

Теоретическая и прикладная ЭКОЛОГИЯ

№ 3, 2010

Журнал включён в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней доктора и кандидата наук

Учредитель журнала ООО Издательский дом «Камертон»
Генеральный директор ООО ИД «Камертон»
профессор Б.И. Кочуров

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

Т.Я. Ашихмина, д.т.н., профессор, зав. кафедрой химии Вятского государственного гуманитарного университета, зав. лабораторией биомониторинга Института биологии Коми НЦ УрО РАН

Зам. главного редактора

В.В. Гутенёв, д.т.н., профессор Российской академии государственной службы при Президенте РФ, лауреат Государственной премии РФ

Зам. главного редактора

А.И. Таскаев, к.б.н., зам. председателя Президиума Коми НЦ УрО РАН, директор Института биологии Коми НЦ УрО РАН

Зам. главного редактора

И.Г. Широких, д.б.н., зав. лабораторией генетики ГНУ Зональный научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого РАСХН

Ответственный секретарь

С.Ю. Огородникова, к.б.н., доцент, старший научный сотрудник Института биологии Коми НЦ УрО РАН

Журнал издаётся при поддержке ФГУ Государственный научно-исследовательский институт промышленной экологии в рамках ФЦП «Уничтожение запасов химического оружия в РФ»

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере массовых коммуникаций, связи и охраны культурного наследия
Свидетельство о регистрации ПФ № ФС 77-29059

Подписной индекс 82027, 48482 в каталоге Агентства «Роспечать»

Зарубежная подписка оформляется через фирмы-партнёры ЗАО «МК-ПЕРИОДИКА» по адресу: 129110, г. Москва, ул. Гиляровского, 39, ЗАО «МК-Периодика»
Тел.: (495) 281-91-37, 281-97-63. Факс (495) 281-37-98
E-mail: info@periodicals.ru http://www.periodicals.ru

To effect subscription it is necessary to address to one of the partners of JSC «MK-Periodica» in your country or to JSC «MK-Periodica» directly. Address: Russia, 129110, Moscow, 39, Gilyarovskiy St., JSC «MK-Periodica»

Статьи рецензируются. Перепечатка без разрешения редакции запрещена, ссылки на журнал при цитировании обязательны.
Редакция не несёт ответственности за достоверность информации, содержащейся в рекламных объявлениях

Подготовлен к печати в издательстве ООО «О-Краткое» 610000, г. Киров, Динамовский проезд, д. 4, оф. 3
Тел./факс (8332) 32-28-39. E-mail: okrat@okrat.ru
Оригинал-макет, дизайн – Татьяна Коршунова, Денис Бельский
Фото на обложке – Татьяна Коршунова
Перевод – Ирина Кондакова
Выпускающий редактор – Мария Зелаева
Директор издательства «О-Краткое» Евгений Дрогов

Подписано в печать 20.09.2010. Формат 60x84¹/₂. Печать офс. Бумага офс. Усл.п.л. 12,5. Тираж 1150 экз. Заказ № 1984.

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленных материалов в ООО «Кировская областная типография» 610000, г. Киров, Динамовский проезд, 4

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННЫХ СОВЕТОВ

Н.П. Лавёров

председатель межведомственной комиссии при Совете безопасности РФ, вице-президент РАН, академик РАН

ПРЕЗИДИУМ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА:

В.А. Грачёв

д.т.н., профессор, член-корреспондент РАН, председатель Общественного совета Федеральной службы по экологическому, техническому и атомному надзору

В.И. Холстов

д.х.н., директор департамента реализации конвенционных обязательств Министерства промышленности и торговли РФ

В.Н. Чупис

д.ф.-м.н., директор ФГУ Государственный научно-исследовательский институт промышленной экологии

В.Г. Ильницкий

к.э.н., директор ОАО «Научно-исследовательский проектно-изыскательский институт «Кировпроект»

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА:

В.А. Алексеев

д.т.н., профессор Ижевского государственного университета

В.А. Антонов

к.т.н., заместитель начальника экологической безопасности ВС РФ, член-корреспондент Академии геополитических проблем, профессор Академии военных наук

С.И. Барановский

д.т.н., профессор, академик РЭА, заместитель председателя Общественного Совета «Росатом», президент РЭК

Г.А. Баталова

д.с.-х.н., член-корреспондент Россельхозакадемии, ГНУ Зональный научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого

Л.И. Домрачева

д.б.н., профессор Вятской государственной сельскохозяйственной академии

Г.П. Дудин

д.б.н., профессор, директор Центра инноваций Вятской государственной сельскохозяйственной академии

И.А. Жуйкова

к.г.н., доцент Вятского государственного гуманитарного университета

Л.Л. Журавлёва

д.т.н., заместитель директора ФГУ Государственный научно-исследовательский институт промышленной экологии

Г.М. Зенова

д.б.н., профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

В.И. Измалков

д.т.н., профессор Военной Академии Генштаба МО РФ

Г.Я. Кантор

к.т.н., научный сотрудник Института биологии Коми НЦ УрО РАН

Б.И. Кочуров

д.г.н., профессор, ведущий научный сотрудник Института географии РАН

Г.Г. Кузяхметов

д.б.н., профессор Башкирского государственного университета

В.И. Курилов

д.ю.н., профессор, ректор Дальневосточного государственного университета

В.З. Латыпова

д.х.н., член-корреспондент Академии наук Республики Татарстан, профессор Казанского государственного университета им. В.И. Ульянова-Ленина

В.Н. Летов

д.м.н., профессор Российской медицинской академии последипломного образования

Ли Юй

Министерства здравоохранения России

В.А. Малинников

д.т.н., профессор, ректор Московского государственного университета геодезии и картографии

А.Г. Назаров

д.б.н., профессор, заместитель председателя Общественного Совета «Росатом», директор экологического центра ИИЕТ РАН

Ю.Г. Пузаченко

д.г.н., профессор Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова

А.Ф. Радченко

руководитель Аппарата ФГУ Общественная палата

В.П. Савиных

д.т.н., член-корреспондент РАН, профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии, лётчик-космонавт, дважды Герой СССР

В.А. Сысуев

д.т.н., академик Россельхозакадемии, директор ГНУ Зональный научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого

В.И. Теличенко

д.т.н., профессор Академии РААСН, ректор Московского государственного строительного университета

Т.А. Трифонова

д.б.н., профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

А.И. Фокин

депутат Государственной думы, зам. председателя комитета Государственной думы по природным ресурсам, природопользованию и экологии

В.Т. Юнглод

д.и.н., профессор, ректор Вятского государственного гуманитарного университета

О.В. Яковенко

к.ф.н., заместитель начальника отдела экологии Правительство Российской Федерации

По вопросам размещения рекламы и публикации статей обращаться:

610002, г. Киров, ул. Свободы, 122, тел./факс 8 (8332) 37-02-77.

E-mail: ecolab2@gmail.com; ecolab@vshu.kirov.ru

119017, г. Москва, Старомонетный пер., 29,

тел./факс 8(499) 129-28-31. E-mail: info@ecoregion.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ

Е.М. Панкратова Становление функциональных особенностей цианобактерий на путях их сопряжённой эволюции с биосферой 4

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. МОДЕЛИ И ПРОГНОЗЫ

И.М. Янников Построение модели оценки экологической безопасности, прогноза и принятия решений на базе ориентированных графов 12

МОНИТОРИНГ АНТРОПОГЕННО НАРУШЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Т.Я. Ашихмина, Е.В. Дабах, Г.Я. Кантор, А.П. Лемешко, С.Г. Скугорева, Т.А. Адамович Изучение состояния природного комплекса в зоне влияния Кирово-Чепецкого химического комбината 18

ХИМИЯ ПРИРОДНЫХ СРЕД И ОБЪЕКТОВ

Т.А. Михайлова, О.В. Шергина Биогеохимическая миграция элементов-загрязнителей в урбоэкосистеме 27

ЭКОТОКСИКОЛОГИЯ

С.Н. Курсков, О.Ю. Растегаев, В.Н. Чупис Мышьяк в природных системах и его эссенциальность 33

АГРОЭКОЛОГИЯ

А.Д. Темралеева, Д.Л. Пинский Адаптация почвенных цианобактерий и водорослей к воздействию свинца в лабораторных условиях 42

ЭКОЛОГИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

С.Ю. Огородникова, Ю.Н. Зыкова, Г.И. Березин, Л.И. Домрачева, А.А. Калинин Комплексная оценка состояния цианобактерии *Nostoc paludosum* Kütz. при воздействии различных поллютантов 47

СОЦИАЛЬНАЯ ЭКОЛОГИЯ

Ф.М. Хабибуллина, А.Н. Панюков Трансформация микобиоты под влиянием сельскохозяйственного освоения почв в тундровой зоне 52

ПОПУЛЯЦИОННАЯ ЭКОЛОГИЯ

В.Ф. Олонцев, Е.А. Сазонова, Е.А. Фарберова, В.В. Олонцев Создание сорбента и фильтров на его основе для поглощения радионуклидов цезия-137 из питьевой воды 59
А.Г. Демахин, В.Н. Чупис, О.Ю. Растегаев, Н.Н. Кузнецов, А.В. Кошелев Операции рециклирования в технологии переработки арсенита натрия гидролизного 63

ХРОНИКА

И.В. Коньшев, А.Г. Назаров Эволюция представлений о восстановлении земель. II. Античность. Неевропейские и Римская цивилизации 67
А.И. Карпилович, Е.М. Гордеева Международно-правовые принципы устойчивого управления лесами, экологический аспект 77

КРИТИКА И БИБЛИОГРАФИЯ

Г.М. Зенова, Н.А. Манучарова, М.С. Дуброва Температурные адаптации мицелиальных бактерий почв тундры и тайги 82
А.И. Видякин Изменчивость количества семян сосны обыкновенной производственной и опытной заготовки на Северо-Востоке Русской равнины 90
XVI Международная конференция «Экологическое образование в интересах устойчивого развития» 96

Три жизни великого микробиолога: Документальная повесть о Сергее Николаевиче Виноградском 98

CONTENTS

THEORETICAL PROBLEMS of ECOLOGY

E.M. Pankratova Establishment of functional peculiarities of Cyanobacteria all the way of their evolution with biosphere 4

METHODOLOGY And METHODS of RESEARCH. MODELS And FORECASTS

I.M. Yannikov The model of ecological safety evaluation, prognosis and taking decisions on the basis of orientated graphs 12

MONITORING of ANTHROPOGENICALLY DAMAGED TERRITORIES

T.Ya. Ashikhmina, E.V. Dabakh, G.Ya. Kantor, A.P. Lemeshko, S.G. Skugoreva, S.A. Adamovich Research of the state of the natural complex within the zone of influence of Kirovo-Chepetsk chemical plant 18

CHEMISTRY of NATURAL ENVIRONMENT And OBJECTS

T.A. Mikhailova, O.V. Shergin Biogeochemical migration of pollutants in an urban ecosystem 27

ECOTOXICOLOGY

S.N. Kurskov, O.Yu. Stegayev, V.N. Chupis Arsenic in natural ecosystems and its essentiality 33

A.D. Temraleeva, D.L. Pinskiy Adaptation of soil cyanobacteria and algae to the impact of lead in laboratory conditions 42

S. Yu. Ogorodnikova, Yu. N. Zikova, G. I. Berezin, L. I. Domracheva, A. A. Kalinin Complex state evaluation of the cyanobacteria *Nostoc paludosum* Kütz. under the influence of different pollutants 47

AGRICULTURAL ECOLOGY

F.M. Khabibullina, A.N. Panyukov Microbiota transformation under the influence of agriculture in tundra zone 52

INDUSTRY ECOLOGY

V.F. Olontsev, E.A. Sazonova, E.A. Farberova, V.V. Olontsev Creating an absorbent and filters on its ground for absorbing radionuclides of cesium-137 from drinking water 59

A.G. Demakhin, V.N. Chupis, O.Yu. Rastegayev, N.N. Kuznetsov, A.V. Koshelev Recycling in the technology of processing hydrolytic sodium arsenate 63

SOCIAL ECOLOGY

I.V. Konishev, A.G. Nazarov Evolution of ideas of soil remediation. II. Antique world. Non-European and Rome civilization 67

A.I. Karpilovich, E.M. Gordeyeva International law principles of sustainable management of forests, ecological aspect 77

ECOLOGY of POPULATIONS

G.M. Zenova, N.A. Manucharova, M.S. Dubrova Temperature adaptation of mycelium bacteria of tundra and taiga soils 82

A.I. Vidyakin Changeability of the number of cotyledons of *Pinus silvestris* L. seeds in production and experimental parties in North-East of the Russian Plain 90

CHRONICLE

XVI International conference «Ecological education for sustainable development» 96

BIBLIOGRAPHY

Three lives of the outstanding microbiologist: documentary novel about Sergey Nikolayevich Vinogradskii 98

Становление функциональных особенностей цианобактерий на путях их сопряжённой эволюции с биосферой

© 2010. Е. М. Панкратова, д.б.н., профессор,
Вятская государственная сельскохозяйственная академия,
e-mail: n-mflora@rambler.ru

Акцентируется внимание на функционально-морфологических особенностях цианобактерий, связанных с условиями их появления и жизни в составе биосферы 4,5 млрд. лет назад в первородном океане как продуцентов цианобактериальных комплексов (плёнок). Экстремальные условия обитания приводили к возникновению и развитию уникальных физиологических и биохимических свойств цианобактерий, сохранивших их в условиях современной биосферы. Формирование новых функций у фототрофного партнёра комплекса вызвало изменения в составе эукариотных спутников (редуцентов и консументов) комплекса, продолжив жить как единый организм. Предлагается писать термин «цианобактерии» через дефис. Рассматривается результативность функционирования цианобактерий в современных почвах в виде самоорганизованных систем и симбиозов.

The main attention is paid to functional-morphological peculiarities of cyanobacteria, they are connected with the conditions of cyanobacteria's appearing in life and structure of biosphere 4,5 billions years ago in the primeval ocean as producers of cyanobacteria films. Extreme conditions caused appearing and development of unique physiological and biochemical properties of cyanobacteria that provided their preserving in the conditions of the contemporary biosphere. Formation of new functions of the phototrophic partner of the complex caused changes in the structure of their eukaryote partners (reducers and consumers) of the complex that continued living as one organism. It is supposed that the term 'cyano-bacteria' should be written in hyphen. Results of cyano-bacteria functioning in the form of self-organized systems and symbioses in contemporary soils are considered.

Ключевые слова: эволюция биосферы, цианобактериальные комплексы, физиология, биохимия, адаптация, симбиотические связи

Key words: biosphere evolution, cyano-bacteria complexes, physiology, biochemistry, adaptation, symbiotic relations

Введение

Цианобактерии (ЦБ) привлекают пристальное внимание, особенно с середины XX века, микробиологов, физиологов, цитологов, биохимиков, генетиков и исследователей общепланетарных процессов. Ссылки на результаты этих работ можно найти у философов, космофизиков и астрономов. Повышенный интерес объясняется по крайней мере двумя причинами. Прежде всего тем, что ЦБ стояли у истоков жизни на Земле, и этот факт доказан палеонтологической летописью, они принимали участие в развитии первичной биосферы. Кроме того, вызывает удивление бессмертие ЦБ. Зародившись на Земле 3–4 млрд. лет назад, они успешно проществовали до нашего летоисчисления, заставляя иногда озадаченно констатировать их массовое развитие в современных экотопах, где они могут вести себя как агрессоры-экстремалы. Самое сложное, касательно ЦБ, сводится к следующему. Земля как космическое тело возникла 4,6 млрд. лет назад. Такая оценка

является сегодня общепризнанной [1]. Существование ЦБ чётко датировано 3,5 млрд. лет назад в составе уже сложно организованной биосферы. Значит, за немислимо короткое время после образования Земли как планетного тела эти организмы обрели функции, позволявшие им стабильно существовать в невероятно трудных условиях: полной незащищённости от жёсткой радиации, чрезвычайной сейсмичности, перепадов температур и давлений в газовой атмосфере, очень далекой по составу от современной. Каким образом они выживали и выжили? Каким образом пережили и дальнейшие исторические бифуркации при развитии биосферы? То есть в чём секреты жизнеспособности ЦБ, каков характер эволюции, приведший эти организмы к беспрецедентной устойчивости в веках и современных биотопах? История становления функциональных особенностей и последующая эволюция этих микроорганизмов неотделимы от геологической истории планеты. Настоящее и будущее любого организма зависит от прошлого. Эту степень зависимости

называют «памятью». Конечно, это абстрактное понятие, но оно иногда оказывается хорошей интерпретацией многих процессов.

Автор делает попытку свести воедино космогеологические данные, в эпоху, соответствующую палеонтологическим находкам этих организмов; проследить возникновение основных функций и связей; обрисовать специфику сопряжённости их эволюции с биосферной системой тех эонов и, наконец, высказать гипотезы, объясняющие их жизнедеятельность. Автор заведомо отдаёт себе отчёт об объёмности и неполной разрешимости многих вопросов. И тем не менее я надеюсь, что «эмпирическое обобщение» будет полезным. Этим термином принято называть некоторое утверждение, которое не противоречит нашему опыту [1]. Логично предположить, что становление функциональных особенностей ЦБ нужно искать в истоках их развития. Но, прежде чем отправляться в «туманное далеко», к началу всех начал, необходимо сознаться, что экспериментально проверить (смоделировать) многие домыслы нельзя ни сегодня, ни в будущем. Единственный путь для рационального мышления при реконструкции картин далёкого прошлого – это использование принципа актуализма – стремление отталкиваться от современных аналогов, хотя ясно, что на заре нашей планеты существовали другие условия, которые ныне совершенно немыслимы. И все же другого пути нет. Гротескно, но принцип Чарльза Лайеля «Настоящее есть ключ к прошлому» лежит в основе каждого исследования.

В предлагаемой работе не рассматриваются гипотезы, связанные с происхождением жизни. Вслед за математиком, экологом широкого профиля Н. Н. Моисеевым [1] приходится констатировать, что, несмотря на огромные достижения науки XX столетия, она, как и во времена В. И. Вернадского, беспомощна в своих попытках открыть завесу над важнейшей земной тайной – тайной жизни. Эта тайна, как и много лет назад, остаётся уделом гипотез, не подкреплённых достаточно надёжным эмпирическим материалом. «... Этот «проклятый вопрос» о происхождении живого из неживого на протяжении истории не только биологии, но и естествознания, будучи его эпицентром, так и продолжает крутиться, обретая лишь новые аспекты» [2, стр. 43]. Следует неоптимистический вывод, что с помощью тех средств познания, которыми наука располагала в конце второго тысячелетия, проблема, видимо, неразрешима.

Настоящая работа имеет целью показать, что физиолого-биохимические свойства, присущие современным ЦБ, сформировались сопряжённо с эволюцией биосферы. В эту рабочую гипотезу вкладываются собственные многолетние исследования автора по экологии, биологии, физиолого-биохимическим особенностям преимущественно азотфиксирующих ЦБ. Причины уникального своеобразия ЦБ, выражающегося в сохранении «доисторической» морфологии и, вопреки дарвиновскому отбору, широкой палитры физиолого-биохимических реакций, сформировавшихся миллиарды лет назад и дошедших до условий современной биосферы, вряд ли к настоящему времени стали более ясными. И все же эти вопросы нуждаются в обсуждении, ибо, как написал Хорган: «Ни одна другая область науки не отягощена так своим прошлым, как эволюционная биология» [3, стр. 187].

Ископаемые – свидетели далекого прошлого

Самым ранним свидетельством жизни на Земле стали докембрийские ископаемые прокариот, найденные в отложениях с возрастом 3,3–3,5 миллиарда (временная шкала архея, второго периода докембрия лежит в интервале 2,5–4,5 млрд. лет) серии Онфервахт зеленокаменного пояса Барбетон Южной Африки и серии Варравува кратона Пилберг Австралии [4].

Есть сообщения и о более древних находках – 3,8 млрд. лет назад в Исуа, Гренландия [4]. Поиски окаменелостей (микрофоссилий) велись по всему свету. Они были найдены около Рихарта в Мавритании, на островах около Канады, в рифейских отложениях Южного Урала, в Восточной Сибири и Анабарском массиве. Было бы опрометчиво и далее перечислять все известные на сегодняшний день более поздние находки, всё равно такой реестр окажется в рамках предложенной работы достаточно эклектичным, ибо возникло совершенно новое направление работ микробиологов – бактериальная палеонтология, результаты которого обобщены в одноименной книге [4]. Общий вывод этого научного направления таков: нахождение ЦБ в эпоху докембрия к концу XX столетия стало непреложным фактом.

Самым прочным из всех существующих средств консервации был, несомненно, раствор кремнезёма, пропитавший клетки и

затвердевший в кремни. Хорошо сохранились фоссилизированные трихомы ЦБ даже с видимыми перегородками между клетками при их фосфатизации.

Останки ЦБ обнаружены в виде окаменевших индивидуумов (что встречается нечасто), окаменевших цианобактериальных плёнок и матов, строматолитов. Обычно фоссилии одиночных экземпляров представлены как пустые отпечатки (иногда с видимым коллапсированным содержимым) в минеральной матриксе. Значительно более однозначную для анализа картину представляют биоплёнки, трансформирующиеся в процессе развития в цианобактериальные маты и строматолиты. Биоплёнки – колонии ЦБ, образующие большое количество внеклеточных полимерных веществ, состоящие обычно более чем из одного вида организмов. Цианобактериальный мат представляет собой плотную сложную ткань, сложенную множеством переплетённых нитей трихомных организмов (преимущественно ЦБ), погруженных в слизь, в которую заключены и другие бактерии [5].

Но фокус внимания исследователей сосредоточен на строматолитах, описание которых уже вошло в школьные учебные пособия [6]. Внешний вид современных строматолитов приведён в ранее опубликованной нами работе [7]. Можно кратко подвести итоги этих исследований. Строматолиты (каменные ковры, колонны) – это органоседиментационные структуры, возникшие в результате взаимодействия ЦБ с гетеротрофными бактериями и процессов осадконакопления. ЦБ в строматолитах являлись первичными продуцентами органического вещества.

Окаменелые микрофоссилии изучаются в стандартных петрографических шлифах, в проходящем свете с помощью сканирующего микроскопа. Кроме исследования особенностей морфологии определяются соотношения изотопов, например ^{12}C и ^{13}C (для обнаружения фотосинтеза), и химические биомаркеры распавшихся производных первоначального органического углерода, из которого образуются микроорганизмы.

Определение возраста биоископаемых проведено по древнейшим из известных минералов, где обнаружены микрофоссилии (уран/свинцовым методом, калий/аргоновым, рубидий/стронциевым). Древнейший из известных минералов найден в Австралии – 4,2 млрд. лет. Кстати, возраст метеоритов и собранного лунного грунта варьирует от 4 до 4,5 млрд. лет.

Исследования согласно подтверждают, что обнаруженные фоссилии биологического происхождения принадлежат преимущественно ЦБ и имеют возраст не менее 2,5–3,5 млрд. лет.

