$  «на входе» в гор.  $A_{\text{пах}}$  составляет  $5,0 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{год}^{-1}$ , а «на выходе» из гор.  $A_{\text{пах}}$   $2,6 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{год}^{-1}$ . Мощность барьера  $l$  достигает в среднем 22 см.

#### Тест 5.

. Охарактеризуйте **испарительный геохимический барьер**, развитый в аридных зонах Земли. Перечислите, какие химические элементы на нём аккумулируются:

а) Fe и Ca,

- б) Si, Al и P,
- в) K и Na,
- г)  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,
- д) органические лиганды,
- е) I, F, Cl, Se, Sr;
- ж) другие...

2. Объясните, почему различные виды растительных остатков (хвоя ели, опад листьев берёзы, корни злаковых трав...) трансформируются в одинаковых почвенно-климатических условиях (например, в зоне тайги) в различными скоростями и различными **конечными продуктами гумификации?**

3. Объясните, методику расчёта **коэффициента миграции ( $k_{\text{миг}}$ )** в геохимическом ландшафте по А.И. Перельману (1975), а также параметры «**масштаб миграции**» мигранта по И.С. Кауричеву (1959), «**поле миграции**» по И.М. Яшину (1993).

4. Укажите точные координаты широты подзон южной (А) и средней (Б) тайги европейской территории России:

А: а)  $34^\circ$  с.ш., б)  $49^\circ$  с.ш., в)  $37^\circ$  ю.ш., г)  $55^\circ$  с.ш., д)  $59^\circ$  с.ш.

Б: а)  $67^\circ$  с.ш., б)  $60^\circ$  ю.ш., в)  $37^\circ$  с.ш., г)  $59^\circ$  с.ш.

5. Рассчитайте **прирост массы (Пр)** углерода фульвокислот за 10 лет — при постоянной скорости процесса, если известно, что исходный **запас углерода фульвокислот** в гор. А<sub>1</sub> дерново-подзолистой почвы Подмоскovie составляет  $1,8 \text{ кг/м}^2$ , а прирост массы ФК за 1 год достигает 1,5% и не изменяется во времени.

## Тест 6.

1. Что предполагает **экологический прогноз?** Варианты:

а) выявление прямых негативных последствий, б) установление новых взаимосвязей между компонентами экосистем, в) взаимообусловленный ряд негативных (и часто непредсказуемых) последствий в ответ на техногенное воздействие, г) комплексную оценку ситуации на основе базисного, оценочного и блока управления.

2. Назовите причины, вызывающие химическую деградацию гумусовых веществ почв, например, подзоны южной тайги:

а) эрозия, б) солнечная радиация, в) удобрения, г) переуплотнение, д) низкие массы растительного опада, е) распашка целинных ландшафтов, ж) другие.

3. Необходимо изучить масштаб и формы миграции, допустим, ряда тяжёлых металлов (Hg, Cd, Zn, Fe) в элементарных геохимических

ландшафтах тайги. **Вопрос:** какие типы лизиметров наиболее подходят для решения данной задачи? Варианты:

а) насыпные, б) воронки, в) испарители — ГГИ-500, г) вакуумные, д) сорбционные, е) тензиометры, ж) с постоянным УГВ.

4. Объясните схему разделения компонентов ВОВ по методу W. Forsyth (1947) с использованием следующего **сорбента (А)** и **элюентов (Б)**:

А: а) ионитов, б) цеолита (К, Са, Na-функции), в) оксида алюминия, г) активированного угля, д) комплексообразующих сорбентов.

Б: а) высокооктанового бензина, б) этанола, в) ацетона, г) растворов кислот, д) растворов щелочей, е) воды.

5. Исходя из величины  $k_{\text{моб}}$ , Кларка  $n_x$  Fe в почве (4,5%),  $a_x$  — сухого остатка в воде (0,25 г/100 г), определите  $k_{\text{миг}}$  железа в таёжном заболоченном ландшафте. Известно, что  $k_{\text{моб}} \text{ Fe} = 0,005$  (в долях). Охарактеризуйте  $k_{\text{миг}}$  с геохимической и экологической точек зрения.

### Тест 7.

1. Для оценки водной миграции химических элементов на разных уровнях структурной организации веществ в ландшафтах используются следующие параметры: **масштаб миграции** (по Кауричеву), **«поле миграции»** (по Яшину), **коэффициент миграции** (по Перельману). Объясните их сущность и правила расчёта.

2. Какие **методы** используются при **дистанционном зондировании** ландшафтов? Варианты:

а) тепловизоры и сканеры, б) стационарные наблюдения, в) методы хроматографии при высоком давлении, г) трассирующие радиометры и радиолокаторы, д) вегетационные методы, е) методы оценки индекса радиационной активности.

3. В чём заключается **принцип** действия **вакуумных** лизиметров (нарисуйте схему):

а) свободное движение почвенной влаги, б) переход жидкости в пар, в) замерзание воды в порах, г) за счёт разряжения (градиента давления в керамическом наконечнике прибора и в почве), д) за счёт осмоса и диффузии.