Что же удалось узнать об окаменелостях тех периодов? Отмечается, что большинство остатков докембрийских микроорганизмов имеет аналоги среди 5-6 различных современных морфологически сходных организмов с учётом постмортальных преобразований [4]. Традиционно считается, что в докембрии встречаются преимущественно сфероморфные оболочки (иногда с коллапсированным протопластом) кокковидных форм ЦБ и их цисты, чехлы нитчатых, реже – стенки чехлов и нитей. Наиболее уверенно по ископаемым остаткам идентифицируются представители порядков *Chroococales*, *Entophysalidales* и *Oscillatoriales* [4, 8].

К началу начал. В каком мире жили первые цианобактерии

Оперируя столь древним возрастом ЦБ, мы ощущаем необходимость повествования о происхождении Земли и влияния на неё Солнечной системы.

Сведения будут приведены очень кратко и с минимальным обсуждением, так как выходят за рамки компетенции автора-биолога, но с привлечением самых распространённых гипотез, основанных на недавних открытиях, формирующих новый ракурс во взглядах на Солнечную систему. Объём их будет приведён ровно таким, какой может быть полезен для последующих рассуждений об эволюции функциональных особенностей ЦБ. Итак, нам необходимо окунуться в глубины миллиардов лет, чтобы понять условия жизни ЦБ на юной Земле... Гипотеза о происхождении Земли нужна автору для ощущения «логической завершённости» той системы становления ЦБ, которую он конструирует дальше.

Имеется много гипотез о происхождении нашей Солнечной системы и Земли. Мы сочли возможным представить лишь последнюю теорию, связанную с представлением о Большом взрыве (Big Bang). Она основана на том, что вся масса Вселенной была сжата в исходную «каплю» космоса. Неизвестно, в силу каких причин точечное состояние было нарушено и произошло то, что обозначается сегодня словами «Большой взрыв». Согласно сценарию вся наблюдаемая сегодня Вселенная размером в 10 миллиардов световых лет

в несколько долей секунды (10^{-30} – 10^{-35}) расширялась экспоненциально. Разлетаясь, расширяясь во все стороны, материя отодвигала «безбытие», творя пространство и начало отсчёта времени. «Инфляционная эпоха» подошла к концу через микродоли секунды после Большого взрыва, когда единственная сила, действовавшая тогда в пространстве, – единое фундаментальное взаимодействие – распалась на отдельные связи. Концепция Большого взрыва получила подтверждение в связи с тем, что он оставил в космосе своего рода следы – память. Пространство Вселенной оказалось пронизано радиоволнами миллиметрового диапазона, разбегающимися равномерно по всем направлениям. Это «реликтовое излучение Вселенной» и есть приходящий из прошлого след сверхплотного, сверхраскалённого её состояния, когда не было еще ни звёзд, ни туманностей, а материя представляла собой догалактическую плазму. В настоящее время делается попытка моделирования теории Большого взрыва с помощью адронного коллайдера, ускоряющего частицы, состоящие из кварков. Опыт проводится Европейским советом ядерных исследований на границе Швейцарии и Франции. Что из этого получится – увидим.

Ну, а далее нам трудно представить происходящее, тем более что предлагаемые гипотезы исключают (не допускают) возможность любого моделирования из-за неизвестных первичных посылов.

Солнце и сопутствующие ему планеты оказались на периферии своей Галактики (Млечный Путь) в одном из её спиральных рукавов на расстоянии 25 тысяч световых лет от её центра. Всему на Земле несказанно повезло, что мы оказались в глубокой провинции от центра. В конце XX века учёные узнали, как на самом деле выглядит Млечный Путь и что происходит в его центре. Получившееся ошеломительно. Ядро нашей Галактики – место безумной активности, где происходят десятки и сотни взрывов сверхновых звёзд. Между этими распухающими в космосе исполинскими огненными пузырями пышат рентгеновским жаром небольшие чёрные дыры – эти остатки «провалившихся» внутрь себя (коллапсировавших) массивных звёзд раз в 8–10 больше Солнца. «...Все это раскалённое, бешеное, беззвучно грохочущее месиво вдобавок ещё и стремительно вращается...» [9]. Солнечная система оказалась в особом участке Галактики, получившем название Местный Пузырь

(«Local Bubble»), радиусом примерно 100 световых лет. Внутри него плотность межзвездного газа много ниже, чем в окружающем пространстве. Местный Пузырь образовался каких-нибудь 2–5 миллионов лет назад. До его образования Солнце со своими планетами прокладывало себе путь сквозь более плотный газ, а жизнь на Земле уже существовала (и ЦБ, конечно).

Бактериальная палеонтология и филогенетический анализ дали основание для заключения, что возможный срок появления ЦБ имеет реперную отметку – ранний архей [4]. Срок оказался сопоставим с возрастом Земли. Картину изменения условий на Земле, начиная с раннего докембрия – оттуда берёт начало летопись цианобактериальной палеонтологии – до наших дней, придётся рисовать не в художественной манере, например, Карла Брюллова (акварель с точечными мазками и предельно чёткой детализацией объекта), а только в манере крупномазковой живописи, к примеру, Ильи Репина в последние годы его творчества. Кстати, она при созерцании картины требует определённого угла зрения. Ну, что же! Это не явится помехой при обсуждении вынесенной в заголовок рубрики.

И ещё одно упрощение, которое мы вынуждены принять на первых порах при попытке выяснить направления становления физиолого-химических функций ЦБ: мы сознательно будем рассматривать эволюцию этих организмов с позиции аутоэкологии, хотя в последнее время стало совершенно очевидно, что на эволюционном пути ЦБ биологический индивид вряд ли существовал долго. Возоблаждает мнение, что живые организмы появились на Земле сразу в виде экосистемы со структурой первичных продуцентов (роль которых тогда в большинстве случаев выполняли ЦБ), консументов и редуцентов [10]. Очевидно, что существование таких природных экосистем определяется доминантной ролью организма продуцента.

Условия раннеархейского периода частично реконструированы по многим параметрам. За время жизни Земли светимость Солнца увеличилась приблизительно на 37–38% с $2,8 \cdot 10^{33}$ до $3,86 \cdot 10^{33}$ эрг/с. Соответственно этому изменилась и солнечная постоянная: 4,6 млрд. лет назад она была $S \approx 1 \cdot 10^6$ эрг/см²; современное её значение $1,37 \cdot 10^6$ эрг/см². Такое заметное изменение должно было сказаться и на прошлых климатах Земли [11].

Солнце выбрасывало в окружающее пространство длинные огненные рукава –

протуберанцы, что оно делает и сейчас. Разница лишь в том, что Земля в то время не имела озонового слоя атмосферы, защищающего ЦБ от вредного ультрафиолетового излучения. Кроме того, вблизи от Земли регистрировались гамма-вспышки – мощные пучки высокоэнергетичных гамма-лучей, во много раз превосходящих энергию рентгеновских лучей. Предполагается, что эти вспышки выбрасывались при столкновении «чёрных дыр», образовавшихся на ранней стадии эволюции Вселенной. (Кстати, они регистрируются и сейчас в самых разных частях небосвода.)

На Землю падали астероиды и метеориты, около неё пролетали кометы и болиды. В начале 1984 г. в Антарктиде были обнаружены осколки самого древнего на данный момент метеорита. Эксперты утверждают, что его падение произошло 4 млрд. лет назад [4]. Пролёт около Земли болидов сопровождался мощными взрывными явлениями, что вызывало землетрясения с сильной ударной волной.

Сама Земля в это время проходила длительный геотектонический этап с периодическими погружениями и подъёмами различных зон, сопровождающимися землетрясениями и извержением бесчисленных вулканов, выбрасывающих лаву и пепел. На Земле постепенно возникли атмосфера и гидросфера – моря, океаны и т. д. Возникли они за счёт дегазации лав, выплавляющихся из верхней мантии Земли при интенсивном вулканизме. Предполагают, что первичная атмосфера Земли могла быть восстановительной и значительно более плотной, чем современная. Для того чтобы представить себе её состав, обычно обращаются к среднему составу газов, выделяющихся при извержении современных вулканов. Пары воды и CO_2 должны были быть основной частью ранней атмосферы. К ним добавлялись H_2S , CO , H_2 , N_2 , CH_4 , NH_3 , HF , HCl , Ar и другие. Среди компонентов, высвобождающихся из земных глубин, могли преобладать метан и аммиак. Свободный кислород не был задан при рождении Земли как небесного тела. Основная масса азота атмосферы выделилась за счёт дегазации мантии.

В середине архея возник Мировой океан. При отсутствии атмосферы температура излучающей поверхности была около 15°C . За этот счёт и образовались океаны [4]. Судя по изотопно-кислородным сдвигам в архейских кремнистых сланцах, а также привлекающая теорию разделения вещества Земли по плотности, в результате которого тяжёлые элементы сосредоточились в ядре, а лёгкие

образовали кору, Земля сильно разогрелась. Температура морских вод достигла в архее $70\text{--}90^\circ\text{C}$ [11]. Исследователи сходятся в том, что состав воды в первичном океане был близок к современному. Жизнь возникла в океане, и, по-видимому, первые миллиарды лет она была чисто океанической. Но постепенно, после того как возник озоновый экран, она захватила и значительную часть суши. В любом случае ничего похожего на современные материки ни по форме, ни по местоположению не было.

После того как температура океана в конце архея (2,4 млрд. лет назад) опустилась до $+2\text{--}+8^\circ\text{C}$, последовало резкое похолодание климата, и практически все континенты, объединённые тогда в единый суперконтинент – Моногею, оказались скованными гигантским покровным оледенением (Гуронское оледенение). Толщина ледяного покрывала достигала 2–4 км [4].

Предполагают, что следующее за Гуронским оледенением произошло в сигурийском периоде. Оледенения становились причиной серьёзных земных катастроф, возможно, глобально изменивших биосферу нашей планеты. В позднем рифее и венде наступила новая эпоха оледенений [12].

С наступлением фанерозоя давление земной атмосферы вновь начало подниматься за счёт усиленной генерации кислорода. Вместе с этим поднималась и температура вплоть до наиболее тёплого периода – мезозоя [12, 13].

В настоящее время история развития биосферы датирована достаточно точно и её развитие научно аргументировано развитием ЦБ.

Эколого-актуалистический подход. «Рисковые» цианобактерии

Оставив, возможно, незаслуженно в стороне гипотезу панспермии при обсуждении зарождения жизни на Земле, остановим внимание на возможных способах выживания древних ЦБ и формирования у них свойств, приведших к сохранению этих организмов до настоящего времени. Многие в этом плане позволили сделать ископаемые остатки ЦБ, ископаемые строматолиты, окаменевшие микробные консорциумы – достоверные следы жизни на Земле и единственные точки опоры при анализе существования древних ЦБ.

Начнём с того, что не вызывает сомнений при настоящем уровне знаний о древних ЦБ. Прямые свидетельства показали, что 3,5–2,5

миллиарда лет назад в нижнем протерозое присутствовали почти все основные морфотипы современных ЦБ. Их не так много: формы либо одиночные коккоидные, либо объединённые в микроколонии – агрегаты, склеенные наружными частями оболочек (пальмеллоидное состояние). Для многоклеточной структуры характерной формой является нить-трихом из цилиндрических клеток, очень варьирующих по высоте и диаметру, вплоть до образования на конце нити волоскоподобных клеток [8].

Широкая географическая область распространения ЦБ находилась в межконтинентальных бассейнах прошлого. Современные ЦБ также предпочитают любые солоноводные и пресные водоёмы. Они находятся на поверхности донных отложений, растений и в планктоне, развиваются иногда в массе, вызывая «цветение» водоёмов. Необходимо особо отметить океанический одноклеточный пикопланктон. ЦБ, являющиеся непременной составляющей микробиоты почв, хронологически появились на Земле позже.

По-видимому, первичными поселенцами в воде были фитопланктонные организмы, которые использовали биогены и растворённые газы за счёт осмотрофии. Однако, пассивно паря в толще воды, клетки быстро «выедали» из непосредственного окружающего их слоя все биогены. Поэтому ЦБ нашли выход для движения воды около них в прикреплении к неподвижному субстрату, используя гликокаликс (выделяемую слизь) [6]. Фоссилизированные участки его удалось наблюдать в ископаемом состоянии [5]. Второй способ большего контактирования с водой – это организация плавающих матов – структур, характерных для внутренних водоёмов мезозоя, кроме систем, традиционно считавшихся морскими. Жизнь активно гнездилась в те времена на окраинах континентов, где формировались обширные мелководные бассейны.

Прошлое даёт исходный материал для формирования представлений о реликтовой деятельности (функциях) ЦБ, судя даже по их отпечаткам. Анализ ископаемых остатков показал, что к моменту их окаменения (т. е. 2–3 млрд. лет назад) ЦБ обладали разнообразными сложными физиологическими возможностями.

При чётко выраженном клеточном строении и довольно разнообразной морфологии они имели по крайней мере несколько пигментов – фикобилины, хлорофилл, сцитонемин, каротин, возможно, меланины. Есть серьёзные основания полагать, что первичной функцией

этих пигментов была нейтрализация разрушительной для клетки энергии квантов УФ, беспрепятственно проникающих в те времена сквозь лишённую озонового слоя атмосферу [14].

В начале начал лежал наиболее древний и примитивный серный тип фотосинтеза, использующего в качестве восстановителя водород сероводорода, входящего в состав первичной атмосферы. Можно считать «памятью прошлого» сохранение серного пути фотосинтеза у современных видов ЦБ – *Oscillatoria limnetica*, штаммов pp. *Lyngbya*, *Phormidium* и *Aphonotece* [15], что свидетельствует о более широких возможностях метаболизма ЦБ в анаэробных условиях, чем считалось ранее.

Имеется обширная литература с обзорными публикациями о возникновении оксигенного фотосинтеза у древних прокариот [15]. Для его регистрации использован метод изотопного анализа углерода. Оксигенный фотосинтез у ЦБ был самым выгодным путём для получения энергии.

Фиксация молекулярного азота – процесс восстановительный. Содержание азота в первичной атмосфере было изначально высоким. Следовательно, обстановка была благоприятна для азотфиксации. Современные ЦБ также предпочитают для развития и азотфиксации анаэробные, микроаэробные или микроаэрофильные (где кислорода в среде нет, но он генерируется при фотосинтезе) условия, в силу чего они занимают, например, чеки рисовых полей, характеризующиеся резко восстановительными условиями [16].

Способность к азотфиксации весьма существенна для роли первичных продуцентов. Интересно, что в составе современного пикопланктона олиготрофного океана, соответствующего состоянию биосферы и биоты в прошлом, найдена ЦБ *Synechococcus* sp., оказавшаяся способной к диазотрофии [17].

Выживаемость древних ЦБ, по всей вероятности, обусловлена несколькими причинами. Прежде всего формированием и сохранением в их клетках, как показано выше, разных способов добывания энергии, способности трансформировать обмен веществ синхронно изменяющимся условиям и, пожалуй, самое главное – способности ЦБ использовать в процессе выживания симбиотические связи [18], среди которых на первое место выходят связи с гетеротрофными бактериями, поселяющимися в околклеточной слизи ЦБ.

Одно очевидно, что ЦБ никогда не существовали как самостоятельный организм.

Как показали дальнейшие лабораторные исследования, в слизи ЦБ обнаруживаются обязательные бактериальные спутники, которые придают устойчивость системе и приводят к изменению её функционирования при изменении внешних условий. ЦБ, временно лишённые этих спутников, теряют жизнеспособность [18, 19]. В присутствии же их они могут сохраняться при регулярных пассажах культур в музеях в течение десятков лет. Таким образом, применяя подходы, принятые к системе гриб–водоросль в лишайнике, правомочно сделать вывод, что термин «цианобактерии» нужно писать через дефис – «циано-бактерии».

Физиолого-биохимические особенности современных цианобактерий

Биологические и функциональные особенности ЦБ, несомненно, определяются условиями формирования и выживания этой группы столь необычных организмов.

Уже не поражает их выносливость к самым разнообразным условиям. Они активно размножаются в настоящее время в морских и пресных водах, в гейзерах, солёных озерах и почвенных солёных маршах (на солонцах и солончаках). Их можно найти на памятниках и камнях, во льдах Антарктиды и в песках Сахары, в пещерах, на шерсти белых медведей, на надкрыльях жуков. Не обнаружено ни одного типа почв, которые бы не содержали эти микроорганизмы.

Анализ функциональных возможностей ЦБ приводит к выводу, что эти организмы почти универсальны. Им свойственны самый древний тип фотосинтеза с участием хлорофилла *a* и I-фотосистемы, миксотрофия и,

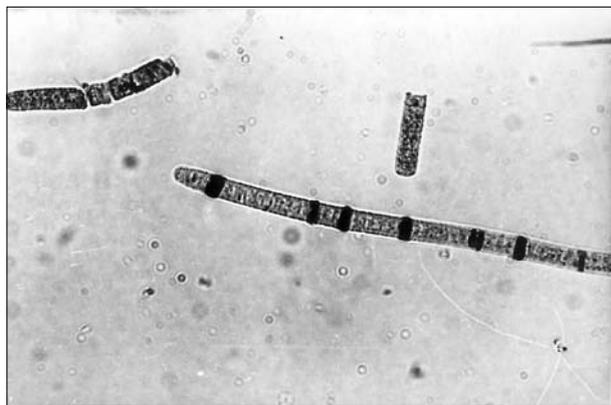


Рис. 1. Нити *Phormidium inundatum* шт. 243 ВГСХА, обработанные ТТХ. Увеличение $\times 2200$. Длительность экспозиции с ТТХ – 10 мин. Условия культивирования ЦБ микроаэробные [21]

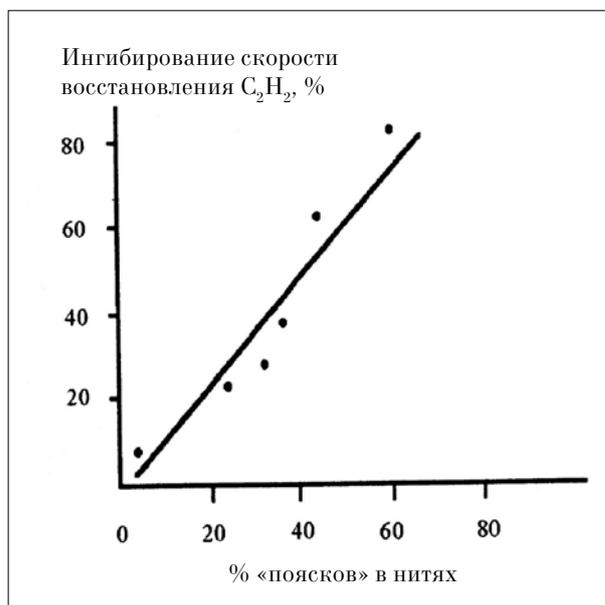


Рис. 2. Корреляция между восстановлением ТТХ в «поясках» и ингибированием нитрогеназной активности у *Phormidium inundatum* шт. 243. Восстановление C₂H₂ измерялось после отмывания ЦБ от ТТХ и ресуспензирования в профильтрованную ростовую среду

по-видимому, более широкое распространение азотфиксации, чем предполагалось ранее. До середины XX века была принята парадигма, что только обладающие гетероцистами ЦБ способны к азотфиксации. Гетероцисты представляют собой внешне пустотелые клетки, лишённые пигментации, следовательно, не генерирующие кислород. Представлялось, что они наилучшее место для восстановительного процесса фиксации азота. Однако позднее было показано, что к азотфиксации способен ряд одноклеточных ЦБ [16]. В последнее время нами получены оригинальные данные, которые показали, что в микроаэробных условиях в нитчатых ЦБ, не образующих гетероцист, возникают зоны повышенной восстановительной способности [19], что было доказано с помощью использования тетразолийхлорида (ТТХ) (рис. 1). При забивании этих зон тетразолием усвоение ¹⁵N₂ резко сократилось. Это доказывает, что именно они являются местом фиксации азота (рис. 2). Методика проведения эксперимента описана в цитируемой работе.

Размеры фиксации азота колеблются в различных экотопах, достигая 150–200 кг/га [20]. Эта величина, по-видимому, не окончательная, так как не учитывает азотфиксацию у безгетероцистных ЦБ.

Водный режим у ЦБ столь своеобразен, что они могут высыхать до воздушно-сухого состояния, оставаясь живыми, и почти мгновенно

венно набухать, образуя плотные слизистые плёнки.

ЦБ выносят полную солнечную инсоляцию и столь сильное затемнение, что довольствуются мерцающими факелами в экскурсионных пещерах. Современные ЦБ сохранили миксотрофию и способность перехода дыхания от аэробного к анаэробному. Эти организмы могут накапливать в клетках кальций, кремний, фосфор.

Особенно важными являются разработки о чрезвычайно ёмком геноме ЦБ, вместившем в себя все эволюционные пробы биосферы, если принять, что смерть не была запрограммирована в их генетическом механизме. ЦБ могли погибнуть от случайных причин, но они не знали проблему апоптоза. Именно этим определяется их чрезмерная стабильность. Поэтому первоначальный смысл, который вкладывается в бессмертие цианей как организмов, проществовавших с архея до современного летоисчисления, вероятно, будет расширен за счёт фактологического понятия об отсутствии у них генной системы, определяющей смерть. Уникальны ли они в этом отношении среди других прокариот, пока сказать трудно.

Литература

1. Моисеев Н.Н. Путь к очевидности. Расставание с простотой. М.: Аграф, 1996. 471 с.
2. Гутина Н.Н. Живое и космос: воспроизводима ли жизнь? (К теории вопроса). М.: Агар, 2001. 43 с.
3. Хорган Д. Конец науки. Взгляд на ограниченность знаний на закате Века Науки. С.-Пб.: Амфора/Эврика, 2001. 187 с.
4. Бактериальная палеонтология. М.: ПИН РАН, 2002. 198 с.
5. Герасименко Л.М., Ушатинская В.Т. Цианобактерии, цианобактериальные сообщества, маты,

биоопленки // Бактериальная палеонтология. М.: ПИН РАН, 2002. С. 36–47.

6. Еськов К.Ю. История Земли и жизни на ней. М.: Нирост, 2000. 351 с.
7. Панкратова Е.М. Почвенные цианобактерии в прошлом Земли. Их экологическая роль в настоящем и возможная в будущем // Экология и почвы: Всерос. школа. Избранные лекции. Пущино. 2001. С. 39–48.
8. Бурзин М.Б. Тенденции в эволюционной бентосной растительности в позднем докембрии // Альгология. 1996. Т. 6. № 4. С. 407–426.
9. Нудельман Р. Что мы знаем и чего не знаем о чёрных дырах // Знание – сила. 2003. № 15. С. 85–87.
10. Вернадский В.И. Живое существо в биосфере. М.: Наука, 1994. 669 с.
11. Сорокин О.Г., Ушакова А. Глобальная эволюция Земли. М.: Изд. МГУ, 1991. 445 с.
12. Эттенборо Д. Жизнь на Земле. М.: Мир, 1984. 176 с.
13. Буденко И.И. Климат в прошлом и будущем. М.: Гидрометиздат, 1980. 351 с.
14. Пиневиц А.В., Аверина С.Т. Кислородная фототрофия. С.-Пб.: Изд. С.-Петерб. университета, 2002. 233 с.
15. Гусев М.В., Никитина К.А. Цианобактерии. М.: Наука, 1979. 228 с.
16. Панкратова Е.М. Участие цианобактерий в круговороте азота в почве и создание её плодородия // Успехи микробиологии. 1987. Т. 2. С. 212–242.
17. Заварзин Г.А. Эволюция геосферно-биосферной системы // Природа. 2003. № 1. С. 27–35.
18. Панкратова Е.М., Трефилова Л.В. Симбиоз как основа существования цианобактерий в естественных условиях и искусственных системах // Теоретическая и прикладная экология. 2007. № 1. С. 7–14.
19. Панкратова Е.М., Бородин Н.В., Резник Е.Н. Фиксация азота негетероцистной цианобактерией *Phormidium inundatum* // Микробиология. 1998. № 6. Т. 67. С. 754–761.
20. Pankratova E.M. Functioning of cyanobacteria in soil ecosystems // Eurasian Soil Science. 2006. V. 39. P. 118–127.

Построение модели оценки экологической безопасности, прогноза и принятия решений на базе ориентированных графов

© 2010. И. М. Янников, к.т.н., доцент,
Ижевский государственный технический университет,
e-mail: mari_tel@mail.ru

Статья посвящена решению вопроса автоматизированной оценки экологической безопасности в зоне влияния потенциально химически опасных объектов. Предложена модель оценки безопасности на основе ориентированных графов с использованием экологических, технических, технологических и социальных параметров.

The article solves the problem of automated evaluation of ecological safety within the zone of influence of potentially dangerous chemical objects. A model of safety evaluation is given on the basis of orientated graphs considering ecological, technical, technological and social parameters.

Ключевые слова: модель оценки, экологическая безопасность, потенциально опасный объект, ориентированный граф, параметры воздействий, принятие решений

Key words: model of evaluation, ecological safety, potentially dangerous objects, an orientated graph, parameters of influence, taking decisions

Возросшие требования к обеспечению надёжности и безопасности технических систем и устройств повлияли на дальнейшие исследования возникновения аварий, что особенно актуально для повышения уровня безопасной эксплуатации производственных объектов, поскольку основными причинами аварий являются моральная и физическая изношенность технических устройств, несвоевременная их реконструкция, несоблюдение работниками технической и производственной дисциплины и низкая организация труда [1], в связи с чем при создании систем мониторинга потенциально опасных объектов, оказывающих влияние на окружающую среду, необходимо формализовать понятие экологической безопасности с целью определения возможных сценариев развития возможных аварийных ситуаций на объектах.

По нашему представлению, наиболее доступным и надёжным методом анализа риска аварийной ситуации на объекте, оказывающем влияние на окружающую среду, является метод оценки экологической безопасности на базе ориентированных графов.

Рассмотрим порядок моделирования на примере построения оценки экологической безопасности потенциально химически опасного объекта (ПХО).

Система прогноза и принятия решений по результатам оценки экологической безопасности должна представлять собой соответ-

ствующую систему, содержащую множество различных вариантов принятия решений для всех рассматриваемых сценариев развития ситуации в зонах влияния ПХО. Система должна иметь модуль опроса, базы данных с эталонами ситуаций, модуль анализа и сравнения результатов и выполнять следующие функции:

- проводить опрос пользователя;
- формировать граф, описывающий экологическую безопасность ПХО и зон его влияния на момент проведения опроса;
- проводить сравнение сформированного графа с эталонными графами;
- отображать результаты сравнения графов в виде визуализации полученного и наиболее близкого к нему эталона с выделением проблемных аспектов и сравнения эталонов, а также описания экологической ситуации и состояния экологической безопасности, прогноза и рекомендаций к действию в текстовом режиме.

В системе принятия решений по результатам оценки экологической безопасности также должно быть предусмотрено формирование и хранение следующих данных:

- вопросов для проведения опроса экспертов в базе;
- эталонных графов и их подграфов;
- базы данных ответов на опросы пользователя, осуществленные ранее;
- ситуаций и инструкций.

Также должно быть предусмотрено визуальное отображение:

- сформированного графа ситуации;
- графа из списка эталонных графов;
- любого графа из списка сохраненных опросов.

Система должна обеспечивать требуемый уровень защиты информации от несанкционированного доступа и для обеспечения целостности данных.

При рассмотрении понятия экологической безопасности в зонах влияния ПХОО учитываем два режима [2, 3]:

- экологическая безопасность в штатном режиме (в условиях безаварийной работы);
- экологическая безопасность в нештатном режиме (при угрозе и возникновении аварийной ситуации).

В первом случае экологическую безопасность (G_1) можно описать с помощью ряда переменных, каждая из которых представляет множество параметров (рис. 1):

A_1 – частота и длительность работы в условиях отклонения от штатного режима на различных технологических этапах производственного процесса;

A_2 – параметры новых вредных воздействий на персонал объекта и население, про-

живающее в зоне влияния ПХОО, а также окружающую среду при сложившейся природной и техногенной обстановке;

A_3 – превышение уровней существующих в зоне влияния ПХОО вредных воздействий и загрязнений;

A_4 – результаты вредных воздействий (в том числе и длительных) на обслуживающий персонал и население;

A_5 – результаты вредных воздействий на окружающую среду в зоне влияния ПХОО;

A_6 – улучшение экологической обстановки на объекте в результате своевременного планирования и выполнения превентивных мероприятий на год, включая подготовку органов управления и обучение персонала действиям при угрозе и возникновении нештатных ситуаций;

A_7 – улучшение экологической обстановки в процессе эксплуатации ПХОО за счет выполнения природоохранных и защитных мероприятий (очистка воды, канализационных стоков, воздуха в технологических схемах ПХОО, уборка и безопасная утилизация твердых отходов, устройство дренажных установок, резервных емкостей и др.);

A_8 – улучшение экологической ситуации за счет создания действенной системы

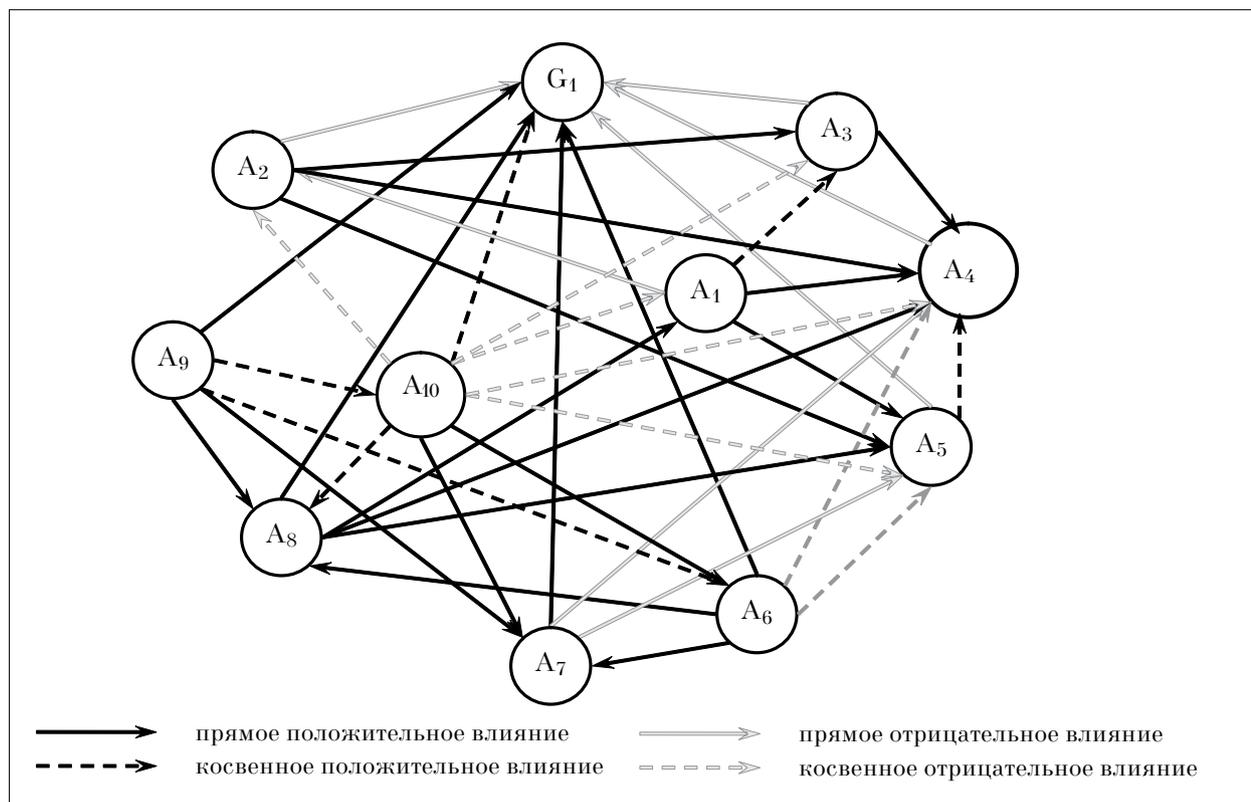


Рис. 1. Оценка экологической безопасности в зоне влияния потенциально химически опасного объекта в условиях безаварийного режима работы

комплексного экологического мониторинга ПХОО (в первую очередь подсистемы мониторинга с использованием идентификационного полигона), позволяющей выявлять и ликвидировать угрозу аварии на ранних стадиях, не допуская её возникновения;

A_9 – экономические выигрыши проекта, позволяющие улучшить финансирование программ по обеспечению безопасности персонала, охране окружающей природной среды (ОПС) и здоровья населения в зонах влияния ПХОО;

A_{10} – организация контроля за выполнением мероприятий в области экологической безопасности и мероприятий, направленных на повышение квалификации и готовности к действиям в различных ситуациях личного состава, работающего на ПХОО.

Формализованную модель оценки экологической безопасности как сложной системы можно построить, представив переменные и оценки в виде системы признаков и описав структуру такой системы через ориентированные графы (орграфы).

Орграф, изображенный на рисунке 1 (орграф G_1), имеет одиннадцать вершин и связи между ними. При этом направление связи говорит о влиянии одного фактора (показателя) на другой. Если это влияние положительное (что показано жирной связью), то исходный фактор усиливает последующий. Причем сплошной линией показано прямое влияние, а пунктирной – косвенное. Например, если будет увеличиваться частота и длительность работы в нештатном режиме (A_1), то, естественно, будут накапливаться неуверенность и усталость персонала, это будет приводить к порче и выходу из строя оборудования. Результатом всего этого будет появление новых вредных воздействий на персонал объекта и население, проживающее в зоне влияния ПХОО, а также окружающую среду при сложившейся природной и техногенной обстановке (A_2), что, безусловно, отрицательно повлияет на экологическую безопасность (G_1). Увеличение A_1 может повлечь за собой превышение существующих на данной территории уровней вредных воздействий и загрязнений (A_3), что также отрицательно влияет на экологическую безопасность (G_1). В свою очередь логично, что увеличение параметров A_2 окажет положительное влияние на A_3 .

Результаты вредного воздействия (в том числе и длительные) на обслуживающий персонал и население (A_4) и на окружающую среду (A_5) будут усиливаться в зависимости

от увеличения параметров A_1 , A_2 и A_3 и отрицательно влиять на G_1 . Кроме того, показатель A_4 будет дополнительно усиливаться за счет влияния A_5 .

Улучшение экологической обстановки за счёт своевременного планирования A_6 и выполнения природоохранных мероприятий A_7 (очистка воды, канализационных стоков, воздуха в технологических схемах ПХОО, уборка и безопасная утилизация твёрдых отходов) непосредственно будет влиять на уменьшение A_1 , A_2 и A_3 и, как следствие, A_4 и A_5 . Естественно, чем больше A_7 , тем лучше для G_1 .

Экономические выигрыши проекта, позволяющие улучшить финансирование программ по безопасности персонала объекта, охране окружающей природной среды и сохранения здоровья населения в зонах влияния ПХОО (A_9), будут усиливать потенциал вершин данного графа A_7 , A_8 , G_1 . Чем больше будет поступать инвестиций на выполнение мероприятий по улучшению экологической обстановки в зонах влияния ПХОО, тем будет меньше потенциал не только вершин негативных событий (A_1 , A_2 , A_3) но и их результатов (A_4 , A_5).

Дополнительные вложения (A_9) помогут организовать качественный контроль за работой всей системы экологической безопасности объекта и выполнением мероприятий, направленных на повышение квалификации и подготовку к действиям в различных ситуациях личного состава, работающего на ПХОО (A_{10}).

Более квалифицированный сотрудник сможет выполнить быстрее и качественнее такой же объём работы, какой выполнял бы менее квалифицированный, снизив до минимума процент ошибочных действий (отрицательное косвенное влияние A_{10} на A_1). Вероятность появления новых вредных воздействий на персонал объекта, окружающую природную среду и население, проживающее в зоне влияния ПХОО (A_2), превышение уровней существующих в зоне влияния ПХОО вредных воздействий и загрязнений (A_3), а также результаты вредных воздействий (в том числе и длительных) на обслуживающий персонал и население (A_4) и окружающую среду (A_5), косвенно будут снижаться, если работающий на ПХОО личный состав будет высококвалифицированным и на нем будет создана эффективная система комплексного экологического мониторинга. В свою очередь хорошо обученный персонал сможет лучше спланировать (A_6) и организовать (A_7) выполнение природоохранных мероприятий по очистке воды, воздуха, стоков, утилизации

твёрдых отходов в технологических схемах ПХОО и в целом улучшить экологическую безопасность.

Во втором случае экологическая безопасность, выраженная в виде орграфа G_2 , представлена на рисунке 2.

В данном случае составляющие оценки экологической безопасности будут складываться исходя из возможных сценариев развития нештатных (аварийных) ситуаций в зонах влияния ПХОО с учётом расположения указанных зон в условиях сложного рельефа местности, их больших размеров, наличия на их территории различных типов лесорастительных условий.

Составляющие оценки экологической безопасности представляют собой следующие параметры:

A_1 – длительность аварийной ситуации в зоне влияния ПХОО и времени ее воздействия на персонал, население, окружающую среду;

A_2 – превышение норм загрязнения окружающей среды;

A_3 – параметры противоаварийной защиты технологического процесса;

A_4 – результаты воздействия загрязняющих веществ на обслуживающий персонал и население;

A_5 – результаты воздействия загрязняющих веществ на окружающую природную среду;

A_6 – параметры системы комплексной безопасности ПХОО и территории, включая системы оповещения и защиты персонала и населения, проживающего в зоне влияния ПХОО;

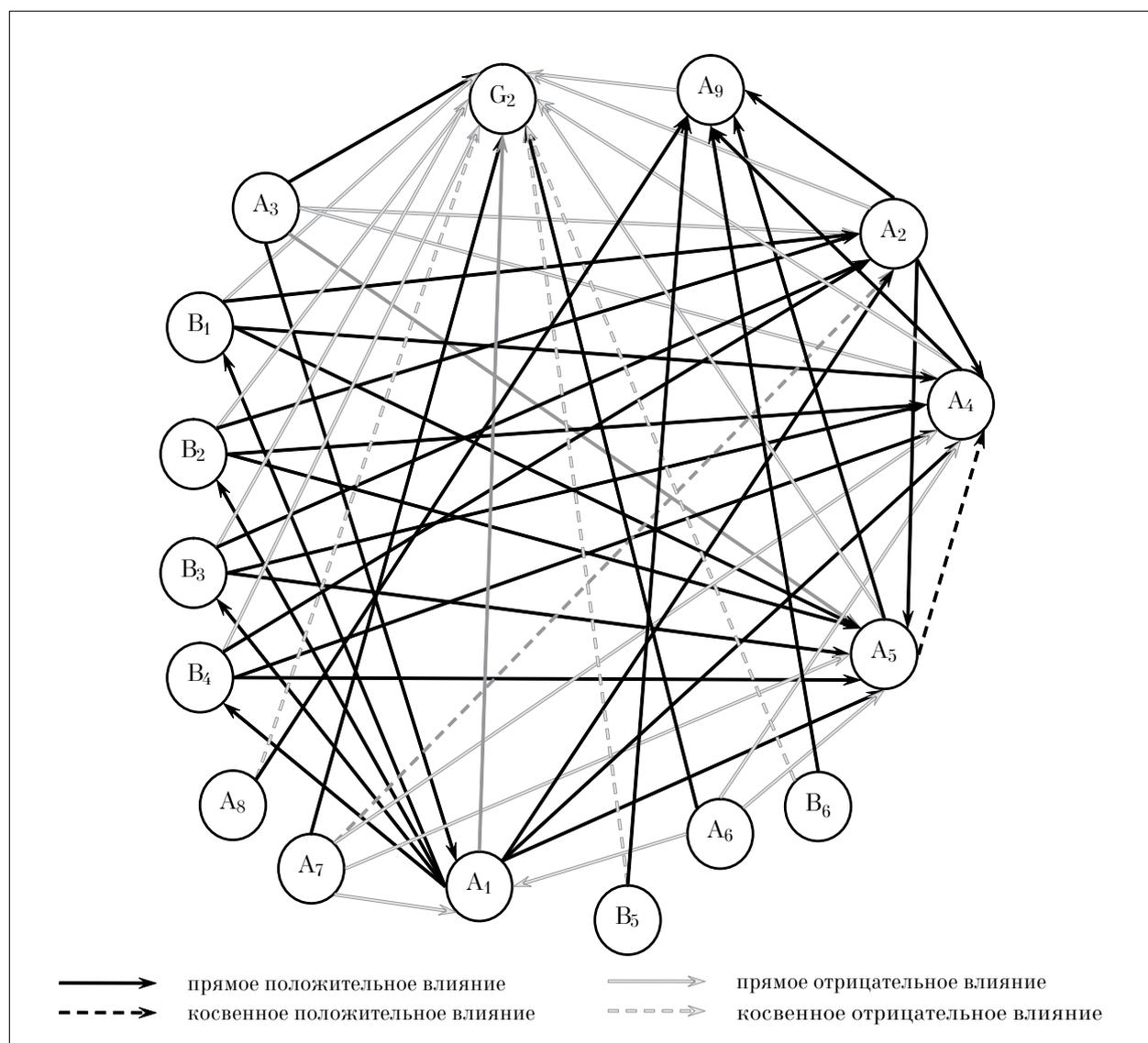


Рис. 2. Оценка экологической безопасности в зоне влияния потенциально химически опасного объекта при нештатном режиме работы (условиях угрозы и возникновения аварии)

A_7 – параметры эффективности комплексной системы безопасности ПХОО, включая готовность сил и средств ликвидации аварии;

A_8 – характеристика основных загрязняющих веществ;

A_9 – параметры, характеризующие последствия аварийной ситуации;

B_1 – параметры вредных воздействий на работающий персонал, окружающую среду и население в зоне влияния ПХОО в случае обнаружения подпороговой длительной утечки загрязняющего вещества;

B_2 – параметры вредных воздействий на работающий персонал, окружающую среду и население в зоне влияния ПХОО в случае аварии на единичной максимальной ёмкости или системе;

B_3 – параметры вредных воздействий на работающий персонал, окружающую среду и население в зоне влияния ПХОО при разрушении группы резервуаров, систем с одним загрязняющим веществом;

B_4 – параметры вредных воздействий на работающий персонал, окружающую среду и население в зоне влияния ПХОО при разрушении складов, группы резервуаров и систем с различными загрязняющими веществами;

B_5 – параметры, учитывающие ландшафтные условия местности в зоне влияния ПХОО;

B_6 – параметры, учитывающие сезонность, время суток, метеоусловия на момент аварии.

Орграф G_2 существенно отличается от орграфа G_1 , имеет 16 вершин, содержит новые элементы и связи, которые дополняют и детализируют систему для описания аварийного процесса.

Например, вершина A_2 первого орграфа во втором представлена в виде четырех вершин B_1, B_2, B_3, B_4 , конкретизирующих характеристики источника аварии. Вершина A_8 характеризует свойства основных загрязняющих веществ. Совершенно ясно, что чем выше потенциал вершин B_1-B_4 , тем выше потенциалы вершин A_2, A_4, A_5 . Причём если загрязнение окружающей среды (A_2) оказывает прямое негативное влияние на персонал объекта и население, проживающее в зоне влияния ПХОО (A_4), то результаты загрязнения окружающей среды (A_5) оказывают на персонал и население (A_4) косвенное негативное воздействие.

Вершина A_1 напрямую связана с потенциалом вершин источников аварийной ситуации и усиливает их отрицательное воздействие. Введенные дополнительно вершины

B_5 и B_6 детализируют прохождение аварийного процесса, его масштабы и совместно с вершинами A_4 и A_5 оказывают влияние на параметры, характеризующие последствия аварийной ситуации (A_9). Какое это влияние, положительное или отрицательное, зависит от конкретного времени события и месторасположения объекта.

Вершины A_3, A_6 и A_7 характеризуют параметры состояния технических устройств противоаварийной защиты (A_3), системы мониторинга и контроля за технологическим процессом, включая локальные системы оповещения (A_6), наличия и готовности к действиям комплексных систем безопасности территорий и объектов, включая органы управления всех уровней и силы реагирования. Понятно, что чем выше потенциал указанных вершин, тем ниже отрицательные воздействия на персонал, население (A_4) и окружающую среду (A_5), выше потенциал оценки экологической безопасности G_2 .

Увеличение параметров всех вершин орграфа в целом негативно повлияет на экологическую безопасность (G_2), поскольку увеличатся не только негативные последствия аварийных ситуаций, но и финансово-временные затраты на их предупреждение и ликвидацию последствий.

В действительности сложно предугадать, какая может произойти чрезвычайная ситуация (ЧС) и отношение каких параметров (вершин орграфа) необходимо при этом учитывать. В случае возникновения нескольких событий одновременно придется рассматривать ситуацию интегрально, отношения всего комплекса параметров. В этих случаях необходимо анализировать часть орграфа – подграф. Причём каждой возникшей ситуации будет соответствовать свой орграф, а следовательно, своя формализованная оценка экологической безопасности.

Из этого следует вывод: для оценки экологической безопасности объектов детериорантных отраслей должна использоваться не единая оценка, а множество оценок, характерных для различных сценариев (ситуаций) работы объекта, имеющих следующий вид:

$$\{C_i\}_{i=1}^N \text{---} \{G_i\}_{i=1}^N,$$

где C_i – оценка для i -ой ситуации, где i от 1 до N ; G_i – граф для i -ой ситуации.

Путем операции объединения $\bigcup_{i=1}^N G_i$ через матрицы инцидентий возможно получение обобщенного графа G_0 , который,

по мере уточнения сценариев работы объекта по утилизации может дополняться.

Путем разбиения графа Go на подграфы возможно получить множество оценок, которое будет конечным.

Полученный в настоящей работе вывод о невозможности получения единой оценки (обобщенной) с использованием теории графов лишь подтверждает те работы по оценке различных технологий утилизации, в которых используется множество количественных и качественных оценок [4].