4. Охарактеризуйте лизиметрическое устройство и нарисуйте его схему для лизиметрического павильона МГУ им. М.В. Ломоносова:

а) насыпной лизиметр, б) сорбционный лизиметр, в) лизиметр-воронка, г) пьезометр.

5. 1) Рассчитайте коэффициент миграции  $k_{\text{миг}}$  для кремния и цинка в таёжном лесном ландшафте, если известны следующие параметры:

а) для кремния  
 $m_x = 1 \cdot 10^{-2}$  г/л (концентрация элемента в жидкой фазе);

б) для цинка  
 $m_x = 5 \cdot 10^{-5}$  г/л,

$a_x = 0,5$  г/л (сухой остаток),  $a_x = 0,3$  г/л,  
 $n_x = 29,5\%$  (кларк элемента, или валовое содержание)  $n_x = 8,3 \cdot 10^{-3}\%$ .

2) Сделайте вывод, во сколько раз один химический элемент мигрирует активнее другого в ландшафте. Объясните формы их миграции в подзолистых и в подзолисто-глеевых почвах.

### Тест 8.

1. **Комплексная оценка экологического состояния ландшафтов** (в частности, вблизи техногенных зон) включает ряд взаимосвязанных этапов (блоков работ) в реальных территориях. Назовите и кратко охарактеризуйте их особенности:

а) история изучаемой техногенной зоны, б) состояние оборудования на предприятии, в) система очистки стоков, г) источники загрязнения, д) запылённость атмосферы, е) транзитные среды (ландшафты), ж) депонирующие среды (донные отложения рек, озёр, водохранилищ...), з) наличие почвенно-экологической лаборатории...

Другие ответы необходимо обосновать.

2. Как называется совокупность процессов, входящих в «**большой**» (геологический) и «**малый**» (биогеохимический) круговороты веществ? Варианты: а) денудационный цикл, б) гидрохимический цикл, в) биогеохимический цикл, г) цикл глобального осадкообразования в морях и океанах, е) эоловый перенос солей и мелкозёма.

3. Назовите основные принципы ландшафтно-геохимического прогноза.

Варианты: а) историко-эволюционный, б) ландшафтно-генетический, в) структурно-морфологический, г) динамический, д) статистический, е) географический.

4. Какой аналитический метод (из указанных) имеет наиболее высокий **класс точности**? Варианты: а) спектрографический, б) весовой, в) полярографический, г) атомно-абсорбционный.

5. Рассчитайте годовой **масштаб вертикальной нисходящей миграции** (М) ионов  $Pb^{2+}$ , если известно, что диагностированная масса ионов свинца (в сорбционном лизиметре) составляет 43,7 мг, рабочая поверхность сорбционного лизиметра —  $66,4 \text{ см}^2$ , мощность слоя почвы, под который установлены колонки составляет 18 см, а количество осадков в период вегетации выпало 92 мм.

### Тест 9.

1. Что представляет собой туча саранчи с биогеохимической точки зрения? Варианты:

а) вид живых организмов, б) насекомые, приносящие вред ландшафтам, насекомые, которых необходимо уничтожить, в) химически активная (находящаяся в движении) форма живого вещества, г) временное скопление живого вещества, д) миграционная форма живого вещества (**масса** стаи ~ 44 млн. тонн, **объем** ~ 6000 км<sup>2</sup>).

2. В чём смысл выражения А. Сент-Дьерди: «...**Человек не так уж сильно отличается от травы, которая растёт у него под ногами**»? Варианты:

а) химическим составом, б) функционированием, в) ролью в ландшафтах, г) единством обмена веществ и энергии, д) взаимосвязанными процессами.

3. Какие **тяжёлые металлы** попадают в трофические цепи тайги из почвенного покрова и пород? Варианты:

а) Fe, Cr, Mn..., б) Cd и Zn, в) Co и Cu, г) Cu, Ni, Fe, д) Hg, Se, As, е) Hg, Zn, Sn, As, ж) Cd, Cu, Zn, Fe.

4. Найдите **5 основных групп веществ**, входящих в состав экотоксикантов наземных экосистем: а) органические лиганды, б) NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, фенол, в) ПАУ, г) радионуклиды, д) пыль и сажа, е) микроэлементы, ж) цементная пыль, з) SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, F<sup>-</sup>, и) гумусовые вещества, к) залежи известняка.

5. Определить полную динамическую ёмкость (ПДОЁ) катионита КУ-2 (моль/г), используемого в сорбционных лизиметрах, если известно, что через хроматографическую колонку **в лаборатории**, содержащую 5,0 г сорбента, пропустили 250,0 мл 0,050 моль водного раствора ZnSO<sub>4</sub>. Элюат собирали порциями **по 50,0 мл**. В каждой порции определяли концентрацию ионов Zn<sup>2+</sup> и получили следующий ряд концентраций для построения выходной кривой (моль/л) по порциям: 1 — 0,008; 2 — 0,029; 3 — 0,038; 4 — 0,050 и 5 — 0,050. Какими методами определяют ионы Zn<sup>2+</sup> в растворе?