- Известны исследования подобного рода:
- анализ энергетических проблем США [5];
 - распределение ресурсов на медицинские нужды в Британской Колумбии [6];
 - выбор типа перевозок в Ванкувере [7].

Таким образом, построение модели экологической безопасности позволяет определить основные принципы экологического мониторинга потенциально опасных объектов, оказывающих влияние на окружающую среду.

Аварии и катастрофы характеризуются процессами техногенного характера (возгорания, аварийные взрывы, выбросы радиоактивных и токсичных продуктов) и являются скоротечными процессами импульсного характера. К особенностям экологического мониторинга также следует отнести пространственную масштабность измерений, длительный интервал ожидания (наблюдения) при возможной короткой реализации скоротечного аварийного процесса и множество измеряемых параметров в различных средах.

Анализ существующей системы управления территориями показывает, что для быстропротекающих ЧС критическим параметром является время принятия решений, от которого зависит величина ущерба и потеря. Для адекватного реагирования в таких ЧС необходимо знание динамики «аварийных» процессов. Существующие же системы наблюдения потенциально опасных объектов в основном ориентированы на предупреждение аварийных ситуаций и не дают представление о динамике и развитии скоротечных «аварийных» процессов [8, 9].

Поэтому целесообразно, чтобы средства наблюдения имели 2 режима работы:

- наблюдение и непрерывный контроль с целью обнаружения признаков появления «аварийного» процесса;
- регистрация динамики развития «аварийного» процесса в случае его обнаружения.

При этом целью мониторинга на потенциально опасных объектах, оказывающих влияние на окружающую среду, является не только получение оперативной информации о веществах, находящихся в контролируемых зонах, но и создание условий для немедленного реагирования, принятия решений и действий в чрезвычайных ситуациях. Моделирование возможного развития ситуаций является актуальной и важной задачей мониторинга с целью обеспечения экологической безопасности населения и работающего персонала на этих объектах.

Литература

1. Елохин А.Н. Анализ и управление риском: теория и практика. М.: Страховая группа «Лукойл», 2000. С. 8.
2. Алексеев В.А., Габричидзе Т.Г., Янников И.М. Моделирование оценки экологической безопасности объектов по хранению или уничтожению химического оружия // Вестник министерства по делам ГО и ЧС Удмуртской Республики. Ижевск. 2007. № 3. С. 26–28.
3. Янников И.М. Применение ориентированных графов для моделирования и оценки экологической безопасности объектов уничтожения химического оружия // Проблемы региональной экологии в условиях устойчивого развития: Матер. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. В 2 част. Киров. 2008. Выпуск VI. Ч. 2. С. 19–23.
4. Холстов В.И., Завьялов Н.В., Жданов В.А., Васильев С.В. Система показателей для оценки технологий (методов) уничтожения химического оружия // Федеральные и региональные проблемы уничтожения химического оружия. Информационный сборник. М.: ВИНТИ, 2004. С. 66–75.
5. Kruzig P.G. Cross-Impact Analysis Workshop. Standard Research Institute Letter Report // Materials, methods & technologies: 12th International Symposium. Bulgaria. 1990. P. 234–240.
6. Kane I., Tompson W., Vertinski I. Health Care Deliveri: A Polici Simulation // Socio-Econ. Plan. Sci. 1972. V. 6. P. 129–142.
7. Kane I.A. Primer for a new Cross-Impact Language-KSIM Technological Forecasting and Social Change // ECOLOGY & SAFETY. 1972. V. 4. P. 129–142.
8. Алексеев В.А. Системы автоматической регистрации скоротечных процессов для предупреждения чрезвычайных ситуаций. Аварии и катастрофы. Учебн. пособ. в 6 кн. Кн. 6. Под ред. В.А.Котляревского. М.: Издательство АСВ, 2003. С. 324–335.
9. Алексеев В.А., Вахрушев В.И. Структура цифровых автономных средств регистрации мониторинговой информации при чрезвычайных ситуациях // Приборы и системы управления. 1996. № 6. С. 19–22.

**Изучение состояния природного комплекса в зоне влияния
Кирово-Чепецкого химического комбината**

© 2010. Т. Я. Ашихмина¹, д.т.н, зав. лабораторией, Е. В. Дабах¹, к.б.н., с.н.с.,
Г. Я. Кантор¹, к.т.н., н.с., А. П. Лемешко², директор,
С. Г. Скугорева¹, к.б.н., н.с., Т. А. Адамович¹, аспирант,
¹Лаборатория биомониторинга Института биологии Коми НЦ УрО РАН
и Вятского государственного гуманитарного университета,
²ООО «Геосервис»,
e-mail: ecolab2@gmail.com

В работе представлен обзор материалов по результатам многолетних исследований территории в районе хранения химических и радиоактивных отходов Кирово-Чепецкого химического комбината (КЧХК). Обследованы природные (подземные и поверхностные) воды, донные отложения, почвы, растительность. Выявлены локальные участки максимального загрязнения химическими веществами и радионуклидами.

The article presents the results of many years investigations on the territory of chemical and radioactive wastes storage of the KCCP. Natural (ground and surface waters), bottom sediment, soils, vegetation are investigated. Local areas of maximal contamination with chemical substances and radionuclides are found out.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, химические загрязнители, контроль и мониторинг природных сред и объектов

Key words: radioactive wastes, chemical pollutants, control and monitoring of the environment and natural objects

Кирово-Чепецкий химический комбинат (КЧХК), объединяющий предприятия ООО «Завод минеральных удобрений» (ЗМУ) и ООО «Завод полимеров», расположен в долине реки Вятки в 20–25 км выше по течению от хозяйственно-питьевого водозабора г. Кирова. На ЗМУ производят аммиак, а на его основе азотную кислоту, аммиачную селитру и сложные удобрения. ООО «Завод полимеров КЧХК» выпускает фторопласты, фторкаучуки, фторопластовые суспензии и смазки, компоненты для получения искусственной крови и другие продукты.

Источниками химического загрязнения окружающей среды являются выбросы предприятий (более 140 загрязняющих веществ), стоки, сбрасываемые в реку Елховку по пяти выпускам, твёрдые и жидкие отходы, сосредоточенные в шламонакопителях.

В течение длительного времени Кирово-Чепецкий химический комбинат являлся одним из ведущих предприятий ядерного комплекса в нашей стране, на котором производили гексафторид и тетрафторид урана. В начале 1990-х годов производство было остановлено, но на территории комбината и за её пределами остались хранилища радио-

активных отходов (РАО) низкой и средней активности.

Объекты хранения отходов находятся в пойме и на первой надпойменной террасе р. Вятки в 1,5–3 км от её русла, что предопределяет повышенное внимание к вопросам охраны окружающей среды.

Территория в зоне влияния предприятий находится под постоянным контролем экологических служб федеральных органов государственного контроля, надзора и мониторинга по Кировской области. Контроль и мониторинг состояния хранилищ РАО и других радиоактивных объектов, остающихся на площадке Завода полимеров после остановки радиохимического производства, осуществляется экологической службой Кирово-Чепецкого отделения филиала «Приволжский территориальный округ» федерального государственного унитарного предприятия «РосРАО». В последнее десятилетие работы по изучению и оценке состояния окружающей среды проводились специалистами Государственного специализированного проектного института Минатома РФ (ГСПИ, г. Москва), ООО «Геосервис» (г. Киров), ФГУ РНЦ «Курчатовский институт» [1 – 6].

В рамках научных исследований с 2001 г. состояние природного комплекса на территории Кирово-Чепецкого района изучается лабораторией биомониторинга Института биологии Коми НЦ УрО РАН и ВятГГУ. В окрестностях предприятий ОАО «КЧХК» обследуются почвы, природные воды, донные отложения, растительность, изучается состояние животного мира, исследуется снежный покров как индикатор загрязнения атмосферного воздуха. В районе размещения радиоактивных отходов в течение ряда лет проводятся замеры мощности эквивалентной дозы гамма-излучения, определяется удельная активность радионуклидов в пробах воды, почв и донных отложений. В оценке антропогенно нарушенных территорий используются методы дистанционного зондирования. Материалы исследований представлены в работах [7 – 21].

С 2008 г. в Российской Федерации действует Федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года», в рамках которой работы по оценке современного состояния окружающей среды в районе размещения радиоактивных отходов были продолжены Федеральным государственным унитарным геологическим предприятием «Гидроспецгеология» совместно со специалистами ООО «Геосервис», Вятского государственного гуманитарного университета (ВятГГУ, г. Киров) и Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (г. Сыктывкар) [9 – 10].

В 2009–2010 гг. коллективом Лаборатории биомониторинга Института биологии Коми НЦ УрО РАН и ВятГГУ были проведены работы по оценке современного уровня химического и радиационного загрязнения поверхностных водных объектов, донных отложений и почв в районе КЧХК [11 – 19].

О состоянии *атмосферного воздуха* можно судить по результатам анализа снеговой воды. Согласно результатам исследований [21, 22], с выбросами поступает значительное количество нитратного и аммонийного азота, фторидов. Наиболее загрязнёнными нитратом аммония являются участки, расположенные в 500 м на север и восток от Завода минеральных удобрений, что соответствует преобладающим направлениям ветров в зимний период на данной территории.

Результаты биотестирования проб снега с использованием трех биотестов (*Paramecium caudatum*, *Daphnia magna*, «Эколюм») показали, что большинство исследованных проб не обладает острым токсическим действием.

На состояние *водных объектов* в районе КЧХК оказывают влияние стоки комбината и хранилища отходов. Отбор проб воды, донных отложений проводился вдоль русла р. Елховки, на оз. Просное, на заболоченных участках около хвостохранилищ и шламонакопителей, в местах сброса стоков (рис. 1). Кроме того, обследовалось состояние озёр Бобровое, Берёзовое, Просное и заполненных водой карьеров. В качестве фоновой была выбрана точка 922 вблизи железнодорожной станции Чепецкая, находящаяся по течению

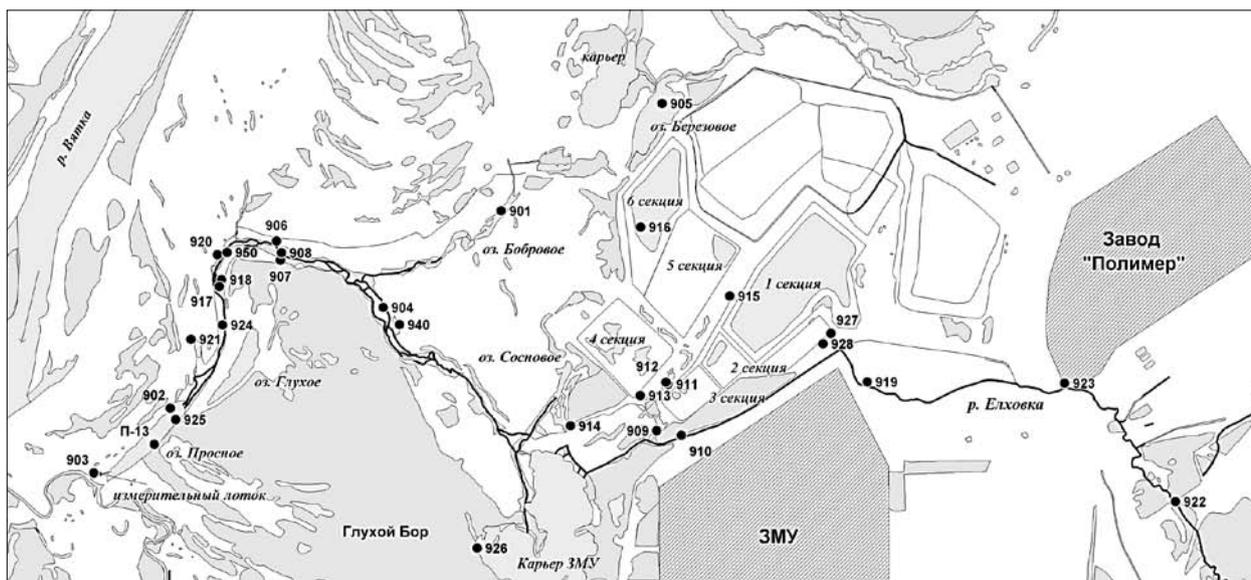


Рис. 1. Район проведения работ и точки отбора проб

р. Елховки выше сбросов Завода полимеров КЧХК. Результаты исследований отражены в работах [10 – 12].

В пробах воды, отобранной из поверхностных водоёмов и водотоков, отмечено повышенное содержание нитратов, ионов аммония и ртути. Концентрация нитратов в реке Елховке возрастает вниз по течению от 11 мг/л в фоновой точке (т. 922) до 120 мг/л (при ПДК 45 мг/л) – на измерительном лотке. Особенно загрязнены соединениями азота озёра Березовое и Бобровые. В них ПДК нитратов и аммония превышена в сотни раз, причём с глубиной концентрация нитрата аммония возрастает на порядок. Содержание фтора во всех пробах, отобранных в зоне влияния КЧХК, выше, чем в фоновой точке. Максимальные концентрации фторид-иона, превышающие ПДК, обнаружены в оз. Берёзовое (на глубине 5 м – 9,9 мг/л при ПДК 1,2 мг/л) и в сточной канаве у 3-й секции (5,9 мг/л). Концентрация ртути в пробах немного выше допустимых величин в карьере ЗМУ (3,4 мкг/л), в нижнем течении р. Елховки (т. 906 – 1,14 мкг/л) и в оз. Берёзовое (1,3 мкг/л).

На рис. 2 показано распределение концентрации двух радионуклидов (^{238}U и ^{232}Th) по течению р. Елховки на протяжении 9 км от фонового створа (т. 922) до измерительного лотка на сбросе воды из оз. Просное (т. 903), измеренной масс-спектрометрическим методом. По обоим элементам во всех пробах наблюдается превышение концентрации по отношению к фону.

Наиболее вероятной причиной повышения концентрации радиоактивных элементов

в воде р. Елховки является разгрузка грунтовых вод, загрязнённых техногенными радионуклидами. Кроме того, не исключена возможность вторичного загрязнения воды в р. Елховке за счёт поступления радионуклидов из донных отложений и аллювиальных почв (во время паводка), загрязнённых ранее радиоактивными сбросами в р. Елховку.

Результаты биотестирования поверхностной воды с использованием трёх биотестов (*Paramecium caudatum*, *Daphnia magna*, «Эколюм») показали, что большинство исследованных проб обладает острым токсическим действием. Особенно высокой степенью токсичности характеризуются пробы воды из озера Берёзовое, цепи Бобровых озёр и карьера ЗМУ. Среднетоксичными являются пробы воды из р. Елховки. Экотоксикологический анализ данных проб с использованием тест-объекта *Chlorella vulgaris* выявил, что лишь две пробы из 27 (из оз. Ивановское и с измерительного лотка) не являются токсичными, остальные оценены как гипертоксичные, средне- и слаботоксичные.

Все пробы **донных отложений** характеризуются щелочной реакцией, ближе к нейтральным значениям показатель рН в Бобровых и Берёзовом озёрах. В донных отложениях присутствуют нефтепродукты, особенно загрязнены ими пробы, отобранные у нефтебазы (т. 919) и в искусственном водотоке к югу от 3-й секции шламонакопителя (т. 910). В донных отложениях оз. Просное и на заболоченном участке р. Елховки в нижнем её течении отмечено сравнительно высокое содержание фторидов, превышающее фоновые значения в 4-5 раз.

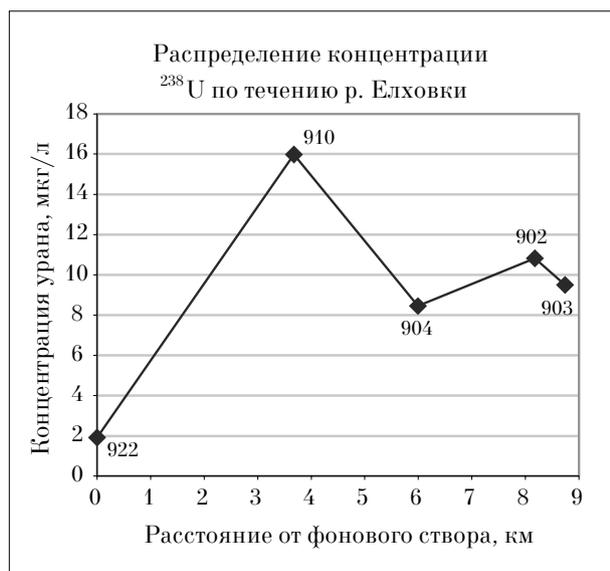


Рис. 2. Диаграммы распределения концентрации радиоактивных элементов по течению р. Елховки

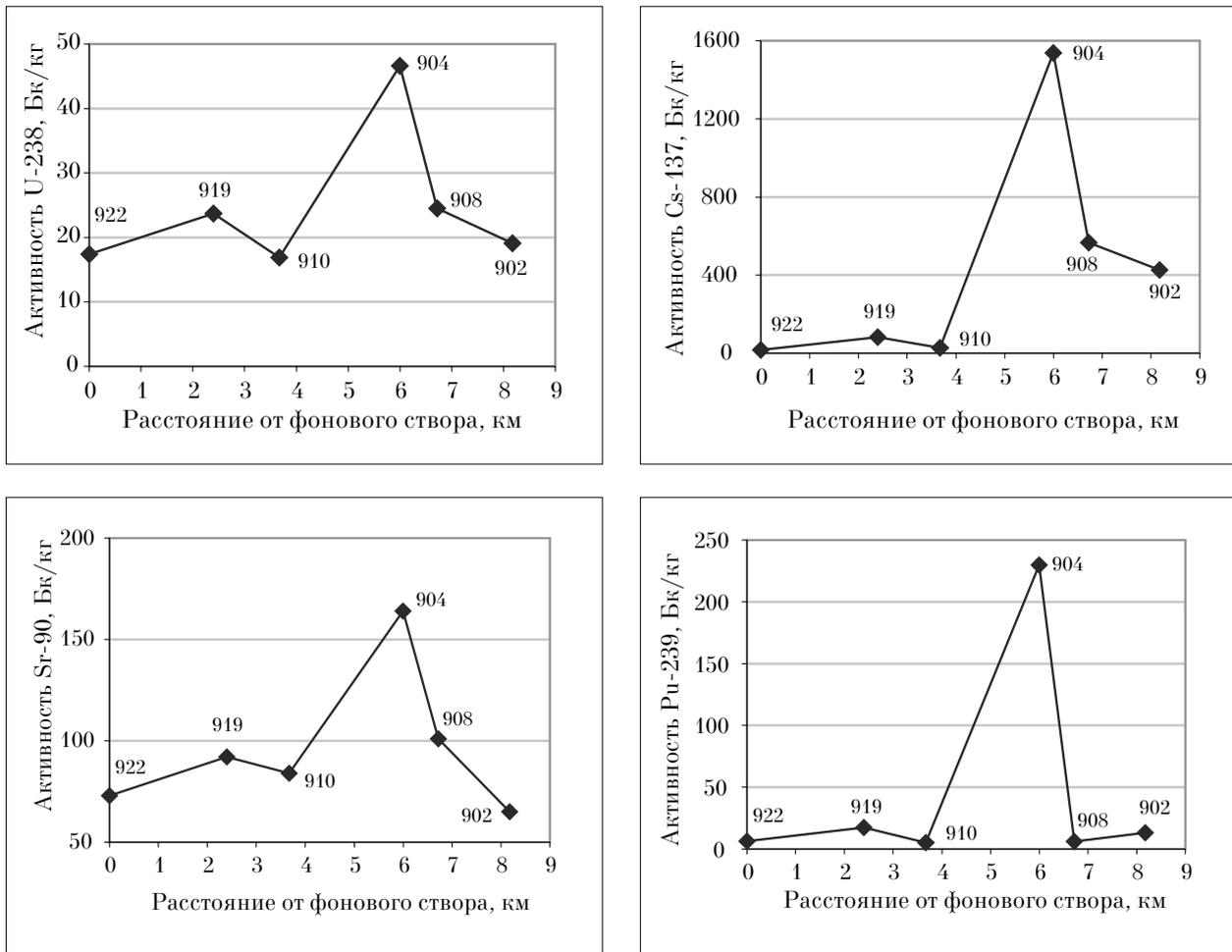


Рис. 3. Активность радионуклидов в донных отложениях р. Елховки

Как и в предыдущие годы, сохраняется загрязнение донных отложений ртутью [3, 24]. Содержание ртути варьирует от 0,30 до 54 мг/кг, максимальные значения отмечены у 3-й секции шламонакопителя, у моста в 919 точке и около хранилища РАО в т. 928; с глубиной содержание ртути возрастает.

Оценка состояния донных отложений по содержанию тяжёлых металлов (меди, цинка, свинца, кадмия, никеля) и мышьяка проводилась по аналогии с почвами с учётом суммарного коэффициента техногенного загрязнения [25]:

$$Z_c = \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{C_{i\text{фон}}} - (N-1),$$

где $N=6$ (количество учитываемых элементов), C_i – содержание i -го элемента в загрязнённой пробе, $C_{i\text{фон}}$ – содержание i -го элемента в фоновой пробе.

К категории с опасной степенью химического загрязнения отнесены донные отложения р. Елховки у нефтебазы (т. 919), ниже по течению – в зарегулированном русле реки

(т.910), в районе 3-й секции шламонакопителя (т. 909), в среднем и нижнем течении р. Елховки, на заиленной и открытой части оз. Просное. Анализ радиоактивности донных отложений по течению р. Елховки даёт следующую картину (рис. 3).

Отмечается почти полная идентичность профилей загрязнения донных отложений реки Елховки радионуклидами ^{238}U , ^{137}Cs и ^{90}Sr , ^{239}Pu . Резко выраженный максимум радиоактивности донных отложений наблюдается в точке 904 в непосредственной близости от области наибольшего загрязнения грунтовых вод техногенными радионуклидами (рис. 5, 6, см. цветную вкладку). Это даёт основание предполагать, что радионуклиды поступают в реку Елховку с грунтовыми водами. Характер распределения загрязнения донных отложений отличается от профиля загрязнения воды в реке (рис. 2 и 3), так как донные отложения накапливают радионуклиды в течение длительного времени, а их концентрация в воде отражает современную ситуацию. За последние 4 года (с 2005 г. [3] по 2009 г.) ореол

повышенных концентраций радионуклидов в подземных водах, с разгрузкой которых, вероятно, связано загрязнение, изменился, что отмечено в работах [9, 10].

Экотоксикологический анализ показал, что пробы донных отложений, отобранные в карьере Завода минеральных удобрений, обладают высокой степенью токсичности. Высокие абсолютные значения индекса токсичности (0.54–0.58) установлены в пробах донных отложений из оз. Просное и оз. Берёзовое (участки 902 и 905). Большинство проанализированных проб обладает допустимой степенью токсичности, т. е. не оказывает острого токсического действия на *Paramecium caudatum*. Требуется исследование данных проб на хроническую токсичность.

Территория, прилегающая к предприятию, характеризуется высокими уровнями залегания *грунтовых вод*, они варьируют от 0,5 до 3 метров. Грунтовые воды питаются за счёт атмосферных осадков, вод реки Вятки в паводок, в межпаводковый период дренируются как р. Вяткой, так и мелкими водотоками. Поскольку водоотведение с предприятий осуществляется круглогодично, это также способствует высокому стоянию уровней. Грунтовые воды пополняются фильтрующимися из шламонакопителей растворами, в результате за длительный период существования предприятия сформировалась область химического и радиационного загрязнения подземных вод. Обобщенным показателем химического загрязнения можно считать повышенную минерализацию грунтовых вод. Среди анионов преобладают сульфаты, хлориды, нитраты и нитриты, среди катионов – аммоний и стронций, в отдельных скважинах присутствуют литий, сурьма, кадмий, уран. Выделено несколько ореолов повышенной минерализации грунтовых вод (содержание сухого остатка свыше 1000 мг/л) [3].

Первая, наиболее обширная область включает в себя территории, прилегающие к хвостохранилищу мела, трёхсекционному шламонакопителю, а также значительные площади к западу от них, она протянулась вдоль поймы р. Елховки. Этот ореол в соответствии с потоком грунтовых вод постепенно расширяется в западном направлении в сторону реки Вятки.

Максимальные уровни загрязнения грунтовых вод зафиксированы в районе озера Бобровое и к северу от него. Загрязнённые воды разгружаются в реку Елховку на протяжении 5 км, а также в пойменные озёра Бобровое,

Берёзовое, карьер у оз. Берёзовое, Сосновое, северную часть карьера ЗМУ. Наиболее высокие уровни минерализации приурочены к более глубоким горизонтам грунтовых вод, в верхней части минерализация снижается за счёт поступления пресных вод в период снеготаяния и паводка на реке Вятке, а также атмосферных осадков в летний период. Источником загрязнения является хвостохранилище мела, о чём свидетельствует близкий химический состав жидкой фазы хвостохранилищ и грунтовых вод в области максимального загрязнения. Значительная часть загрязнения сформировалась за счёт фильтрации высокоминерализованных вод из 3-й секции трёхсекционного шламонакопителя, введённого в строй ещё в 1968 г.

Вторая область повышенной минерализации грунтовых вод выявлена вблизи западной границы территории ООО «Завод полимеров КЧХК». Здесь в пробах грунтовых вод отмечается минерализация на уровне порядка 100000 мг/л. Эта область загрязнения грунтовых вод имеет локальный характер. По химическому составу воды сульфатно-хлоридно-натриевые, в составе катионов присутствует значительное количество ионов аммония (до 1660 мг/л), при этом нитраты практически отсутствуют. Источником загрязнения являлся двухсекционный шламонакопитель, функционировавший с начала 1950-х годов до 1968 года.

По сравнению с исследованиями, выполненными ООО «Геосервис» в 2005 г., в 2009 г. наблюдается расширение области повышенной минерализации грунтовых вод на север и на запад по направлению потока подземных вод, но при этом концентрация загрязняющих веществ в эпицентре практически не изменяется. Современные границы области повышенной минерализации грунтовых вод (по данным 2009 г.) показаны на рис. 4.

Интенсивное изучение радиационного загрязнения грунтовых вод в районе размещения хранилищ РАО и объектов бывшего производства фторирования урана проводится с 1995 г. [3, 6, 9, 13 – 14]. Большие объёмы работ по изучению радиоактивного загрязнения грунтовых вод выполнены ГСПИ в 2001 и 2002 гг. В нескольких скважинах суммарная удельная активность радионуклидов значительно превышала 10 УВ^{вода} (УВ – уровень вмешательства согласно НРБ-99/2009 [26]). Радиационное загрязнение грунтовых вод обнаружено в скважинах, расположенных в пойме р. Елховки, у 3-й секции шламонакопителя, у хранилища 205, а также в преде-

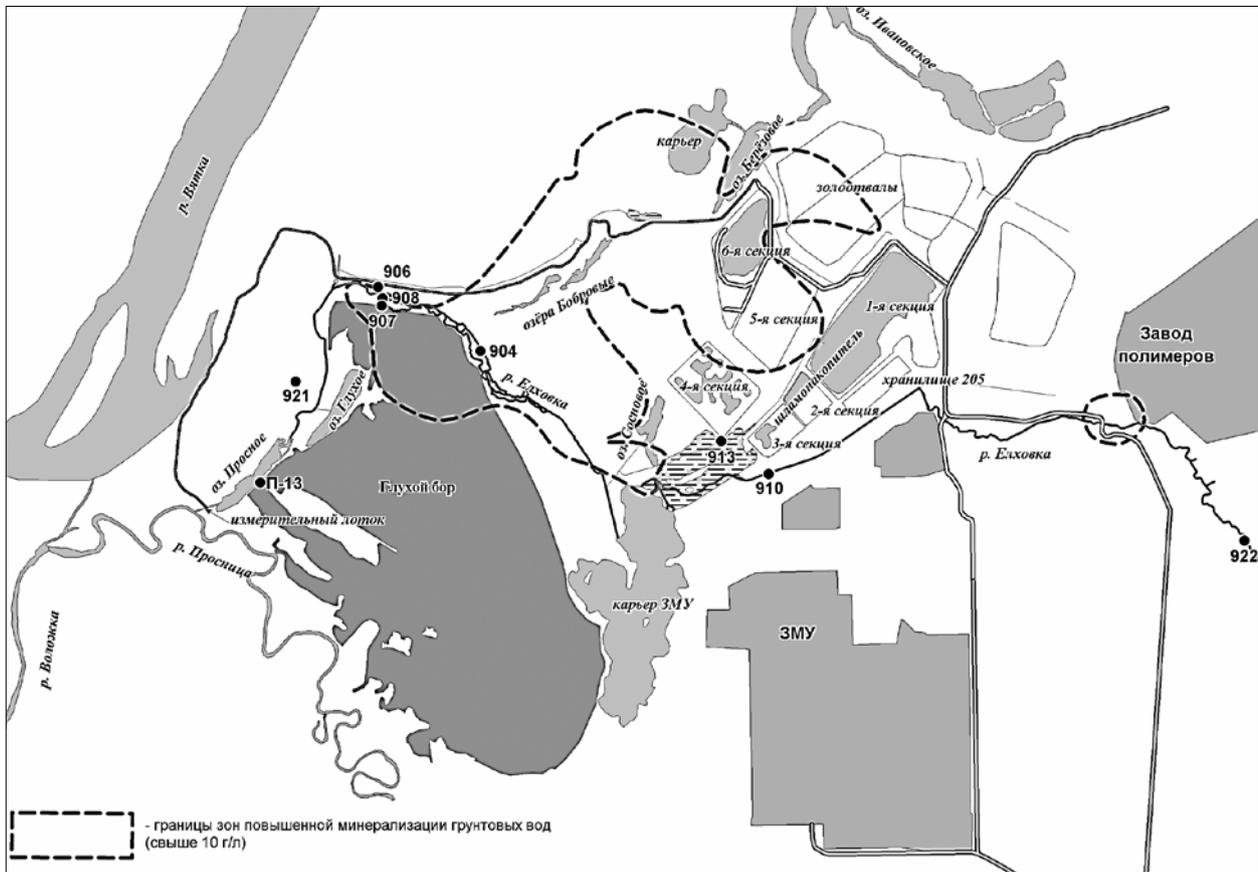


Рис. 4. Область повышенной минерализации грунтовых вод (свыше 10 г/л)

лах промплощадки ООО «Завод полимеров КЧХК».

Область радиоактивного загрязнения грунтовых вод в пойме р. Елховки сформировалась за счёт фильтрации загрязнённых вод из 3-й секции, а также за счёт сброса сточных вод с остаточными количествами радионуклидов в р. Елховку. Основным загрязняющим компонентом в грунтовых водах в пойме р. Елховки является Sr-90, в небольших количествах присутствуют изотопы урана и Cs-137.

Ориентировочная площадь загрязнения грунтовых вод в пойме р. Елховки составляет 585 тыс. м².

В районе хранилища радиоактивных отходов 205 радиационное загрязнение грунтовых вод было зафиксировано в единственной скважине. В составе грунтовых вод здесь преобладали альфа-активные радионуклиды: U-238, U-234. Начиная с 2003 г. уровень загрязнения постепенно возрастал. Загрязнению подверглась верхняя часть водоносного горизонта, ориентировочно до глубины 4–5 м. Загрязнение имело локальный характер. По данным 2005 года [3], разгрузка загрязнённых грунтовых вод происходит в дренажную

канаву, расположенную к востоку от хранилища 205, отводящую поверхностные воды от первой секции шламонакопителя в р. Елховку. Удельная активность урана здесь составляла 0,7 УВ^{вода}.

По результатам проведённого в 2009 г. мониторинга геологической среды на территории, прилегающей к объектам КЧХК, были подтверждены основные источники радиоактивного загрязнения подземных вод: хранилище РАО № 205, 3-я секция шламонакопителя, а также хранилища РАО, расположенные на территории ООО «Завод полимеров КЧХК». По сравнению с 2005 г. граница основного ореола радиоактивного загрязнения расширилась от 3-й секции в сторону хранилища № 205. Аналогичная ситуация наблюдается и на территории, прилегающей к ООО «Завод полимеров КЧХК» – во всех опробованных скважинах зафиксировано превышение УВ^{вода}. По сравнению с 2005 г. выявлена новая область радиационного загрязнения с незначительными превышениями УВ^{вода}, протянувшаяся от 5-й секции хвостохранилища мела в северо-западном направлении до озера Бобровое (рис. 6, см. цветную вкладку).

Таким образом, загрязнение грунтовых вод продолжается за счёт инфильтрации из хранилища № 205, 3-й секции шламонакопителя, с территории Завода полимеров. Вследствие разгрузки грунтовых вод в реку Елховку не исключено поступление радионуклидов в поверхностные воды.

Почвенный покров поймы в зоне влияния предприятий КЧХК отличается разнообразием и высокой степенью нарушенности. По уровню кислотности почвы относятся к нейтральным и слабокислым. Почти все исследованные почвы загрязнены тяжёлыми металлами (ТМ). В них отмечены повышенные концентрации свинца, цинка, кадмия, никеля [3, 15, 17]. Для техногенно нагруженной территории превышения ПДК (ОДК) сравнительно небольшие (в 1,5–3 раза). На площадках, где образцы взяты по горизонтам, максимальные концентрации ТМ приурочены к гумусовым горизонтам. Загрязнение ртутью отмечено в почвах на пойменных гривах в нижнем течении р. Елховки – 18 мг/кг (при ПДК 2,1 мг/кг), причём в образцах, отобранных по горизонтам, самая высокая концентрация ртути зафиксирована в гумусовом горизонте (3–15 см) – ниже современного органо-генного слоя, хотя и верхний слой загрязнён. В нижележащих минеральных горизонтах концентрация элемента резко падает [17, 24].

Суммарный коэффициент техногенного загрязнения [25], рассчитанный по семи нормируемым в почвах элементам (Cu, Pb, Cd, Zn, Ni, As, Hg), позволяет отнести почвы к категории с допустимой степенью загрязнения.

Содержание нефтепродуктов в почвах невысокое. Максимальные концентрации (220–240 мг/кг) – на берегах реки Елховки (в нижнем её течении) и озера Просное. Высокое содержание подвижной формы фторид-иона (до 9,2 мг/кг при ПДК 2,8 мг/кг), возрастающее вниз по профилю, обнаружено только в одной прикопке в пойме в нижнем течении р. Елховки.

Содержание нитратов в почвенных образцах варьирует в широких пределах. Очень высокие концентрации нитратов (превышающие ПДК – 130 мг/кг) обнаружены в органо-генных горизонтах почв на правом берегу р. Елховки в нижнем её течении.

По результатам маршрутного обследования территории повышенный уровень гамма-излучения отмечался у ООО «Завод полимеров КЧХК», в пойме р. Елховки и на берегах оз. Просное, в районе 3-й секции

шламонакопителя. Уровни МЭД (мощности эквивалентной дозы гамма-излучения) не превышали 0,5 мкЗв/час. Обнаружена приуроченность повышенных значений МЭД к определенному гипсометрическому уровню (примерно на 1 м выше уровня воды в реке) и к верхним горизонтам почв [17, 10].

В результате загрязнения происходит изменение физико-химического и биологического состояния почв. Показателем биологического статуса почв является активность почвенных ферментов. Для общей характеристики ферментативной активности почв в 2008–2009 гг. определяли активность каталазы, инвертазы и уреазы, относящихся к различным классам ферментов. Показано, что на участках пробоотбора активность данных ферментов сильно варьирует [18 – 19]. Максимальные значения активности инвертазы и каталазы, высокие значения активности уреазы характерны для аллювиальных почв, подверженных затоплению водами р. Елховки, по правому берегу реки в нижнем её течении. Избыточная влажность почвы может быть причиной изменения соотношения эколого-трофических групп микроорганизмов в почвенном микробиологическом комплексе и роста численности микроорганизмов, участвующих в гидролизе олигосахаридов и разложении пероксида водорода.

Микробиологический анализ почв [20] показал, что почвы в районе действия КЧХК существенно различаются по микробиологическим показателям. Это обусловлено тем, что они формируются в разных условиях, подвержены воздействию загрязнённых паводковых и грунтовых вод. Численность фототрофных микроорганизмов во всех образцах почв довольно велика; среди цианобактерий преобладают безгетероцистные формы. Особенностью исследуемых почв является слабый уровень развития азотфиксирующей гетеротрофной бактерии рода *Azotobacter* и грибов. На всех участках отмечается высокий процент грибов с окрашенным мицелием (>60%), что может быть связано с загрязнением почв.

По результатам экотоксикологического анализа [15] не выявлено проб почв, обладающих острым токсическим действием, но 63% исследованных проб нельзя признать безвредными по одному показателю токсичности (для тест-объекта *Ceriodaphnia affinis*), так как требуются исследования на хроническую токсичность. Проба, отобранная в 100 м от Завода минеральных удобрений КЧХК, имеет умеренную степень токсичности.

Флора, характерная для района исследований, отражена в работе [7]. Состояние растительного покрова оценивалось на основании анализа имеющихся данных дистанционного зондирования Земли. Использовались мультиспектральные снимки Landsat-7 за 1999–2007 гг., по которым рассчитывался разностный вегетационный индекс NDVI при помощи программного пакета ENVI 4.5 [23]. Данные исследования показали, что состояние растительности за указанный период остается стабильным, явных признаков деградации растительного покрова в окрестностях КЧХК не наблюдается.

Исследования, проводимые ранее и продолжающиеся коллективом Лаборатории биомониторинга в настоящее время, позволяют оценить масштабы загрязнения в зоне влияния КЧХК. Главная цель всех исследований – разработка мероприятий по ликвидации источников загрязнения и реабилитации загрязнённых территорий. По инициативе Завода минеральных удобрений Лабораторией биомониторинга в 2009 году были начаты работы по поиску биологических методов очистки вод пойменных озёр в районе хвостохранилища мела ООО «ЗМУ КЧХК», загрязнённых нитратом аммония. Некоторые результаты этих исследований представлены в работах [14, 16]. В рамках Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» осуществляются мероприятия по подготовке к реабилитации территорий, подвергшихся радиационному загрязнению.

Литература

1. Дружинин Г.В., Лемешко А.П., Синько В.В., Ворожцова Т.А., Нечаев В.А. Загрязнение природных сред вблизи системы водоотведения Кирово-Чепецкого химического комбината // Региональные и муниципальные проблемы природопользования: Матер. 9-й науч.-практ. конф. Киров. 2006. С. 125–127.
2. Дружинин Г.В., Лемешко А.П., Ворожцова Т.А., Нечаев В. А. Техногенные отложения озера Просного в системе водоотведения Кирово-Чепецкого химического комбината // Региональные и муниципальные проблемы природопользования: Матер. 9-й науч.-практ. конф. Киров. 2006. С. 127–128.
3. Дружинин Г.В., Лемешко А.П., Нечаев В.А., Хитрин С.В. Отчет по результатам комплексной оценки влияния хозяйственной деятельности ОАО КЧХК и прилегающей к нему площади водосбора на режим формирования качества и количества стоков. Киров: ООО «Геосервис», 2006. 146 с.
4. Разработка «Концепции реабилитации радиационно-загрязненных объектов на промплощадке «КЧХК» и обеспечение радиационной безопасности населения Кировской области» (Научно-технический отчет). М.: ФГУ РНЦ «Курчатовский институт», 2007. 59 с.
5. Проведение радиационного обследования с целью определения уровней загрязнения строительных конструкций объектов и территории КЧХК. Анализ данных измерений (Научно-технический отчет). М. 2007. РНЦ «Курчатовский институт». Инв. № 241-11/161.
6. Государственный мониторинг геологической среды // Информационный бюллетень о состоянии геологической среды на территории Кировской области за 2005 год. Вып. 11. Киров: ОГУ ВятНТИЦМП, 2006. 170 с.
7. Тарасова Е.М. Конспект флоры сосудистых растений Кирово-Чепецкого района Кировской области. Кирово-Чепецк. 2000. 54 с.
8. Оценка и мониторинг антропогенного влияния на природный комплекс и здоровье населения в районе промышленной агломерации гг. Киров–Кирово-Чепецк (Отчет НИР). Киров: ВятГГУ, 2002. 348 с.
9. Глаголев А.В., Вольницкая Е.П., Лемешко А.П. Результаты полевого обследования состояния недр в районе территории объектов «РОСРАО» – выводы и предложения // Современная радиэкологическая обстановка в Кировской области. Объектовый мониторинг состояния недр и его роль в решении практических задач Госкорпорации «Росатом» по реабилитации радиационно-опасных объектов ФГУП «РосРАО»: Матер. науч.-практ. конф. Киров. 2009. С. 45–62.
10. Ашихмина Т.Я., Лемешко А.П., Кантор Г.Я., Дабак Е.В. Комплексное обследование территории в районе хранения радиоактивных отходов Кирово-Чепецкого отделения филиала «Приволжский территориальный округ» ФГУП «РосРАО» // Современная радиэкологическая обстановка в Кировской области. Объектовый мониторинг состояния недр и его роль в решении практических задач Госкорпорации «Росатом» по реабилитации радиационноопасных объектов ФГУП «РосРАО»: Матер. науч.-практ. конф. Киров. 2009. С. 63–76.
11. Кислицина А.П., Савиных О.А. Опыт использования воды, загрязненной нитратным и аммонийным азотом, для питания растений // Проблемы региональной экологии в условиях устойчивого развития: Матер. VII Всерос. науч.-практ. конф. в 2-х част. Киров: ООО «Лобань», 2009. Ч. 2. С. 76–78.
12. Прошина А.Н., Журавлева Е.С., Скугорева С.Г. Содержание нитрата аммония в водных объектах в зоне влияния Кирово-Чепецкого химического комбината // Экология родного края – проблемы и пути их решения: Матер. Всерос. науч.-практ. конф. молодежи Киров: ООО «Лобань», 2010. С. 158–159.
13. Лемешко А.П., Ашихмина Т.Я. Радиоактивное загрязнение грунтовых вод в районе размещения хранилищ РАО // Экология родного края – проблемы и пути

их решения: Матер. Всерос. науч.-практ. конф. молодежи. Киров: ООО «Лобань», 2010. С. 160–161.

14. Лемешко А.П., Кантор Г.Я., Ашихмина Т.Я. Состояние грунтовых вод в районе хранения радиоактивных отходов // Экология родного края – проблемы и пути их решения: Матер. Всерос. науч.-практ. конф. молодежи. Киров: ООО «Лобань», 2010. С. 161–162.

15. Скугорева С.Г., Дабах Е.В., Адамович Т.А., Кантор Г.Я., Шуктомова И.И., Ашихмина Т.Я. Изучение состояния почв на территории вблизи Кирово-Чепецкого химического комбината // Теоретическая и прикладная экология. 2009. № 2. С. 37–46.

16. Дабах Е.В., Кислицына А.П., Савиных О.А. Изучение почв и растений при поливе их водой, загрязненной нитратным и аммонийным азотом // Инновационные технологии – в практику сельского хозяйства: Матер. Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 65-летию агрономического факультета. Киров. 2009. С. 130–133.

17. Дабах Е.В., Кантор Г.Я., Лемешко А.П. Состояние почв в зоне влияния Кирово-Чепецкого химического комбината // Современные проблемы загрязнения почв: Матер. III Междунар. конф. Москва. 2010. С. 80–84.

18. Скугорева С.Г., Адамович Т.А. Изучение ферментативной активности почв на территории вблизи Кирово-Чепецкого химического комбината // Мониторинг природных экосистем: Матер. Всерос. науч.-практ. конф. Пенза. 2009. С. 231–237.

19. Запольских Т.С., Адамович Т.А., Ферментативная активность почв техногенно нарушенных территорий (на примере территории вблизи Кирово-Чепецкого химического комбината) // Экология родного края – проблемы и пути их решения: Матер. Всерос. науч.-практ. конф. молодежи. Киров: ООО «Лобань», 2010. С. 156–157.

20. Злобин С.С., Зыкова Ю.Н., Адамович Т.А., Скугорева С.Г., Домрачева Л.И., Дабах Е.В., Кантор Г.Я. Интенсивность развития микробных комплексов в почвах в зоне влияния Кирово-Чепецкого химического комбината // Экология родного края – проблемы и пути

их решения: Матер. Всерос. науч.-практ. конф. молодежи. Киров: ООО «Лобань», 2010. С. 55–58.

21. Скугорева С.Г., Шихова Ю.В., Желвакова М.А., Адамович Т.А., Кантор Г.Я. Состояние снегового покрова в зоне влияния Кирово-Чепецкого химического комбината // Экология родного края – проблемы и пути их решения: Матер. Всерос. науч.-практ. конф. молодежи. Киров: ООО «Лобань», 2010. С. 163–167.

22. Новокшённова Я.В., Адамович Т.А., Скугорева С.Г., Кантор Г.Я. Оценка содержания загрязняющих веществ в снеговом покрове территории вблизи Кирово-Чепецкого химического комбината // Экология родного края – проблемы и пути их решения: Матер. Всерос. науч.-практ. конф. молодежи. Киров. 2009. С. 46–48.

23. Адамович Т.А., Кантор Г.Я., Ашихмина Т.Я. Использование методов дистанционного зондирования при оценке антропогенно нарушенных территорий в районе Кирово-Чепецкого химического комбината // Экология родного края – проблемы и пути их решения: Матер. Всерос. науч.-практ. конф. молодежи. Киров: ООО «Лобань», 2010. С. 154–155.

24. Скугорева С.Г., Дабах Е.В., Адамович Т.А., Кантор Г.Я., Ашихмина Т.Я. Загрязнение ртутью почв и донных отложений в зоне влияния Кирово-Чепецкого химического комбината // Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты: Матер. междунар. симпозиума. Москва. 2010. С. 203–207.

25. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.

26. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009: Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09 // Собрание законодательства Российской Федерации, 1996, № 3, ст. 141; 2004, № 35, ст. 3607; 2008, № 30 (ч. 2), ст. 3616.