## Общая библиография

1. Афанасьева Е.А. Черноземы Среднерусской возвышенности. М.: Наука. 1966.
2. Докучаев В.В. О происхождении русского чернозема // В кн. Дороже золота русский чернозем. Вступ. ст. и комм. Г.В. Добровольского. М.: МГУ. 1994. – С. 217-265.
3. Зайдельман Ф.Р. Теория образования светлых кислых элювиальных горизонтов почв и ее прикладное значение. М.: КРАСАНД, 2010, 248 с.
4. Кадер Г.М., Ахтырцев Б.П. Исследование миграции подвижного органического вещества, полуторных окислов, Са, Mg, К и Na методом хроматографии в некоторых почвах Воронежской области // Бюлл. Почвен. Ин-та имени В.В. Докучаева. М.: ВАСХНИЛ. 1968. Вып. 2. – С. 37-44.
5. Кауричев И.С., Яшин И.М. Влияние идей А.А. Роде на формирование гипотез о генезисе подзолистых почв таёжной зоны // ж. Почвоведение, 1996, № 5. - С. 552-563.
6. Кауричев И.С., Яшин И.М., Черников В.А. Теория и практика метода сорбционных лизиметров в экологических исследованиях. М.: МСХА. 1996. 144 с.
7. Кауричев И.С., Яшин И.М., Кашанский А.Д. Применение метода лизиметрических хроматографических колонок в почвенных исследованиях// Кн. Методы стационарного изучения почв. М.: Наука. 1977. Том 2. С. 167-198.
8. Кауричев И.С., Поддубный Н.Н. Почвы учебного хозяйства «Муммовское» и их агрономическая характеристика // Известия ТСХА. 1957. Вып. 2. – С. 141 – 155.
9. Кауричев И.С., Яшин И.М., Черников В.А. Эколого-биогеохимические закономерности гумусообразования в почвах таежных ландшафтов // Известия ТСХА, 1997, Вып. 1, - С. 63- 82.
10. Костычев П.А. Почвы черноземной области России – их происхождение, состав и свойства. М.: АН СССР. 1949. – 239 с.
11. Лурье А.А. «Хроматографические материалы». М. Химия. 1978.
12. Классификация и диагностика почв России. Ред. Г.В. Добровольский. Смоленск: Ойкумена. 2004. - 342 с. Поддубный Н.Н., Кирюхина З.П. О миграции водорастворимого органического вещества в пахотных и целинных черноземах обыкновенных // Доклады ТСХА. 1971. Вып.169. – С. 116-118.
13. Пономарева В.В., Плотникова Т.А. Гумус и почвообразование. Л.: Наука. 1980. – 222 с.
14. Райс. Э. Аллелопатия. М.: Мир. 1978.
15. Ростовцева О.С., Колпенская Н.П. К истории изучения черноземов почвоведом Тимирязевской академии // Известия ТСХА. 1983. Вып. 5. – С. 57-63.
16. Усов Н.И. Почвы Саратовской области. Ч. 1 (Правобережье); 288 с.; Ч. 2 (Заволжье). ОГИЗ, Саратовское областное отд. 1948. 362 с.

17. Тишков А.А. Биосферные функции природных экосистем России. М.: Наука. 2005. – 309 с.
18. Яшин И.М. Мониторинг процессов миграции и трансформации веществ в почвах. М.: РГАУ-МСХА. 2013. - 183 с.
19. Яшин И.М., Карпачевский Л.О. Экогеохимия ландшафтов. М.: РГАУ-МСХА. 2010. – 224 с.
20. Яшин И.М., Постников Д.А., Таллер Е.Б. Экологическое состояние и генезис почв учхоза «Дружба» Ярославской области // Доклады ТСХА. 2011. Часть 1. – С. 335 – 339.
21. Яшин И.М., Сердюкова А.В., Петухова А.А., Грачев Д.А. Изучение миграционных потоков тяжелых металлов для диагностики загрязнения таежных экосистем // Известия ТСХА. 2012, Вып. 2, - С. 20-31.
22. Яшин И.М., Кашанский А.Д., Петухова А.А., Когут Л.П. Ландшафтно-геохимическая диагностика почв Европейского Севера России. Монография. М.: РГАУ-МСХА. 2012. -158 с.
24. Яшин И.М., Васенев И.И., Петухова А.А., Ворников Д.В. Экологическое состояние и деградация черноземов Приволжской Возвышенности (на примере учхоза «Муммовское» Саратовской области) // Известия ТСХА. 2012. Вып. 1. – С. 41-52.
25. Яшин И.М., Кашанский А.Д. Развитие идей И.С. Кауричева в области теоретического почвоведения и экологии // Сб. докладов Междунар. научной конф., посвященной 150-летию со дня рождения В.Р. Вильямса и 100-летию со дня рождения И.С. Кауричева. М.: РГАУ-МСХА. 2014. – 105-112.
26. Яшин И.М., Когут Л.П., Васенев И.И., Таллер Е.Б., Грачев Д.А. Генезис и миграция веществ в почвах на двучленных породах ЦЛГПБЗ Тверской области // Известия ТСХА. 2014. Вып. 3. С. 5-19.
27. Яшин И.М., Раскатов В.А., Васенев И.И. Методы экологических исследований. Учебное пособие. М.: РГАУ-МСХА. 2015. – 183 с.
28. Яшин И.М., Кашанский А.Д. Ландшафтно-геохимическая диагностика и генезис почв Европейского Севера России. М.: РГАУ-МСХА. 2015. – 202 с.
29. Яшин И.М., Гареева И.Е., Атенбеков Р.А., Васенев И.И. Экологический мониторинг воздействия антропогенеза на поверхностные воды. М.: РГАУ-МСХА. 2015. – 167 с.
30. Яшин И.М. Выделение из почв мобильных групп гумусовых соединений водным раствором нейтральной соли // В Сб. Актуальные вопросы агрономического почвоведения. М.: МСХА. 1989. – С. 48.
31. Яшин И.М., Черников В.А., Карпунин А.И., Раджабова П.А. Содержание и состав водорастворимых органических веществ в поверхностных природных водах европейского Севера // Известия ТСХА. 1990. Вып. 3. – С. 68-83.
32. Яшин И.М., Кауричев И.С. Роль низкомолекулярных органических кислот в абиогенной трансформации гумусовых веществ почв таежно-лесной зоны // Известия ТСХА. – 1992. – Вып. 5. – С.36-49.

33. Яшин И.М., Кауричев И.С. Особенности взаимодействия водорастворимых органических веществ с оглеенной породой в модельном лабораторном опыте // Известия ТСХА. — 1992. — Вып. 6. — С.33-44.
34. Роуэлл Д.Л. Почвоведение: методы и использование. Пер. с англ. М.: Колос. 1998. 486 с.
35. Blume, H.-P. Handbuch des Bodenschutzes – Bodenökologie und –belastung, vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. 1992. 794 S.
33. Eckelmann, W. Soil Information for Germany. 2004.
34. Barton D.N., Schnitzer M. A new experimental approach to the humic acid problem \ Nature. — 1963. — V.198, N 4876. — P.217.
35. Berzelius I. Lehrbuch der Chemie. Dresden u. Leipzig. — 1839.
36. Bloom P.R. Metal-organic matter interactions in soil \ Chemistry in the soil environment. ASA Madison Wisc. Spec. Publ. — 1981. — N 40. — P.129-150.
37. Bloomfield C. A study of podzolization. I. The mobilization of iron and aluminium by Scots pine needles. II. The mobilization of iron and aluminum by *Agathis Australis* (Kauri) \ J. Soil. Sci. — 1953. — V.4. — P.5; 17.
38. Blomfield C. A study of podzolization. V. The mobilization of iron and aluminium by aspen and ash leaves \ J. Soil Sci. — 1954. — V. 5. — P.50.
39. Bloomfield C., Kelso W.I., Pruden G. Reaction between metals and humified organic matter. \ J. Soil Sci. — 1976. — V.27, N 1. — P.16-31.
40. Broadbent F.E. Soil organic matter-metal complexes. 2. Cation exchange chromatography of copper and calcium complexes \ Soil. Sci. — 1957. — V.84, N 2. — P.127.
41. Davis H., Mott C.I.B. Titrations of fulvic acid fractions \ J. Soil Sci. — 1981. — V.32, N 3. — P.379.
42. Flaig W. Zur Umwandlung von Lignin in Humusstoffe \ Freiburger Forschungen. — 1962. — Ser. A. — S.254.
43. Forsyth W.G.C. Studies on the more soluble complexes of soil organic matter \ Biochim. J. (L.). — 1947. — V.41, N 2. — P.176-181.
44. Gregor I.E., Powell H.K.I., Town R.M. Metal-fulvic acid complexing: evidence supporting an aliphatic carboxylate mode of coordination \ Sci. Total Environ. — 1989. — Vol.81. N 82. — P.597-606.
45. Guggenberger G., Kögel-Knabher I., Haumaier L., Zech W. Gel permeation chromatography of watersoluble organic matter with deionized water as eluent. II. Spectroscopic and chemical characterization of fractions obtained from an aqueous litter extract \ Sci. Total Environ. — 1989. — V.81-82. — P.447-457.
46. Haan H. de, Werlemark G., Boer T. De. Effect of pH on molecular weight and size of fulvic acids in drainage water from peaty grassland in NW Netherlands \ Plant and Soil. — 1983. — V.75, N 1. — P.63-73.
47. Haworth R.D. The chemical nature of humic acid \ Soil. Sci. — 1971. — V.111. — N 1. — P.71.
48. Hayes M.H. Studies on soil humic substances \ J. Sci. Food. Agric. — 1985. — V.36, N 4. — P.272.