Работа выполнена в рамках конкурсного проекта на получение гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных – кандидатов наук (МК-7588.2010.5).

Биогеохимическая миграция элементов-загрязнителей в урбоэкосистеме

© 2010. Т. А. Михайлова, д.б.н., зав. лабораторией, О. В. Шергина, к.б.н., н.с.,
Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН,
e-mail: mikh@sifibr.irk.ru, sherolga80@mail.ru

В пределах урбанизированной территории (на примере г. Иркутска) исследовано содержание серы и тяжёлых металлов (свинца, кадмия, меди, цинка) в системе «генетический профиль почв – древесная растительность». Показано высокое накопление элементов-загрязнителей в хвое сосны и лиственницы, листьях берёзы и тополя, а также во всех генетических горизонтах серых лесных почв города. Выявлен дисбаланс элементов в ассимиляционных органах городских деревьев, выражающийся в увеличении доли элементов-загрязнителей на фоне снижения долей азота, фосфора, кальция, магния, калия, марганца. Обнаружена тесная связь между концентрацией поллютантов в хвое (листьях) деревьев и их содержанием в генетических горизонтах почвенного профиля. Полученные результаты свидетельствуют о высокой миграционной способности элементов-загрязнителей в системе почвенного профиля и их активном поступлении в ассимиляционные органы древесных растений из всех горизонтов городских почв. Заключается, что данные о биогеохимической миграции и аккумуляции элементов-загрязнителей в почвах и ассимиляционных органах древесных растений дают возможность адекватно оценить степень техногенной нагрузки на урбоэкосистему.

Within an urbanized territory (by the example of Irkutsk) the content of sulfur and heavy metals (lead, cadmium, copper, zinc) was investigated in the system «genetic soil profile – woody vegetation». High amount of pollutants is found out in the needles of pine and larch, as well as in birch and poplar leaves and in all genetic horizons of grey forest soils. An imbalance of elements in the assimilation organs of city trees is found out. It consists in increasing the amount of pollutants and lessening the amount of nitrogen, phosphorus, calcium, magnesium, potassium, manganese. There was found a close connection between pollutants' concentration in needles (leaves) of trees and their amount in the genetic horizons of soil profile. The results show the ability of pollutants to migrate within the system of soil profile, pollutants get into the assimilation organs of woody plants from all the city soil horizons. It was stated that the data showing biogeochemical migration and pollutants' accumulation in soils and in assimilation organs of woody plants give a good opportunity to estimate the degree of technoigenic impact on the urban ecosystem.

Ключевые слова: урбоэкосистема, промышленное загрязнение, диоксид серы, тяжёлые металлы, древесные растения, генетический профиль почв

Key words: an urban ecosystem, industrial pollution, sulfur dioxide, heavy metals, woody plants, genetic profile of soil

В связи с усилением урбанизации возрастает актуальность исследований состояния окружающей среды городов, особенно тех её компонентов, которые выполняют ключевые средообразующие и средозащитные функции – зелёных насаждений и почвенного покрова. Современные города характеризуются высокой интенсивностью и масштабностью химического загрязнения, поэтому их можно рассматривать как техногенные биогеохимические провинции [1, 2]. Исходя из этого, при оценке качества окружающей среды, на урбанизированных территориях возникает необходимость исследования процессов биогеохимической миграции загрязняющих веществ в системе «почва – растение». Результаты таких исследований дают возможность не только

выявить и спрогнозировать негативные изменения в урбоэкосистемах, но и разработать научно обоснованные рекомендации для оптимизации состояния растений и почвенного покрова в городах.

Постоянно действующими сильными негативными факторами в урбоэкосистемах являются техногенные выбросы и высокая рекреационная нагрузка, именно к ним в первую очередь вынуждены адаптироваться почвы и растения. Анализ данных наших многолетних исследований свидетельствует, что почва как компонент урбоэкосистемы обладает большей устойчивостью к антропогенной нагрузке, более высокой способностью к нейтрализации загрязняющих веществ, чем растительность. Древесные растения, особенно хвойные, являются компонентом, более

уязвимым для воздействия антропогенных факторов. В комплексных исследованиях урбоэкосистем оба эти компонента – почвенный покров и древесная растительность – рассматриваются как высокоинформативные индикаторы накопления и перераспределения поступающих с выбросами химических элементов и их соединений в экосистеме города [3]. Поэтому взаимосвязанное изучение почв и древесных растений позволяет объективно оценить интенсивность техногенного пресса и степень неблагополучия экологической ситуации в городе.

Цель данной работы – исследовать биогеохимическое перераспределение потоков элементов-загрязнителей (серы, свинца, кадмия, меди, цинка) на урбанизированной территории в системе «генетический профиль почв – древесные растения».

Исследования проводились в 2002–2007 гг. на территории города Иркутска – административного и промышленного центра Восточной Сибири. Город включён в приоритетный список населённых пунктов РФ с самым высоким уровнем загрязнения. В 2009 г. индекс загрязнения атмосферного воздуха в Иркутске составил 21,1 [4]. В городе насчитывается 178 предприятий и более 300 котельных. На данный момент основным и наиболее опасным источником загрязнения атмосферы Иркутска является автотранспорт, на его долю приходится около 60% от общего количества выбросов. Такой высокий показатель связан с ежегодным увеличением (на 12–15%) количества автомобилей на дорогах Иркутска. С выбросами промышленности и автотранспорта в атмосферу города поступает до 140 тыс. т токсичных аэрозолей, кислотных компонентов, а также металлов преимущественно в растворимой форме. При этом в атмосферном воздухе выявлено превышение ПДК по 46 вредным веществам [5]. Так, уровень растворимых форм тяжёлых металлов в атмосферном воздухе города составляет 4–10 ПДК, диоксида серы – 6 ПДК [6, 7].

Высокая степень загрязнения города обусловлена также сложными орографическими и климатическими особенностями, препятствующими самоочищению приземного слоя атмосферы. Повышенная влажность воздуха и слабая продуваемость замкнутой котловинной территории Иркутска приводят к формированию сложных ореолов высоких концентраций токсичных соединений, часто с эффектом суммации и синергизма. Высокая загрязнённость воздушного бассейна Иркутска обуславливает

в свою очередь значительный уровень загрязнения зелёных насаждений и почвенного покрова.

Иркутск расположен в зоне подтаёжных сосновых лесов. Почвенный покров представлен преимущественно супесчаными и суглинистыми серыми лесными почвами, формирование которых происходило на продуктах выветривания юрских пород. Для исследования процессов биогеохимической миграции токсикантов в системе «почва–растение» были выбраны парковые и лесопарковые зоны города. Почвы на этих участках сохранили естественное расположение горизонтов в генетическом профиле и природные геохимические свойства, а насаждения лучше адаптируются к загрязнению. Всего было обследовано 16 ключевых участков (парков и лесопарков), расположенных в разных районах города – в центральном, северо-западном, восточном и на городских окраинах. Фоновые участки выбирались на значительном удалении от промышленного центра (в 50–120 км) в естественных лесах Предбайкалья с идентичным генезисом почв.

Объектами исследования служили серые лесные почвы и древесные породы: сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.), тополь (*Populus* sp.), береза повислая (*Betula pendula* Roth). На каждом ключевом участке проводился отбор проб хвои (листьев) на содержание химических элементов, исследовался также ряд морфоструктурных параметров крон деревьев. Обследование почв осуществлялось как методом отбора проб по генетическому профилю до глубины 1,5 м, так и квадратно-конвертным способом усреднённых проб из верхних слоев (0–20 см) почвенного покрова.

В лабораторных условиях в растительных образцах определяли содержание серы общей, а в почвенном растворе – концентрацию подвижных форм серы турбидиметрическим методом осаждения сульфата хлоридом бария [8]. Измерение валовых и подвижных форм тяжёлых металлов в растительных и почвенных образцах производилось методом атомной абсорбции с электротермической атомизацией на приборе-компьютере AAS Vario-6 [9]. Содержание биогенных элементов (азота, фосфора, калия, натрия, кальция, магния, марганца) в ассимиляционных органах древесных растений и почвенном растворе определялось в соответствии с международной методикой ICP Forests [10].

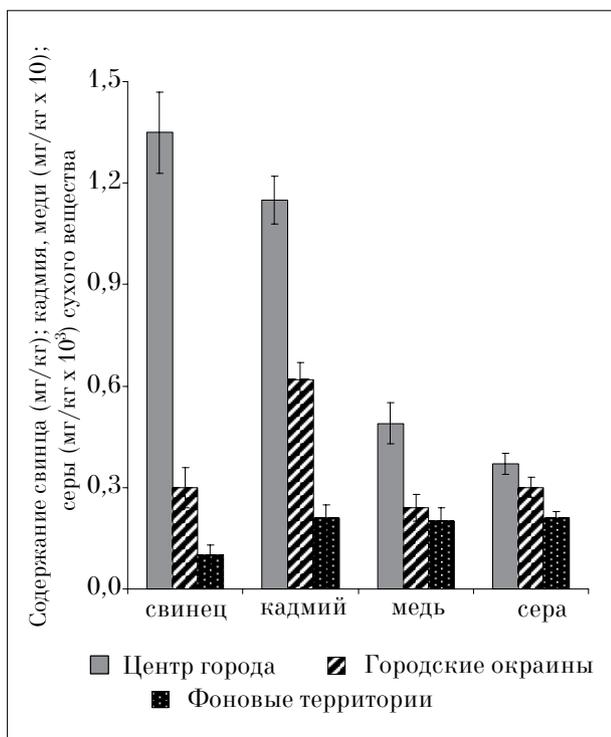


Рис. 1. Содержание элементов-загрязнителей в хвое сосны на городских и фоновых территориях

Полученные результаты свидетельствуют о значительном накоплении тяжёлых металлов и серы в ассимиляционных органах древесных растений Иркутска (рис. 1). Так, концентрация свинца в хвое сосны, произрастающей в центре города, превышает фоновые значения в 13,5 раза, кадмия – в 5,5, меди – в 2,5, серы – в 2. Для деревьев, произрастающих на городских окраинах, выявлено небольшое (до 3 раз) превышение элементов-загрязнителей в хвое и листьях растений.

Следует отметить, что на городских территориях, расположенных вблизи ТЭЦ и ряда промышленных предприятий (заводы сборного железобетона, авиационный, кирпичный), выявляются аномально высокие концентрации тяжёлых металлов и серы в ассимилирующей

фитомассе деревьев. Превышение фоновых уровней свинца в хвое сосны и листьях берёзы достигает 25 раз, в хвое лиственницы – 20, в листьях тополя – 15.

Воздействие элементов-загрязнителей на городские древесные растения является одним из факторов ухудшения их морфоструктурных параметров. Выявлены корреляционные связи высокого уровня значимости между характеристиками крон деревьев и содержанием свинца в их хвое (табл. 1). Достоверные корреляционные связи обнаружены также между содержанием серы, кадмия, меди и измеренными морфоструктурными показателями деревьев. На фоновых территориях корреляции не достоверны.

На основании этих связей были установлены математические зависимости между ростовыми параметрами деревьев и содержанием элементов-загрязнителей в ассимиляционных органах. Все показатели (суммарное содержание элементов-поллютантов, величины морфоструктурных параметров) нормировались относительно фоновых значений, которые принимались за один балл. Нормирование производилось по программе STATISTICA. Полученные зависимости (табл. 2) позволяют рассчитать возможное изменение ростовых параметров древесных растений (на примере сосны) при разном уровне содержания элементов-загрязнителей в ассимилирующей фитомассе. Так, при увеличении концентрации поллютантов в хвое сосны происходит выраженное увеличение дефолиации крон деревьев, снижение длины побегов, массы и длины хвои.

В условиях техногенного загрязнения в хвое и листьях деревьев происходят нарушения в соотношениях элементов [11]. Нами показано, что в ассимиляционных органах городских деревьев увеличивается доля серы, свинца, кадмия, меди на фоне снижения долей

Таблица 1

Коэффициенты корреляции между морфоструктурными показателями крон деревьев и содержанием свинца в их хвое ($P=0,05, n=16$)

Параметры	Сосна	Лиственница
Масса хвои побега*	-0,69	-0,65
Масса 100 хвоинок	-0,66	-0,71
Охвоенность побега	-0,72	-0,63
Длина побега	-0,78	-0,53
Длина хвои	-0,72	-0,75
Уровень дефолиации крон	0,74	0,64
Уровень дехромации хвои	0,69	0,71

Примечание: *учитывались побеги 2-го года жизни.

Таблица 2

Зависимости между морфоструктурными параметрами крон деревьев сосны и накоплением элементов-загрязнителей (сумма содержания серы, свинца, кадмия, меди) в их хвое ($P=0,05, n=16$)

Параметры	Уравнение (полином)	Величина достоверности аппроксимации (R^2)
Масса хвои одного побега	$y^*=0,05x^2-1,27x^{**}+13,77$	$R^2 = 0,84$
Длина побегов	$y=0,10x^2-2,12x+13,19$	$R^2 = 0,81$
Длина хвои	$y=0,02x^2-0,67x+12,96$	$R^2 = 0,82$
Уровень дефолиации крон	$y= - 0,07x^2+1,79x+0,41$	$R^2 = 0,85$

Примечание: *у – морфоструктурные параметры деревьев, балл, **x – уровень накопления (в сумме) загрязнителей в хвое, балл.

азота, фосфора, кальция, магния, калия, марганца (табл. 3). Так, при увеличении концентрации свинца в 15 раз в хвое сосны и листьях березы доля азота и фосфора уменьшается в 8–9 раз, кальция и калия – в 12–13, марганца – в 20, магния – в 30. При увеличении концентрации техногенной серы в 2 раза в хвое и листьях деревьев центральной части города доля азота, фосфора, кальция уменьшается в 1,5 раза, магния, калия – в 2–3, марганца – в 3,5–4,5. На городских окраинах дисбаланс между элементами наименьший. Полученные результаты косвенно свидетельствуют о более высокой токсичности свинца и его соединений для растительного организма.

Исследование почв Иркутска проводилось по всему генетическому профилю, который включает совокупность следующих горизонтов: О – Ad – А – АВ – В (ВЕ) – Vf,t – ВС – С. Каждый из этих горизонтов характеризуется определенными морфологическими призна-

ками: О – маломощная (1–2 см) органическая подстилка средней степени разложения; Ad – гумусово-аккумулятивный горизонт мощностью от 5 до 12 см; А – гумусово-элювиальный горизонт (5–15 см); АВ – переходный элювиально-иллювиальный горизонт (10–20 см); В(ВЕ) – иллювиальный горизонт (10–40 см); Vf,t – иллювиальный текстурный горизонт (15–40 см); ВС – переходный горизонт от иллювиального к почвообразующей породе (15–50 см); С – почвообразующий горизонт (20–70 см).

Полученные результаты свидетельствуют о выраженном изменении содержания подвижных форм серы, свинца, кадмия, меди, цинка по вертикали генетического профиля городских почв. Так, уровень свинца в горизонтах почв (от Ad вглубь до С) может превышать фоновые значения от 2 до 20 раз, кадмия – от 2 до 10, меди – от 1,5 до 15. На примере свинца и серы показано, что

Таблица 3

Изменение соотношений концентраций биогенных элементов и элементов-загрязнителей в хвое и листьях деревьев городских и фоновых территорий

Соотношение элементов	Сосна			Берёза		
	Центр города	Городские окраины	Фон	Центр города	Городские окраины	Фон
Свинец						
N/Pb	1,3	4,2	11,8	1,9	5,8	10,3
P/Pb	2,3	4,6	19,3	2,9	8,6	12,4
Ca/Pb	5,1	16,4	59,8	7,2	24,1	51,3
Mg/Pb	1,8	12,9	54,5	4,1	24,7	38,1
K/Pb	1,1	3,9	14,9	2,3	5,3	10,5
Mn/Pb	1,2	17,6	23,4	2,5	17,5	24,7
Сера						
N/S	4,2	4,6	5,8	4,3	4,8	6,9
P/S	5,6	6,3	8,7	5,7	6,1	8,3
Ca/S	21,3	25,3	28,2	28,9	30,5	34,2
Mg/S	8,2	15,8	24,7	7,8	17,3	25,3
K/S	3,1	4,2	6,8	3,4	4,5	6,5
Mn/S	1,9	5,3	8,2	4,5	12,5	16,5

наибольшее содержание подвижных форм элементов-загрязнителей обнаруживается в верхних гумусово-аккумулятивных горизонтах почв (рис. 2), что объясняется прочной фиксацией этих элементов органическим веществом. В минеральных горизонтах В(ВЕ) отмечается снижение уровня свинца и серы, что обусловлено промывным типом режима серых лесных почв городской территории. В иллювиальных текстурных горизонтах концентрация токсикантов снова возрастает за счет прочной фиксации ионов свинца и серы иллювиальными коллоидами. В почвообразующих горизонтах зарегистрировано значительное увеличение содержания свинца и серы в сравнении с фоновым уровнем, что свидетельствует об активном вертикальном перемещении этих элементов с фильтрационными водами.

На городской территории обнаружены также значительные изменения в составе почвенного поглощающего комплекса (ППК): уровень обменных форм кальция в верхних горизонтах почв увеличивается по сравнению с фоновым в 1,4–10 раз, магния и калия – в 1,2–2,5, натрия – в 1,2–6. О поступлении этих элементов на поверхность почвы с техногенными выбросами и их дальнейшей

вертикальной миграции в почвенном профиле свидетельствуют достоверные корреляционные связи ($r = 0,75-0,90$) между содержанием этих элементов в органической подстилке и в почвенных генетических горизонтах: Ad (гумусово-аккумулятивном), Bt,f (иллювиальном текстурном), C (почвообразующем).

Смещение реакции почвенного раствора в сторону подщелачивания (вблизи автодорог) либо подкисления (в зонах промышленных предприятий) также является фактором нарушения химического равновесия почв Иркутска. Установлено, что при изменении кислотности городских почв происходит взаимодействие свинца, кадмия, меди, серы с обменными катионами ППК в системе почвенного профиля, причём во всех его горизонтах. В почвах фоновых районов подобные взаимодействия выявляются только в гумусовых и почвообразующих горизонтах и в меньшей степени.

При сопоставлении данных о содержании токсикантов в почвенных горизонтах с их концентрацией в хвое и листьях деревьев на городской территории установлены прямые корреляционные связи. Например, довольно высоки коэффициенты корреляции между накоплением свинца в горизонтах почв и его содержанием в ассимиляционных органах растений ($r = 0,52-0,75$) (табл. 4). Исходя из этих данных, можно говорить о наличии процесса высвобождения свинца в почвенный раствор и об его активном поступлении в корневую систему и далее в ассимиляционные органы древесных растений из всей глубины профиля серых лесных почв города.

В целом полученные результаты свидетельствуют, что при техногенном загрязнении городской среды происходит активное накопление и интенсивная миграция элементов-загрязнителей в системе «почва – древесные растения». Показано, что поллютанты неорганической природы (тяжёлые металлы и диоксид серы) оказывают сильное негативное воздействие на минеральный статус деревьев и физико-химические свойства почв. На городской территории аккумуляция токсикантов в ассимиляционных органах древесных растений является значимым фактором, вызывающим нарушение их ростовых характеристик. Уровень элементов-загрязнителей в хвое и листьях городских деревьев превышает их фоновое содержание от 2 до 25 раз, что вызывает дисбаланс между биогенными элементами и поллютантами. Существенно увеличивается

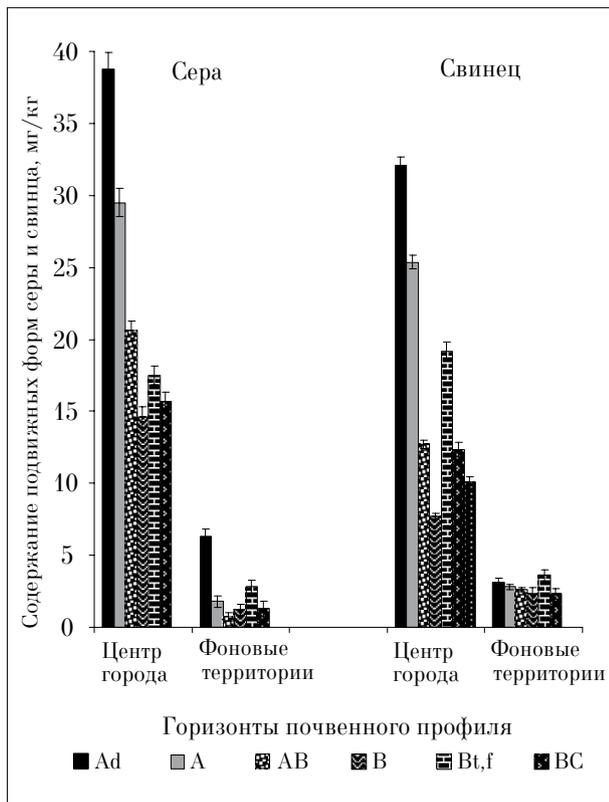


Рис. 2. Содержание подвижных форм серы и свинца в генетических горизонтах городских и фоновых почв

Таблица 4

Коэффициенты корреляции между содержанием свинца в горизонтах почв и хвое (листьях) деревьев на городской территории ($P=0,05, n=16$)

Объект анализа	Индексы горизонтов почвенного профиля							
	O	Ad	A	AB	B(BE)	Bt,f	BC	C
Хвоя сосны	0,73	0,61	0,71	0,70	0,60	0,68	0,63	0,71
Хвоя лиственницы	0,54	0,62	0,58	0,68	0,55	0,54	0,54	0,67
Листья берёзы	0,59	0,74	0,62	0,54	0,67	0,65	0,62	0,61
Листья тополя	0,61	0,69	0,75	0,60	0,52	0,58	0,52	0,63

доля свинца, а также серы на фоне снижения долей азота, фосфора, кальция, магния, калия, марганца.

Обнаружено значительное содержание элементов-загрязнителей во всех генетических горизонтах серых лесных почв. Особенно высокий их уровень выявлен в гумусово-аккумулятивных и иллювиальных текстурных горизонтах, где фоновые значения превышены в 20 раз. Установлены нарушения в составе ППК, обусловленные изменением кислотного режима и увеличением содержания элементов-загрязнителей в почвенном растворе генетических горизонтов. Наличие достоверных корреляционных связей между содержанием элементов-загрязнителей в горизонтах почвенного профиля и уровнем их концентрации в хвое и листьях городских деревьев подтверждает высокую экологическую значимость почвенного покрова и древесных растений в перераспределении потоков загрязняющих веществ на урбанизированной территории.

Литература

1. Ковальский В.В. Геохимическая экология. М.: Наука, 1974. 298 с.
2. Экология города. М.: Научный мир, 2004. 624 с.
3. Шергина О.В., Михайлова Т.А. Состояние древесных растений и почвенного покрова парковых и ле-

сопарковых зон г. Иркутска. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2007. 200 с.

4. Государственный доклад. О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2008 году. Иркутск: Облмашинформ, 2009. 410 с.

5. Региональный экологический атлас. Новосибирск: СО РАН, 1998. 321 с.