49. Jenkinson D.S., Rauner I.H. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments \ Soil Sci. — 1977. — V.123. — N. 5. — P.298-305.
50. Jenkinson D.S., Rauner I.H. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments \ Soil. Sci. — 1977. — V.123, N 5. — P.298-305.
51. Khan S., Schnitzer M. Permanganate oxidation of humus acids, fulvic acids and humans extracted from Ah horisonts of black chernozomic soil \ J. Soil. Sci. — 1972. — V.52, N 1. — P.43-53.
52. Khaity A.H., Ziechmann W. Die Veränderung von Humin Säuren in alkalischen Lösung \ Z. Pflanzen und Bodenkunde. — 1981. — Bd.144, H.4. — S.407-422.
53. Kleist H. **Radiochromatografische** Untersuchungen an Fulvosäuren \ Acta Biol. Med. Germ. — 1964. — Bd.13, H.6. — S.949.
54. Kodama H., Schnitzer M., Murad E. An investigation of iron (III) — **fulvic acid** complexes by Mössbauer spectroscopy and chemical methods \ Soil Sci. Soc. Amer. J. — 1988. — V.52, N 4. — P.994-998.
55. König N., Ditze G. Komplexirung von Aluminium und **Schwermetallen** durch natürliche organische Substanzen in sauren Humus — Extrakten und natürlichen Sicherwässern \ Trans. 13. Congr. Inter. Soil. Sci., Hamburg. — 1986. — V.2. — S.354-355.
56. Kumada K. Chemistry of soil organic matter. Tokyo. — 1988.
57. Kusinska A. Chemical and physicochemical properties of various fractions of fulvic acids of rusty and podzolic soils \ Polish J. Soil Sci. — 1982. — V.15, N 2. — P.85.
58. Küster E. **Bedeutung der Aktinomyceten** für den Abbau von Cellulose, Lignin und Huminstoffen im Boden \ Z. Pflanzenernähr. und Boden. — 1979. — Bd. 142, N 3. — S.365-374.
59. Lehmann R.G., Cheng H.H., Harsh I.B. Oxidation of **phenolic acids** by soil iron and manganese oxides. Soil Sci. Soc. \ Amer. J. — 1987. — V.51. — N 2. — P.352.
60. Li C.Y. Soil fatty acids under alder, conifer, and mixed alderconifer stands of coastal Oregon. \ Soil Sci. — 1978. — V.125, N 2. — P.92-94.
61. Loeppert R.H., Clarke E.T. Reactions of **Fe<sup>2+</sup> and Fe<sup>3+</sup>** in calcareous soils \ J. Plant. Nutr. — 1984. — V.7, N 1-5. — P.149-163.
62. Murray K., Linder P.W. **Fulvic acids**: structure and metal binding. J.A. random molecular model \ J. Soil. Sci. — 1983. — V.34, N 3. — P.511-523.
63. Murray K., Linder P.W. **Fulvic acids**: structure and metal binding. II. Predominant metal binding sites \ J. Soil. Sci. — 1984. — V.35, N 2. — P.217-222.
64. Яшин И.М. Исследование трансформации органических веществ в подзолистых почвах таежной зоны // Агроэкология. 2015. № 1. С. 10-19.

## Темы рефератов по курсу «Экогеохимия ландшафта»

1. Методы ландшафтно-геохимического и географического прогноза.
2. Диагностика экологической (биогенной) кислотности в таежной экосистеме.
3. Прогноз трансформации барьеров миграции в ландшафтах тайги.
4. Формы и масштаб миграции в почвах лесопарковых ландшафтов ионов тяжелых металлов.
5. Применение метода сорбционных лизиметров в почвенных и экологических исследованиях.
6. Условия и процессы деградации физико-химических барьеров миграции
7. Трансформация известковых мелиорантов в почвах таежных агроэкосистем.
8. Экологическая безопасность агроландшафтов.
9. Модифицированный вариант метода сорбционных лизиметров - прием нативного изучения продуктов трансформации мелиорантов, удобрений и осадков сточных вод.
10. Организация стационаров и лизиметрические изыскания.
11. Методика оценки параметров абиогенной миграции водорастворимых веществ в почвах: масштаб миграции, коэффициент миграции.
12. Экологическая оценка элювиальных и транзитных элементарных геохимических ландшафтов Лесной опытной дачи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.
13. Сорбенты, используемые в сорбционных лизиметрах: активированный уголь, оксид алюминия, синтетические органические ионообменные смолы.
14. Типы лизиметров, их конструкции и применение.
15. Роль процесса гумусообразования в абиогенной миграции и аккумуляции веществ в почвах тайги.
16. Конструкции сорбционных лизиметров для учета нисходящих, восходящих и боковых потоков мигрантов в почвах таежной зоны.
17. Экспериментальное моделирование взаимодействия водных растворов органических кислот (и легкорастворимых солей) с почвами.
18. Характеристика блок-схемы «поля» абиогенной миграции в таежном биогеоценозе.
19. Форма и масштаб миграции ионов кальция в почвах ландшафтов тайги.
20. Аллелопатические функции фенолкарбоновых и низкомолекулярных органических кислот алифатического ряда в экосистемах тайги.
21. Методы учета химического загрязнения и деградация гумусовых веществ почв ландшафтов таежной и лесостепной зон России.