6. Экогеохимия городов Восточной Сибири. Якутск: Институт мерзлотоведения СО РАН, 1993. 108 с.

7. Атлас. Иркутская область (экологические условия развития). Москва–Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2004. 90 с.

8. Мочалова А.Д. Спектрофотометрический метод определения серы в растениях // Сельское хозяйство за рубежом. 1975. № 4. С. 17.

9. Пройдакова О.А., Цыханский В.Д., Матвеева Л.Н., Гормашева Т.С., Халтуева В.К. Физико-химические методы при определении макро- и микроэлементов в объектах окружающей среды // Геохимия техногенеза. Новосибирск: Наука, 1986. С. 124–130.

10. Manual on methodologies and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Hamburg and Prague. United Nations Environment Programme and Economic Commission for Europe. 1994. 477 p.

11. Михайлова Т.А., Бережная Н.С., Игнатьева О.В. Элементный состав хвои и морфофизиологические параметры сосны обыкновенной в условиях техногенного загрязнения. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2006. 134 с.

Мышьяк в природных системах и его эссенциальность

© 2010. С. Н. Курсков, к.х.н., в.н.с., О. Ю. Растегаев, к.х.н., нач. отдела,
В. Н. Чупис, д.ф.-м.н., директор,
Государственный научно-исследовательский институт промышленной экологии,
e-mail:ecovector@sar-ecoinst.org

В статье представлены сведения по наличию мышьяка в различных природных минеральных и органических системах. Особое внимание уделено масс-спектрометрическому методу исследования мышьяка в воде, продуктах питания и в организме человека.

The article presents the data on the presence of arsenic in different natural mineral and organic systems. Special attention is paid to the mass-spectrometric method of arsenic research in water, food and a human organism.

Ключевые слова: мышьяк, эссенциальность, природная вода,
биологические объекты, среда обитания

Key words: arsenic, essentiality, natural water,
biological objects, environment

Мышьяк относится к числу тех химических элементов, которые имеют ограниченный спрос в практической деятельности человека. Тема настоящей статьи определена рядом обстоятельств: во-первых, показана роль этого элемента, который, по последним исследованиям, может проявлять эссенциальные свойства. Во-вторых, соединения этого элемента применяются как классические яды и ряд соединений мышьяка использовался как отравляющие вещества против человека. В-третьих, мышьяксодержащие соединения применяются для защиты среды обитания и самого человека от био-разрушений. Мышьяксодержащие препараты до сих пор используются также в виде различных лекарственных средств человека и животных. Мышьяк и его соединения находят и другое применение в человеческой деятельности.

В связи с этим безопасное использование мышьяка является до сих пор актуальной экологической проблемой и привлекает в последнее время не только исследователей в этой области, но и не оставляет равнодушным население. Вот почему анализ мышьяка и определение его допустимых концентраций в среде обитания человека, и в частности в питьевой воде, продуктах питания, являются необходимой и актуальной задачей.

Мышьяк в минеральных природных системах

Мышьяк – 33 элемент периодической системы элементов Д. И. Менделеева. Природный мышьяк состоит из одного стабильного изотопа (^{75}As). В литературе нет однозначного мнения о содержании его в земной коре. По одним данным кларк мышьяка по массе равен 0,00017% [1], по другим данным – 0,0005% [2]. В целом количество мышьяка в земной коре равно 0,00005% [3].

В почвах территорий бывшего СССР элемент распределен достаточно равномерно. Его содержание превышает кларковое (5 мг/кг) не более чем в 2 раза. Тем не менее в некоторых почвах, например, в Южной Фергане, мышьяка больше – 10–20 мг/кг, повышенное содержание мышьяка в почвах Закавказья, в частности Грузии, обусловлено расположением там мышьяксодержащих месторождений или металлургических объектов, перерабатывающих полиметаллические руды [4, 5].

Концентрация мышьяка в морской воде находится в пределах 2–3 мкг/л [6, 7], возрастает до 6 мкг/л в прибрежных водах Японии и колеблется в разных районах Мирового океана от 0,15 до 10 мкг/л, а общее количество мышьяка, растворенного в водах Мирового океана, составляет 3–5 млрд. т [4].

Пресноводные бассейны отличаются большим разбросом концентраций мышьяка. Обычно без очевидного влияния источников загрязнения – техногенного или природного – содержание мышьяка не превышает 10 мкг/л, а средний диапазон концентраций определяется и достигает 0,6–25 мкг/л, к примеру, в бывшем СССР (Орск) – менее 2 мкг/л [5]. В районах, где отсутствуют промышленные выбросы, количество мышьяка в пресноводных источниках в среднем составляет 1 мкг/л.

Пресные воды ряда стран содержат мышьяк в следующих концентрациях, мкг/л: реки Швеции 0,2–4; в ФРГ наибольшая концентрация мышьяка содержится в Эльбе 20–25, в других реках Германии – от 1 до 15. Реки и озёра США обладают достаточно широким диапазоном концентраций от 1,6 до 1100, причём в озёрах Калифорнии концентрация мышьяка доходит до 2000, а в озере Сиэрлис – 243000, что является рекордным для такого рода водоёмов. Грунтовые воды США содержат мышьяк в количестве 1 мкг/л; в Японии – 0,16–7,7; Швеции (Шеллефтсто) – 0,9–2,2; реки Англии, Швеции, Норвегии, Италии обладают пониженным содержанием мышьяка, который определён диапазоном 0,2–0,4; термальные и подземные воды большинства стран, в том числе США и России, содержат чаще всего повышенные концентрации мышьяка со средним диапазоном концентраций от 1000 до 280000 мкг/л [8].

В СССР было выявлено около 40 месторождений минеральных вод с содержанием мышьяка более 700 мкг/л. Высокий уровень этого элемента наблюдается в углекислых минеральных источниках (60000–70000 мкг/л), а в кислых купоросных он превышает 200000 мкг/л. Мышьяк содержащие источники СНГ относятся к различным бальнеологическим группам минеральных вод: углекислым (1000–70000 мкг/л мышьяка); железистым с высоким содержанием марганца, алюминия, меди, цинка, включающим кислые рудничные воды (до 280000 мкг/л); кислым фумарольным (1000–2000 мкг/л); кремнистым термальным (1000 мкг/л); бромным и йодобромным (до 1500 мкг/л мышьяка) [5].

Среднее содержание мышьяка в почвах многих стран определено в 3,6 мг/кг. В районах вулканических явлений (Япония, Италия, Мексика, США) оно достигает 20 мг/кг. А в почвах Японии содержание мышьяка доходит до 210 мг/кг [9], в районе Буне (Швейцария) и долине Вайотану (Новая Зеландия) – до 10 000 мг/кг [8].

Мышьяк в биологических системах

В живом веществе содержатся небольшие количества мышьяка. Весьма богаты им морские организмы, некоторые содержат до 1% мышьяка. Морская водоросль ламинария, используемая в качестве пищевого продукта, имеет до 0,01% мышьяка.

У наземных животных средняя концентрация мышьяка в тканях организма не превышает 0,00002%. В биологических материалах человека его содержание выражается тоже близкими величинами, причём в моче – 3–150 мкг/л (ppb), крови – 10–640 ppb, волосах – 0,036–0,88 ppb, ногтях – 0,087–4 ppb [3]. Но данные о содержании мышьяка в различных органах человека и продуктах их физиологической деятельности, имеющиеся в литературе, порой неоднозначны. Тем не менее относительно согласуются сведения, подтверждающие низкое количество элемента в головном мозге и высокое – в волосах, ногтях, коже и мышцах. Обычное содержание мышьяка в волосах у людей не превышает 1 мг/кг и укладывается в диапазон от 0,01 до 1,1 мг/кг [10]. При отравлениях мышьяком оно резко возрастает до нескольких сотен мг/кг, вплоть до 6000 мг/кг в экстремальных условиях [11]. В ногтях, обычно содержащих 1,5–5 мг/кг мышьяка [5], в случае острого мышьякового отравления концентрация его возрастает до 20–120 мг/кг [12].

В обзорах [10, 13] даётся достаточно полная информация о последствиях воздействия соединений мышьяка на человека и животных. В работе [14] отмечается, что при отравлении повышается содержание мышьяка в моче до 0,5–5 мг/л, крови – 0,1–5 мг/л, волосах – до 20–100 ppb, ногтях – 500 ppb. В то же время подчёркивается, что количество мышьяка в волосах человека и животных не коррелирует с выраженностью симптомов отравления.

Повышенное содержание мышьяка в ногтях и волосах объясняется как возможностью пассивной адсорбции его из окружающей среды, так и тем, что аккумуляция элемента волосными и роговыми образованиями, не принимающими активного участия в общем обмене веществ, является одним из путей выведения токсического вещества из организма с постоянно сбрасываемыми и обновляемыми эктодермальными производными [8].

Содержание мышьяка в моче человека в обычных условиях составляет по [5] 30–50 мкг/л, по [15] – 13–23 мкг/л. Установлено, что потребление продуктов питания с большим

содержанием мышьяка, например, морепродуктов, ведёт к росту его концентрации в моче в десятки раз и может достигнуть 1000 мкг/л [10]. Данные о содержании мышьяка в моче используются для оценки токсического воздействия соединений мышьяка на организм, однако при этом следует учитывать особенность диеты. Критическим уровнем отравления считается пороговая величина в 200 мкг/л [15].

Интересно, что в молоке животных содержание его довольно мало – 0,01–0,05 мг/кг [11] и не возрастает при добавлении в корм соединений мышьяка и увеличении концентрации мышьяка в крови, что свидетельствует о существовании в молочных железах защитного механизма, препятствующего попаданию излишнего количества этого элемента в их секрет. В продаваемых молочных продуктах содержание мышьяка колеблется от 0,003 до 0,03 мг/кг [5, 12]. А содержание мышьяка в других пищевых продуктах находится в диапазоне 0,003–1,4 мг/кг влажной массы [5].

Содержание мышьяка в растениях, произрастающих на незагрязнённых почвах, составляет 0,01–5 мг/кг сухой массы [10]. Стоит отметить, что значительная часть мышьяка, находящегося в почве, сорбируется коллоидными частицами почвы, мицеллами, содержащими железо и алюминий. Это делает элемент малодоступным для всасывания и ограничивает поступление его в биологическую среду. В связи с этим содержание мышьяка в растениях редко превышает 1 мг/кг сырой массы. Концентрация мышьяка в тканях высших растений имеет тенденцию убывать от корней к верхней части.

Биохимические, токсикологические и физиологические функции мышьяка. Действие мышьяка на биологические объекты, человека и среду его обитания

Несмотря на то, что мышьяк и его соединения являются всем известными ядами и, попадая в организм в большом количестве, оказывают токсическое действие, в малых дозах мышьяк может обладать лечебными свойствами. С глубокой древности и поныне мышьяк применяется в качестве лекарственных препаратов для лечения широкого круга болезней: кожных и венерических, желудочно-кишечных, ревматизма и невралгии, артрита, астмы, а также холеры, малярии, туберкулёза, диабета, анемий, неврастении, лейкемии [16 – 19].

Особое внимание в работе [8] обращается на благотворные эффекты минеральных вод, содержащих неорганические соединения мышьяка. Известно, что на территории бывшего СССР их запасы достаточно велики [5]. Эффективность таких вод заключается в том, что мышьяк при их употреблении активно всасывается, но медленнее, чем препараты, выводится из организма, что обеспечивает более длительное лечебное действие при меньших дозах мышьяка, чем определено фармакопеей.

Минеральные воды, содержащие мышьяк, характеризуются целым рядом ценных бальнеологических показателей: способствуют улучшению состава крови, быстрому заживлению ран. В работе [8] указывается, что благотворное действие мышьяксодержащих минеральных вод достигается прежде всего присутствием в них биологически активного микроэлемента – мышьяка в комплексе с другими микроэлементами, влиянием общей минерализации. В США не признают питьевой минеральные воды на основании высокой концентрации в ней одного лишь мышьяка.

По данным нашего масс-спектрометрического анализа, практически все минеральные воды с повышенным содержанием мышьяка содержат наряду с ним также широкий спектр тяжёлых металлов (V, Cr, Mn, Tl) и других достаточно опасных элементов с концентрацией, превышающей значения их ПДК (Li, Be, B, Si, As). Очевидно, что повышенные концентрации мышьяка в дистиллированной воде будут действовать на организмы иначе, чем в смеси из целого «букета биологически активных элементов», которые в этом случае дадут синергетический эффект, возможно, и положительный. Однако механизмы лечебного действия подобных вод изучены ещё явно недостаточно и требуют дальнейших исследований.

Известно, что пороговые дозы большого круга элементов ниже, чем у мышьяка. Например, у бериллия, кадмия, ртути, кобальта, меди, цинка, таллия, теллура, вольфрама, но ни один из них не отнесен к «злостным» ядам, каким считается мышьяк. Мышьяк, в понимании обычного человека, олицетворяет опасность и является синонимом слова «яд» [8].

До сих пор не стихают споры о канцерогенности мышьяка и его соединений [10]. Несмотря на многочисленные исследования токсических свойств мышьяка, эти данные пока не позволяют установить некоторые количественные закономерности, как например,

соотношение доза–эффект. Ясно следующее – токсичность зависит от структуры, состава соединения, растворимости, интенсивности метаболизма, а также от многих индивидуальных и видовых свойств живых существ. Научных представлений о механизме токсического действия до сих пор нет. Считается, что соединения трехвалентного мышьяка токсичнее пятивалентного. Возможно, что токсичное действие трёхвалентного мышьяка обусловлено блокировкой SH-групп ферментов, а пятивалентного мышьяка – влиянием на процессы окислительного фосфорилирования.

Стоит также отметить, что существующее до недавнего времени представление об аккумуляции соединений мышьяка в организме животных и человека не подтверждается более поздними результатами многочисленных экспериментальных работ. Представление о кумулятивном действии мышьяка было основано на данных, полученных на крысах, которые, как выяснилось позднее, в отличие от остальных животных, обладают накопительной способностью [5]. Таким образом, делается заключение, что в отличие от соединений тяжёлых металлов, таких, как ртуть, свинец, кадмий, способных аккумулироваться в живых организмах, мышьяк не накапливается в тканях, при этом имеет место динамическое равновесие между поступлением элемента в организм и его выделением.

Проблема канцерогенности соединений мышьяка, несмотря на многочисленные исследования, до сих пор не закрыта, и выдвигаемые гипотезы относительно канцерогенности мышьяка требуют более обоснованных экспериментальных доказательств, а не косвенных подтверждений. Проблему «мышьяк и рак» следует рассматривать в плоскости использования соединений мышьяка в качестве противоопухолевых препаратов, т. е. противоопухолевая активность соединений мышьяка была подтверждена целым рядом исследователей [5].

Соединения мышьяка действуют на иммунную систему. Изучение воздействия арсенитов, арсенатов, диметиларсиновой кислоты (ДМАК) в концентрациях от 0,5 до 1 мг/мл показало, что умеренные дозы увеличивают количество антителообразующих клеток. Большие дозы приводят к иммунодепрессивному состоянию. Подобное воздействие оказывают соединения мышьяка и на кроветворную систему – в малых дозах они способствуют увеличению лейкоцитов, эритроцитов и повышают гемоглобин, а при длительном воз-

действии больших концентраций происходят отрицательные изменения в составе крови.

Мышьяк и эссенциальность

Обобщая научные результаты по влиянию мышьяка на человеческий организм, можно заключить, что мышьяк в микродозах играет позитивную роль. Но достаточно ли всего этого, чтобы однозначно отнести мышьяк к эссенциальным микроэлементам? Вероятно, нет.

Мышьяк в составе специфических белков пока не известен. Поэтому мышьяк в своей роли более похож на серебро, которое, несомненно, играет положительную роль в жизнедеятельности человека, но в составе устойчивых комплексов или протеинов не замечен. Поэтому и серебро, и мышьяк следует отнести к особой группе условно эссенциальных элементов, которые действуют на ионном уровне либо в составе неспецифических молекул или ионов, чаще неорганических, проникающих в организм извне. Возможно, это вопрос времени и в последующем будут найдены доказательства эссенциальности этих элементов.

Идея эссенциальности мышьяка выкристаллизовывается из факта использования соединений мышьяка в качестве кормовых добавок, которые, в свою очередь, были получены в фармакологических исследованиях. Применение в качестве лекарственного средства 4-гидроксил-3-нитрофениларсоновой кислоты для борьбы с кокцидозом указывает на её способность стимулировать рост цыплят. Соединения мышьяка начали использоваться в качестве кормовых добавок с середины прошлого столетия и до настоящего времени во многих странах дают хороший экономический эффект. Наиболее распространёнными являются ариларсоновые кислоты и их соли, в частности арсаниловая кислота и её натриевая соль – атоксил. Подкормка активными добавками, содержащими мышьяк, увеличивает привесы млекопитающих и птиц, яйценоскость, усиливает оперение птиц, пигментацию, предотвращает кишечные заболевания свиней и птиц. Максимальные концентрации в свежем мясе обычно составляют 0,5 мг/кг, в субпродуктах – 20 мг/кг.

Опыт показывает, что отсутствие токсичных метаболитов, лёгкое и быстрое выведение мышьяка из организма животных делают безопасным применение мышьяксодержащих соединений в качестве кормовых добавок. Вполне возможно, что соединения

мышьяка уничтожают вредоносные микроорганизмы, вызывающие заболевания кишечника, подобно серебру и ряду других микроэлементов или антибиотиков. Имеется версия, что соединения мышьяка способствуют сохранению протеина в организме. В последующем, вероятно, будут найдены более тонкие механизмы участия мышьяка как незаменимого элемента в жизнедеятельности животных и человека.

Низшие растения значительно устойчивее к мышьяку, чем высшие растения. Так, водоросли могут содержать до 0,1% арсената калия, у высших растений подобное не замечено. Это говорит о том, что мышьяк проявляет свое биохимическое воздействие в разных видах живого и даже в разных частях одного организма неоднозначно, действуя то угнетающе на живой организм, то в прямо противоположном направлении.

Масс-спектрометрическое обнаружение мышьяка в природных объектах

В Государственном научно-исследовательском институте промышленной экологии (ГосНИИЭНП) начиная с 2002 г. методом масс-спектрометрии проводятся систематические исследования различных природных объектов. Масс-спектрометрия как метод элементного анализа на сегодняшний день является наиболее эффективным способом анализа подавляющего числа элементов таблицы Менделеева. Но в связи со спецификой и особенной направленностью научной деятельности самого ГосНИИЭНП большое внимание уделялось анализу мышьяка в различных природных объектах – воде, воздухе, почве. Также проводились первичные эксперименты по нахождению и оптимизации минерализации различных продуктов питания, в том числе растительного происхождения (листья, ягоды, орехи, семена), а также в моче, волосах.

После минерализации образцов, имеющих органические компоненты, анализ микроэлементного состава проводился с помощью масс-спектрометра ICP-MS/VG PQ ExCell Thermo Elemental по стандартной методике 200.8.

В настоящее время растёт внимание населения к проблемам питания, что, естественно, оказывает влияние на производство продуктов питания и культуру развития сельского хозяйства. Это, в свою очередь, стимулирует решение подобных проблем со стороны наук: от фундаментальных – физики, химии, биологии – до медицины и экологии.

В последнее время проводятся исследования по нахождению микроэлементов, в том числе эссенциальных, в продуктах питания, минеральной воде, а также разнообразных природных объектах, в том числе и в живом веществе, с использованием современных методов, таких, как масс-спектрометрия индуктивно связанной плазмы, атомно-абсорбционного и нейтронно-активационного методов анализа [20 – 22]. Масс-спектрометрический метод анализа отлично зарекомендовал себя при определении микроэлементов в природной воде, поскольку позволяет без существенной пробоподготовки провести практически полный анализ элементов, находящихся в воде. Это особенно важно, поскольку воздействие на организм того или иного элемента происходит не в дистиллированной воде. Химические соединения пищи и воды взаимодействуют прежде всего между собой, и лишь конечная составляющая такого процесса доходит до клеток живого организма.

Хотя химическое взаимодействие мышьяка с другими элементами в живых организмах практически не изучено [8], для некоторых из них давно замечена такая связь. Известна, например, взаимосвязь селена и мышьяка [23, 24], мышьяка и йода [24]. Несомненно, мышьяк взаимодействует и с другими элементами, и такое взаимодействие может как усиливать биохимическое воздействие мышьяка на живой организм, так и снижать его. Поэтому, несомненно, следует проводить исследование воздействия элементов, в том числе и мышьяка, на живой организм как отдельно, так и в естественном окружении других элементов. Это относится и к минеральным природным водам, имеющим в своём составе повышенное количество биогенных и эссенциальных микроэлементов, и мышьяк как токовым элементом следует относить.

Масс-спектрометрические исследования минеральных природных вод, а это воды рек, озёр, родников, артезианских скважин и колодцев Саратовской области, показали, что основной диапазон концентраций мышьяка располагается в интервале 0,001–10 мкг/л. И лишь в единичных случаях привозных вод концентрация мышьяка значительно превышала ПДК, установленную в России для мышьяка, как для водных объектов хозяйственно-питьевого значения, так и рыбохозяйственных нормативов. Стоит напомнить, что в России на сегодня для природных вод приняты два значения ПДК по мышьяку. Одно из них – 50 мкг/л установлено для

водных объектов хозяйственно-питьевого водоснабжения [25], другое – 10 мкг/л – для вод рыбохозяйственного назначения [26]. Характерно, что в этом же диапазоне находится нормальная концентрация мышьяка в моче человека [5, 15], а также предельная концентрация этого элемента в молоке животных [27], что лишний раз подчеркивает, ПДК в питьевой воде для мышьяка выбран и установлен правильно.

В США тоже до сих пор действует для питьевой воды значение ПДК для мышьяка – 50 мкг/л. Но экологические структуры США требуют ужесточить требования для питьевой воды и снизить это значение до 10 мкг/л. И такое снижение не может пройти безболезненно, т. к. потребует дополнительных, довольно значительных, ассигнований на более тщательную очистку воды от излишнего мышьяка. В США строго контролируют выход на рынок минеральных вод. Пример тому – совсем недавний случай с минеральной водой «Джермук» из Армении, которая была предложена для продажи в Америку и другие страны, но реализацию которой в США остановили, т. к. она содержала свыше 600 мкг/л мышьяка. Ситуация с этой водой отражена в Интернете. В России такой строгости с питьевыми водами нет, хотя установленные ПДК для ряда элементов более жёсткие, чем в США. Со всей очевидностью возникает необходимость более тщательной и всесторонней проверки такого типа минеральных вод, особенно биологических исследований.