22. Роль зональных процессов почвообразования в абиогенной (водной) миграции веществ в ландшафтах.
23. Кислотные, аллелопатические и комплексообразующие свойства водорастворимых органических веществ таежных экосистем.
24. Факторы, определяющие трансформацию и миграцию веществ на барьерах миграции в таежной зоне.
25. Хроматографические методы анализа компонентов экосистем: колоночная адсорбционная, бумажная распределительная и гель-хроматография. Практика применения методов хроматографии в экологии.

### **Вопросы для зачёта с оценкой по дисциплине «Экогеохимия ландшафта»**

1. Что такое ландшафтная карта?
2. Перечислите основные этапы составления ландшафтной карты.
3. Для каких целей и как проводится рекогносцировка?
4. В каком масштабе картируются фации и урочища?
5. Что такое маршрутный метод картирования и как составляется маршрутный ход?
6. С какой целью составляется ландшафтная карта-гипотеза?
7. Какие работы выполняются в камеральный период?
8. Какая информация содержится на топографической карте?
9. С какой целью дешифрируют аэрофотоснимки?
10. Перечислите дешифровочные признаки почв и рельефа.
11. С какой целью применяют стереоскопические приборы и стереопарные аэрофотоснимки?
12. Назовите прямые и косвенные дешифровочные признаки.
13. Почему наибольший эффект при картировании ландшафтов можно получить только при совместном использовании топографической карты, аэрофотоснимков и фотопланов?
14. Назовите недостатки планов землеустройства, как картосновы, и почему их нельзя использовать при почвенных и ландшафтных работах?
15. Что означает термин «тайга»? Какие почвы находятся в тайге?
16. Какие растения произрастают в тундре?
17. Какие типы почв характерны для ландшафтов лесостепи?
18. Какие факторы обуславливают опустынивание ландшафтов?
19. Укажите причины вторичного засоления почв сухостепной зоны.
20. Какое влияние на почву оказывают легкорастворимые соли?
21. Какие ландшафты наиболее комфортны для проживания людей?
22. Назовите лимитирующие экологические факторы выше указанных ландшафтов.
23. Перечислите основные аграрные ландшафты.

24. Какие факторы вызывают деградацию агроландшафтов?
25. В чем проявляется, в частности, деградация осушенных торфяников?
26. Охарактеризуйте термин «пастбищная дигрессия»,
27. Перечислите сельскохозяйственные угодья, укажите оптимальную долю (площадь) пашни в севообороте.
28. Сформулируйте кратко сущность рационального природопользования.
29. Перечислите основные типы техногенных ландшафтов.
30. Какие процессы могут наблюдаться в техногенных (промышленных) ландшафтах - каменоломнях, терриконах и известняковых карьерах?
31. Какой вид миграции веществ доминирует в техногенных ландшафтах?
32. Какие процессы реализуются в терриконах (при добыче угля), содержащих сульфид железа? Что происходит с почвами?
33. Какие процессы почвообразования протекают в терриконах и отвалах горных пород?
34. С какой целью необходимо проводить экологический мониторинг в техногенных ландшафтах?
35. Нарисуйте схему каскадного ЭГЛ.
36. Покажите на схеме каскадного ЭГЛ прямые и обратные связи, реализуемые через потоки мигрантов.
37. Какую роль в водной миграции веществ играют речные системы и илы?
38. Почему при взаимодействии морских вод с речными наблюдается выпадение коллоидов железа, кремния, марганца и алюминия?
39. Объясните, что означает термин «центр» ЭГЛ?
40. Охарактеризуйте классификацию агроландшафтов.
41. Назовите таксономические уровни систематики агроландшафтов.
42. Что такое целевые и сопутствующие ландшафты?
43. Чем техногенные ландшафты отличаются от аграрных?
44. С какой целью проводится классификация ландшафтов?
45. С какой целью проводится классификация ландшафтов?
46. Назовите таксономические уровни ландшафтов.
47. Перечислите сельскохозяйственные ландшафты.
48. В чем состоит отличие аграрных ландшафтов от техногенных (промышленных)?
49. С какой целью проводится сопряженное изучение ландшафтов?
50. Напишите блок-схему этапов экологического картографирования.
51. Перечислите виды изыскательских работ в оценочном блоке.
52. Что входит в блок прогноза развития экологической ситуации в агроландшафтах?
53. Какие мероприятия включают в блок управления?
54. Назовите блоки оценки загрязнения ландшафтов,



55. Объясните причину химического загрязнения почв различными токсикантами,
56. Перечислите основные группы поллютантов в биосфере,
57. Почему ГИС технологии перспективны при оценке зон загрязнения ландшафтов?
58. Где впервые были разработаны программы и ГИС технологии? Почему в России наблюдается известное отставание в этой области образования?
59. Чем отличаются «мониторинг» и «контроль за состоянием биосферы»?
60. Что составляет информационную базу мониторинга?
61. Что включает фоновый мониторинг?
62. Перечислите виды мониторинга в агроландшафтах.
63. В каких ландшафтах проводится фоновый мониторинг?
64. Охарактеризуйте цели и значение регионального мониторинга.
65. Перечислите методы, используемые при импактном мониторинге.
66. С какой целью проводится оперативный мониторинг и экологическая экспертиза объекта?
67. Что такое глобальный мониторинг?
68. В каких экосистемах реализуются фоновый и региональный мониторинги?
69. Кто из специалистов впервые обосновал термин «мониторинг»?
70. Какие методы используются при полевых экологических исследованиях?
71. Охарактеризуйте стационарный метод изысканий.
72. Что такое метод «ключей»?
73. Для каких целей проводится дистанционное зондирование ландшафтов?
74. Назовите бесплощадные методы, поясните возможности их применения.

## Заключение

Материал, изложенный в учебном пособии по дисциплине «Экогеохимия ландшафта», позволяет студентам полнее *исследовать эколого-геохимическую ситуацию в ландшафтах*. Почвоведы, экологи и гидрохимики хорошо знают, что от химического состава почвенных барьеров миграции в значительной мере зависят, в частности, гидрохимический состав и экологическая безопасность поверхностных вод многих ландшафтов России. Почвенный покров нужно беречь, изучать и защищать от эрозии (водной и ветровой), загрязнения, засоления и деградации. Крупномасштабное почвенное и эко-геохимическое картографирование ландшафтов (и почв) в М1:10 000–М1:50 000 опирается на умелое использование и дешифрирование *картографических материалов*, приемов картирования и физико-химического анализа почв, растений и поверхностных вод. Важно также уметь рассчитывать параметры миграции веществ, знать движущие силы миграции и особенности трансформации веществ на барьерах миграции. Здесь помогут знания в области хроматографии.

На практических занятиях студенты научатся оценивать эколого-геохимическую ситуацию ландшафтов на примере административных районов Подмосковья. Знания по хроматографии позволят студентам-экологам понять вклад почвенного покрова в формирование химического состава поверхностных вод: фракционирование и аккумуляцию загрязнителей на почвенно-геохимических барьерах миграции. Со временем *данные барьеры* изменяют свои функции, становясь источниками экотоксикантов. Это относится к почвам, прежде всего. *Избыток извести и фосфорных удобрений способствует химическому загрязнению почв*.

*Например, в таежной зоне формируется масштабный биогенный и абиотический поток органических лигандов с кислотными свойствами. Данный биогеохимический поток и является движущей силой миграции различных химических элементов в экосистемах при дефиците ионов кальция, азота и фосфора*. Поэтому природные воды тайги содержат в растворимом (ионно-молекулярном) состоянии *большое количество фульвокислот* и иных органических кислот, а также *органоминеральные соединения железа, алюминия кремния*. Экологическое качество таких вод для пищевых целей неудовлетворительное и требует обязательной очистки путем последовательных технологических операций: отстаивания, аэрации, коагуляции, флотации, фильтрации через песчано-карбонатные, целлюлозные и иные абсорберы (с углем, например), обеззараживание и т.д.

В зоне степей, где распространены ненарушенные и не солонцеватые черноземы, ситуация совершенно другая: химический состав поверхностных природных вод отличается низким содержанием *ионных форм железа, алюминия и кремния*. В водах преобладают растворимые гидрокарбонаты кальция, что также имеет *свои экологические риски*. Содержание  $S_{орг}$  здесь

крайне низкое. Качество питьевой воды – чаще всего хорошее (если нет антропогенного загрязнения почвенного покрова и поверхностных вод).

Отметим, что проблема глубокой очистки природных вод для населения является одной из приоритетных, получивших поддержку в одном из национальных проектов Президента Российской Федерации на период 2006-2015 гг. В этой связи особое внимание следует уделять *не только очистке воды и водоподготовке*, но и *предупредительным мерам*: улучшить эколого-химический контроль за деятельностью различных производств, предприятий, свалок и очистных сооружений. Уместно заметить, что бытовые «фильтры-кувшины» могут хорошо очищать питьевую воду от минеральных и органических катионов и анионов. Задача выполнена на химическом уровне. *Но такая вода оказывается экологически бесполезной и, возможно, вредной с экологической точки зрения.* Но, по-видимому, еще большую опасность представляют *патогенные микроорганизмы, которые аккумулируются на сорбционных фильтрах (их же в быту никто не активизирует)*. Со временем микроорганизмы попадают в фильтраты, и могут вызвать серьезные болезни людей. Причем, кроме специалистов по хроматографии, люди об этом даже и не подозревают.

И еще одна проблема, связанная с загрязнением почв и ландшафтов. Например, в Подмосковье более 80% свалок расположены в поймах рек (данные специалистов МГУ имени М.В. Ломоносова за 2000 год), что недопустимо из-за химического загрязнения пойменных почв и природных вод. Овощная продукция и рыба в этих условиях оказываются опасными для употребления в пищу. *Почвы поймы рек Оки и Москвы-реки* и овощная продукция, в частности, с известных Дединовской и Фаустовской пойм Москвы-реки, а также поймы реки Оки (от Серпухова до Коломны) также оказывается экологически неблагополучной.

Наконец, напомним, что 2015 год в России – **это год почв**. Это очень важно: почвы нужно беречь, защищать, а их плодородие повышать. Хотя, например, *при оценке стоимости почв и почвенных ресурсов* в специальной литературе все чаще употребляют термин «земля» и «земельные участки». В таком случае возникает вопрос: почему 2015 год не объявить годом земли, а специалистам в области почвоведения отойти от понятий «почвы», «почвообразовательные процессы», «свойства почв» и их «пространственная организация». Почему так происходит? По-видимому, термин «земля» более *понятный и простой для некоторых специалистов*. Все, что вокруг – и есть земля; и не надо ничего объяснять и изучать какие-то процессы, свойства.

Термины научного почвоведения опираются на специальную теоретическую подготовку и экспедиционную практику. В указанной тавтологии неясно другое: если люди пытаются охарактеризовать пейзаж, то нужно использовать терминологию ландшафтоведения – одного из научных направлений географии. Термин «земля» принадлежит, как известно, учебной дисциплине «Землеведение», предметом изучения которой является, в частности, глубинное строение **Земного шара**, природные ресурсы регионов. Но это совершенно иные **объекты Биосферы** (инога генезиса, состава, стоимости, использования) в сравнении с почвами, например, дачных участков, которые будут скоро облагаться крупным земельным (?) налогом на недвижимость и прибыль (см. фото А-Л). Но при этом ведь следует учесть бонитет почв (**не земли**), уровень их плодородия и характер использования почв на дачных участках.

**ПРИЛОЖЕНИЕ**  
к учебному пособию «Экогеохимия ландшафта»: авторы -  
**И.М. Яшин, И.И. Васенев, В.А. Черников**  
(на фото представлены некоторые почвы и ландшафты – «земли»).



**А**



**В**





**C**



**D**



**E**





**К**



**Л**

Расшифровка индексов к фото: **А** – земли плато Пutorана – далекие и таинственные; **В** – заочкаренный сенокос на подбурах острова Большой Соловецкий; **С** – ландшафты Среднего Поволжья (учхоз «Муммовкое») с черноземами; **Д** - земли Крайнего Севера России (Карелия) таят в своих недрах природные сокровища; **Е** – южно-таежные ландшафты Карелии: водопад «Кивач» - природный феномен и достопримечательность Республики – русло реки Суна пролегает среди коренных горных пород, причем в Карелии (всего одно месторождение на Земле) есть минерал шунгит, в составе которого имеется фуллерен  $C_{60}$ ; **К** – приморские земли (ландшафты) Крайнего Севера Соловков; **Л** – земли Восточных Саян – ландшафты Тувинской Республики – редкие по красоте и богатству различными природными ресурсами – углем, асбестом, золотом, лесами, пушниной, рыбой, плодородными черноземами, полиметаллическими рудами и, возможно, нефтью, газом; здесь мало автострад и отсутствуют железные дороги, поэтому освоение природных ресурсов медленное, нередко без учета экологических рисков.



**М**



**a**

**b**

**Н**

**Расшифровка индексов на фото М, N:**

**М** – сорбционный лизиметр, извлеченный из-под оторфованной лесной подстилки нарушенной почвы в западине **таежного лесопарка в г. Петрозаводске** (см. ниже - **a**); **b** – профиль подзола контактно-осветленного супесчаного в середине склона холма на Лесной опытной даче РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

**Профиль почвы (N-a)** сильно заиленный после вырубki деревьев, переувлажненный, горизонты маскированы компонентами **ВОВ**; профиль (N-b) на Лесной даче иной, причем **маскировка** компонентами **ВОВ** за счет нисходящей водной миграции наблюдается только в верхних подзолистом и иллювиально-железистом супесчаных горизонтах (контактно-осветленный горизонт имеет ярко белесую окраску). Московская морена здесь почти не затронута почвообразованием, а в зоне средней тайги, **под Петрозаводском**, она более интенсивно испытывает оглеение. **На формирование ВОВ большое влияние оказывают плесневые грибы, гифы которых хорошо заметны в сорбционном лизиметре на фото М.** Стоимость почв a,b должны быть разными.



**Учебное издание**

**Яшин Иван Михайлович,  
Васенев Иван Иванович,  
Черников Владимир Александрович.**

## **ЭКОГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТА**

**Учебное пособие**

**Издается в редакции авторов  
Корректурa составителей  
Компьютерный набор Яшина М.И.**

**Перепечатка и использование материалов учебного пособия  
только с разрешения редактора**

---

|                    |   |
|--------------------|---|
| Подписано в печать | 27.11.2015 г. Формат 60x84 <sup>1</sup> / <sub>16</sub> |
| Усл. печ. л.       | Тираж 500 экз. Заказ                                    |

---

Издательство РГАУ-МСХА  
127550, Москва, Тимирязевская ул., 44  
Тел.: 7(499)977-00-12; 977-26-90; 977-40-64