Поиск литературных источников по минеральным водам показал, что вода из Армении может содержать мышьяка 500–1500 мкг/л, что для питьевых вод, скорее всего, неприемлемо. Но, как лечебная вода, она, вероятно, может быть рекомендована после научных, клинических и биохимических испытаний. Всё дело в том, вероятно, что рынок питьевых минеральных вод и рынок вод лечебных имеет разный уровень прибыли из-за пресловутых объёмов продаж. А масс-спектрометрический анализ показал, что в этой воде превышены ПДК ряда элементов, в том числе и довольно опасных – бериллия и таллия. Но в США для этих элементов действуют другие значения ПДК, отличные от российских, вероятно, поэтому шума по бериллию и таллию в американских СМИ не было. Поэтому имеются все основания для проведения обширных испытаний такого типа вод и выявления как плюсов, так и минусов употребления минеральных вод, у которых концентрация эссенциальных

и опасных для здоровья элементов превышает ПДК, принятые в России. Либо необходимо проводить коррекцию ПДК в сторону увеличения для разрешения продажи минеральной воды, имеющей превышения по ПДК. Но при этом целесообразно указывать полный анализ микроэлементов в минеральной воде, особенно опасных и эссенциальных. Или, в крайнем случае, тех микроэлементов, концентрации которых превышают ПДК. Наш потребитель должен получить право знать – какую воду он пьёт, какие элементы и в каком количестве в ней содержатся.

На сегодня, к сожалению, на этикетках минеральных вод имеются указания по концентрациям лишь для макроэлементов. «Раскрученные» в популярной прессе микроэлементы – серебро и йод указываются нередко тоже, но к истинным значениям концентраций все это порой не имеет никакого отношения. Это чаще всего лишь рекламный ход, призванный поднять покупательный спрос минеральной воды. Сплошь и рядом в отношении минеральных вод, имеющих в своем составе повышенные концентрации элементов, вообще не указывают эти элементы. А там, где таких элементов практически нет, прежде всего это серебро и йод, имеется явная рекламная информация, точнее, дезинформация о наличии таких элементов.

В ГосНИИЭНП были получены первичные результаты по масс-спектрометрическому определению микроэлементов в моче. Поскольку в нашем институте предстояло проведение экспериментов с соединениями мышьяка, необходимо было выяснить возможности масс-спектрометрического анализа. Двухлетний опыт проведения масс-спектрометрических исследований образцов мочи показал, что на сегодня это наиболее эффективный способ обнаружения не только макро-, но и микроэлементов, в том числе и мышьяка.

В первом периоде (в лаборатории не проводилось экспериментов с соединениями мышьяка) концентрация мышьяка в моче сотрудника определялась в диапазоне от 6 до 30 мкг/л, что согласовывалось с литературными данными [5, 15], показывающими норму содержания этого элемента в моче. Во втором периоде непосредственной работы с мышьяком концентрация мышьяка в моче возросла и находилась в интервале 70–370 мкг/л, что указывало на начало поступления в организм повышенных доз мышьяка и появление начальной степени интоксикации

мышьяком. Средняя концентрация мышьяка в этот период испытаний у сотрудника была 228 мкг/л.

Эти данные согласуются с работой [15], подтверждающей критический (пороговый) уровень отравления мышьяком, равным 200 мкг/л. Тем не менее концентрация мышьяка в моче не доходила до 500 мкг/л, которую считают начальной фазой отравления человеческого организма мышьяком [17]. Стоит напомнить, что потребление морепродуктов может довести концентрацию мышьяка в моче до 1000 мкг/л [28]. Поэтому оснований говорить о патологическом или необратимом воздействии на организм подобных концентраций мышьяка, действующих кратковременно, нет. Впрочем, нет данных и по длительному воздействию сравнимых концентраций, особенно при совместном действии мышьяка и других эссенциальных элементов.

В третьем периоде, когда сотрудник не имел непосредственного контакта с соединениями мышьяка, но находился в лаборатории, где проводились эксперименты с мышьяком, концентрация мышьяка в моче снизилась до 140–150 мкг/л. Однако снижения до нормального уровня не произошло. Скорее всего, в загрязненном мышьяком помещении может иметь место поступление мышьяка в организм при вдыхании воздуха. Можно говорить о пассивном способе заражения мышьяком, сродни «пассивному курению».

Обобщая большой массив знаний о биохимическом действии мышьяка, можно заключить, что на сегодня нет оснований менять или корректировать ПДК по мышьяку в воде.

Масс-спектрометрический анализ показал в моче также повышенные концентрации свинца и ртути, но поступление этих элементов, вероятнее всего, имеет бытовой характер, не связанный с профессиональной деятельностью, поскольку исследовательских контактов со свинцом и ртутью в анализируемый период времени не наблюдалось.

Нет сомнения, что на сегодня масс-спектрометрический метод обнаружения микроэлементов в человеческом организме является эффективным и простым, но пока редким и дорогостоящим способом определения минерального статуса как человеческого, так и любого другого организма и позволяет проследить практически весь спектр элементов. А это очень важно, т. к. даёт возможность определять и анализировать совместное действие попадающих в организм «экстремальных» химических элементов.

Известно взаимное влияние мышьяка и селена. В биологических системах это элементы-антагонисты, но масс-спектрометрическое сравнение концентраций мышьяка и селена в моче не выявило заметных явлений симбатности или антибатности при анализе. Концентрация селена в моче варьировала асинхронно в диапазоне от 1 до 86 мкг/л и определялась, скорее всего, неравномерностью поступления этого элемента в организм с пищей и водой. В данном случае следует отметить поступление селена с водой, т. к. в рационе на данном этапе исследований использовалась родниковая вода с повышенной концентрацией селена 30–60 мкг/л, концентрация мышьяка в воде была обычной 1–3 мкг/л.

Интересным является замечание [27] о защитном механизме молочных желёз, препятствующих доступу в молоко повышенных концентраций мышьяка. По данным авторов, в молоке может находиться ограниченное количество мышьяка с диапазоном концентраций 10–50 мкг/л. Природа в результате эволюции позаботилась, чтобы опасные концентрации химических элементов не попали в неокрепший организм новорожденного. Можно заметить, что именно эти цифры в России и ряде стран приняты как предельно допустимые концентрации мышьяка в воде рыбохозяйственного назначения и водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования [25, 26]. Очевидно, в результате эволюции выработались защитные механизмы биохимической защиты не только в отношении мышьяка. Все химические элементы должны проходить некий биохимический концентрационный фильтр, чтобы попасть в молоко, которое должно быть безопасным при вскармливании. Возможно, этот естественный отбор химических элементов, выработанный многовековой эволюцией, можно использовать для уточнения и коррекции предельно допустимых концентраций уже утверждённых элементов. А также для тех химических элементов, у которых ПДК ещё не определены. Таких элементов еще достаточно много.

Имеются основания предполагать, что и обычная почва, через которую проходит вода, корректирует минеральный состав воды, и оптимизирует концентрацию эссенциальных элементов и минимизирует концентрацию опасных для биохимических процессов, проходящих в живых организмах. И это требует глубоких и обоснованных исследований.

В течение семи лет были проведены масс-спектрометрические исследования атмосферы, почвы и воды. В единичных случаях были выявлены загрязнения мышьяком, они не были опасными и катастрофичными. Но опыт анализа микроэлементов, в том числе и мышьяка, позволяет сделать следующие выводы.

Выводы

1. Современные научные и практические знания о роли мышьяка в жизнедеятельности человека показывают, что его можно отнести к условно эссенциальным элементам.

2. Дуализм свойств мышьяка в системе «польза–вред» приводит к выводу, что за природными минеральными водами с концентрацией мышьяка в них до 50 мкг/л следует сохранить статус питьевых. Минеральные источники с более высокими концентрациями мышьяка следует изучать, зная предварительно весь спектр микроэлементов в воде, не забывая наличие синергетического эффекта, способного усиливать как отрицательные, так и положительные свойства мышьяка, и лишь затем предлагать на рынок.

3. Следует признать полезным и необходимым указывать на этикетках продающихся минеральных вод не только концентрацию макроэлементов, но также и микроэлементов, воздействие которых на организм даже в микрограммовых количествах не проходит бесследно.

4. Современные знания о биогенных элементах, находящихся в природных водах, таковы, что позволяют целенаправленно поставлять минеральные воды, богатые эссенциальными элементами, в регионы с недостатком этих элементов. Вместе с этим имеется возможность предупреждать население в ограниченности применения таких эссенциальных элементов в тех регионах, где они и так в местных продуктах питания и воде находятся в избытке.

5. Масс-спектрометрический метод определения элементов является на сегодня наиболее точным и удобным методом совместного определения всего спектра микроэлементов в природной воде, его следует признать основным при аттестации минеральных природных вод.

Литература

1. Горная энциклопедия. М.: Сов. энцикл., 1987. Т. 1-5.

2. Магакян И.Г. Рудные месторождения. М.: Госгеолтехиздат, 1955. 355 с.

3. Мышьяк и окружающая среда // Экспресс информация ВИНТИ. Сер. Цветная металлургия. М.: 1974. № 45. С. 29–40.

4. Добровольский В.В. География микроэлементов: Глобальное рассеяние. М.: Мысль, 1983. 272 с.

5. Копылов Н.И., Каминский Ю.Д. Мышьяк. Новосибирск: Сиб. унив. изд-во., 2004. 367 с.

6. Виноградов А.П. Введение в геохимию океана. М.: Наука, 1967. 140 с.

7. Woolson E.A. Arsenical pesticides /Ed. by E.A.Woolson. Wash.(D.C.): Amer. Chem. Soc., 1975. P. 97.

8. Гамаюрова В.С. Мышьяк в экологии и биологии. М.: Наука, 1993. 208 с.

9. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 237 с.

10. Мышьяк: Гигиенические критерии состояния окружающей среды. Женева: ВОЗ, 1985. Т. 18. 185 с.

11. Войнар А.И. Биологическая роль микроэлементов в организме животных и человека. М.: Высш. шк., 1960. 543 с.

12. Underwood E.I. Trace elements in human and animal nutrition. N.Y.: Acad. Press, 1956. 372 p.

13. Заева Г.Н. Мышьяк. М.: Центр международных проектов ГКНТ, 1983. 51 с.

14. Buck H.B. Toxicity heavy metals in the environment / Ed. by F. W. Ochme. N.Y.: Basel: Dekker, 1978. 357 p.

15. Ревич Б.А. Гигиеническая оценка содержания некоторых химических элементов в биосубстратах человека // Гигиена и санитария. 1986. № 7. С. 59.

16. Машковский М.Д. Лекарственные средства. М.: Медицина, 1978. Т. 2. С. 87.

17. Мелентьева Г.А. Фармацевтическая химия. М.: Медицина, 1976. Т. 1. С. 68.

18. Справочник лекарственных препаратов, рекомендованных для применения в СССР, выпускаемых отечественной промышленностью и закупаемых по импорту / Под ред. М.А. Ключева, А.Т. Сафонова. М.: Медицина, 1970. 183 с.

19. Джонс К. Ветеринарная фармакология и терапия. М.: Колос, 1972. Т. 2. 692 с.

20. Чупис В.Н., Растегаев О.Ю., Курсков С.Н. и др. Исследование микроэлементного состава водных объектов методом масс-спектрометрии индуктивно связанной плазмы // Экологические проблемы промышленных городов. Саратов. 2003. С. 198–200.

21. Курсков С.Н., Растегаев О.Ю., Чупис В.Н. Изучение элементного состава природных вод методом масс-спектрометрии индуктивно-связанной плазмы // Экологические проблемы промышленных городов. Саратов. 2007. С. 144–147.

22. Горбунов А.В., Ляпунов С.М., Окина О.И. Оценка поступления микроэлементов организм человека

с продуктами питания в центральных регионах России // Экологическая химия. 2006. Т. 15. Вып.1. С. 47–59.

23. Frost D. World Rev. Pest. Control. 1970. V. 9. № 1. P. 6–28.

24. Schroeder H.A., Baiassa H. // J. Chron. Diseases. 1966. V. 19. № 1. P. 85.

25. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ воды водных объектов, хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования ГН 2.1.5.1315-03, утверждена главным санитарным врачом Российской Федерации 27.03.2003. 66 с.

26. Перечень рыбохозяйственных нормативов: предельно-допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. М. Из-во ВНИРО, 1999. 304 с.

27. Peoples S.A. Arsenical pesticides / Ed. by E.A. Woolson . Wash. (D.S.): Amer. Chem. Soc., 1975. P. 1–12.

28. Мышьяк: Гигиенические критерии состояния окружающей среды. Женева: ВОЗ, 1985. Т. 18. 185 с.

Адаптация почвенных цианобактерий и водорослей к воздействию свинца в лабораторных условиях

© 2010. А. Д. Темралеева, аспирант, Д. Л. Пинский, д.б.н., зам. директора, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, e-mail: temraleeva_anna@mail.ru

Исследованы адаптации почвенных цианобактерий и водорослей к воздействию свинца в модельном эксперименте. Показан стимулирующий эффект ацетата свинца (300 мг/кг) на альго-цианобактериальное сообщество. Сделан вывод, что сохранность альго-цианобактериального сообщества при загрязнении почвы достигается с помощью комплекса одновременно действующих и взаимодополняющих друг друга адаптационных механизмов на организменном и ценотическом уровнях организации.

During the experiment adaptation of soil cyanobacteria and algae to the influence of lead was investigated. Stimulating effect of 300 mg/litre of lead on cyanobacterial community is shown. Thus, in conditions of soil contamination, algae-cyanobacteria community is preserved due to the complex of operating at the same time and mutually complementary adaptation mechanisms on organismal and on coenotic levels of organization.

Ключевые слова: цианобактерии, водоросли, адаптация, тяжёлые металлы, серая лесная почва

Key words: cyanobacteria, algae, adaptation, heavy metals, grey forest soil

Экотоксикологические исследования обеспечивают природоохранную практику знаниями, необходимыми для оценки актуальной и потенциальной опасности загрязнения и контроля за состоянием среды. Очевидно, что без глубокого и детального изучения поведения загрязняющих веществ в почве и ответных реакций живых организмов на токсическую нагрузку невозможно обосновать систему критериев оценки состояния почв и соответственно контроля. Одной из перспективных групп почвенных организмов-индикаторов являются водоросли и цианобактерии. Они составляют неотъемлемую часть почвенной биоты, имеют многочисленные трофические и топические связи, участвуют в почвообразовательном процессе, обладают специфической чувствительностью к различным видам антропогенного воздействия и быстрой ответной реакцией на изменение экологической ситуации. Однако широкому внедрению биоиндикационных систем на основе альго-цианобактериальных сообществ (АЦС) препятствует недостаточная изученность некоторых аспектов токсического воздействия тяжёлых металлов на почвенные цианобактерии и водоросли. В частности, мало изучен вопрос о механизмах и степени адаптации цианобактерий и водорослей к тяжёлым металлам, хотя высокие адаптивные способности АЦС снижают их индикационные возможности, что приводит к искажению ре-

зультатов биомониторинга. Под адаптацией в данном случае понимается любое структурное или функциональное изменение организма, популяции, сообщества, повышающее шанс на выживание конкретной популяции и всего вида в целом [1].

Целью данной работы является исследование адаптаций почвенных цианобактерий и водорослей к воздействию свинца в модельном эксперименте.

Объекты и методы

Влияние свинца на цианобактерии и водоросли серой лесной почвы ($pH_{\text{водн.}} 4,95$) изучали в условиях лабораторного эксперимента. Отбор почвы проводили на стационарной пробной площадке во вторичном мелколиственно-широколиственном разнотравном лесу общепринятыми почвенно-альгологическими методами [2, 3]. Собранные образцы почвы высушивали до воздушно-сухого состояния, измельчали, просеивали через сито с диаметром отверстий 2 мм и тщательно перемешивали для устранения гетерогенности пробы. Изучение действия свинца на характеристики АЦС проводили в водно-почвенной культуре (почва:вода в соотношении 1:3). Такое соотношение было выбрано на основе предварительного эксперимента как наиболее удобное для химико-биологического

анализа всех компонентов системы. Для этого в стерильные бюксы вносили по 7 г почвы и по 21 мл стерильной дистиллированной воды. Свинец в форме ацетата вносили однократно в концентрациях: 300, 750, 1500 мг/кг почвы в пересчёте на катион. Эти концентрации соответствовали среднему, высокому и очень высокому уровню загрязнения для почв со слабокислой и кислой реакцией [4]. Контроль оставался чистым (без внесения соли). Фоновое содержание свинца в образцах составляло $14,2 \pm 2,97$ мг/кг почвы. После внесения токсиканта образцы перемешивали в течение 1 часа. Повторность опытов трёхкратная. Далее водно-почвенные культуры инкубировали при температуре 23–25°C и круглосуточном освещении 2500 лк. Спустя 2 месяца производили отделение образовавшегося на поверхности воды АЦС путем его осаждения на мембранном фильтре при вакуумном фильтровании жидкой фазы системы.

Изучали следующие показатели, отражающие реакцию организмов на разных уровнях биологической организации: содержание общего хлорофилла и морфологические изменения – организменный уровень; общее и таксономическое обилие, скорость формирования АЦС, количество видов и видовой состав водорослей и цианобактерий – ценотический уровень. Контроль пигментного комплекса цианобактерий и водорослей осуществляли по изменению содержания общего хлорофилла (сумма хлорофиллов *a*, *b*, *c*) спектрофотометрическим методом. Хлорофилл извлекали ацетоновой экстракцией (ГОСТ 17.1.4.02 – 90) и анализировали на спектрофотометре Hitachi-557 (Япония) при длинах волн 630, 647, 664 и 750 нм.

Для видовой идентификации цианобактерий и водорослей брали несколько соскобов с поверхности АЦС и фиксировали в 4% формалине. При микроскопировании использовали микроскопы MC-200 TV (Австрия) и Axioscope Carl Zeiss с люминесцентной приставкой (Германия) (увеличение $\times 640$, $\times 1600$) и отечественные и зарубежные определители [5 – 11]. Общее и таксономическое обилие водорослей оценивали по частоте встречаемости видов, используя шестибалльную шкалу [12]: 1 – единично (менее 10 индивидов в препарате), 2 – редко (10 индивидов в препарате), 3 – нередко (1–10 индивидов в ряду препарата), 4 – часто (11–25 индивидов в ряду препарата), 5 – очень часто (25–50 индивидов в ряду препарата), 6 – в массе (более 50 индивидов в ряду препарата). Кроме того, в опыте с максималь-

ным внесением свинца проводили посев грибного мицелия с включением спор водорослей и цианобактерий на твердую питательную среду BG-11 с азотом (рН 7,0) с целью определения видовой принадлежности последних.

Содержание свинца в почве определяли с помощью рентген-флуоресцентного спектрометра «Спектроскан МАКС GV» (Россия). Статистический анализ полученного материала проводили с применением программного пакета Statistica 6.1. Были рассчитаны средние значения величин и стандартные отклонения.

Результаты и обсуждение

Адаптация к влиянию свинца на уровне организма связана с совокупностью морфологических, физиологических и биохимических реакций, направленных на предупреждение проникновения металла в клетку, а также на эндогенную детоксикацию загрязнителя. В первом случае сорбционным барьером служат слизистые чехлы и капсулы водорослей, состоящие из сложных полисахаридов, в состав которых входят полярные ОН-, СООН-, SO_3H -группы, способные связывать ионы металлов [13 – 16]. В нашем исследовании АЦС, выращенные на среде с добавлением дозы свинца 1500 мг/кг, визуально отличались от контрольного и остальных опытов появлением более обильной слизи и увеличением размеров слизистых чехлов (рис. 1, см. цветную вкладку). Очевидно, эти морфологические изменения направлены на предотвращение поступления токсиканта в клетку. Такой превентивный механизм описан в ряде работ [17, 18].

Кроме того, при концентрации свинца 1500 мг/кг было отмечено изменение окраски клеток водорослей и цианобактерий до бледно-зелёного или желтоватого цвета (рис. 1, см. цветную вкладку), что, очевидно, свидетельствует об ингибировании биосинтеза хлорофилла. Подобные хлоротические явления, вероятно, вызваны угнетением активности ферментов и усилением перекисного окисления липидов [19, 20]. Данные о содержании общего хлорофилла подтверждают это предположение: концентрация общего хлорофилла цианобактерий и водорослей значительно уменьшилась ($p < 0,05$) при внесении свинца в дозах 750 и 1500 мг/кг почвы по сравнению с контролем и дозой свинца 300 мг/кг (табл.). Минимальная концентрация хлорофилла АЦС, подвергавшегося воздействию максимальной

Влияние свинца на интенсивность «цветения» почвы

Опыт	Время, недели	Количество видов	Обилие, баллы	Содержание общего хлорофилла, мкг/л
Контроль	2	9(Cyan ₆ Chloro ₃)	32(Cyan ₁₉ Chloro ₁₃)	2,25±0,32
300 Pb(Ac) ₂	4	9(Cyan ₃ Chloro ₄)	26(Cyan ₁₆ Chloro ₁₀)	7,97±2,80
750 Pb(Ac) ₂	5	8(Cyan ₄ Chloro ₃ Xant ₁)	24(Cyan ₁₀ Chloro ₁₁ Xant ₃)	0,61±0,35
1500 Pb(Ac) ₂	6	6(Cyan ₄ Chloro ₂)	18(Cyan ₁₄ Chloro ₄)	1,21±0,71

дозы свинца, объясняется преобладанием старых, отмирающих и мёртвых клеток цианобактерий и водорослей, что было отмечено при световом и люминесцентном микроскопировании (рис.1, см. цветную вкладку).

С другой стороны, содержание общего хлорофилла в опыте с минимальной токсической нагрузкой значимо ($p < 0,05$) превысило соответствующий показатель в контроле. Подобный стимулирующий эффект ацетата свинца при внесении дозы 300 мг/кг может вызываться несколькими причинами (рис. 2, см. цветную вкладку). Во-первых, предполагается, что в присутствии тяжёлого металла происходит увеличение синтеза органических хелаторов, направленное на обеспечение меньшей доступности и, следовательно, токсичности загрязнителя, что наблюдалось для многих видов цианобактерий в исследованиях [21, 22]. С другой стороны, гиперпродукция органики может стимулировать массовое развитие бактерий-спутников водорослей. Кроме того, сам ацетат является легкодоступным источником энергии для бактерий, что стимулирует их рост, а интенсивное бактериальное выделение углекислого газа увеличивает фотосинтетическую активность цианобактерий и водорослей [23]. Вместе с тем многие виды водорослей способны к фотогетеротрофному типу питания, и присутствие дополнительного органического источника углерода снижает токсический эффект тяжёлого металла, как показано в работе [24] по изучению влияния ртути на некоторые виды зелёных водорослей в присутствии глюкозы и глутамата. Предполагаемые механизмы влияния ацетат-аниона на АЦС серой лесной почвы отражены на схеме (рис. 2, см. цветную вкладку).

Адаптация к токсическому воздействию свинца на ценобитическом уровне отражается в изменении характеристик сообщества (возраст, темпы роста, видовой состав и др.). Внешним проявлением адаптации АЦС является появление или заметное ускорение роста и размножения после замедления роста культуры под действием тяжёлого металла

[25]. Так, при добавлении максимальной концентрации свинца на второй неделе эксперимента на поверхности водной среды появились прозрачные студенистые пленки. При их микроскопировании было обнаружено, что пленка представляет собой грибной мицелий с многочисленными покоящимися клетками цианобактерий и водорослей. Аналогичный пример наблюдался при внесении свинца 8 ммоль/л с обнаружением полностью бесцветного мицелия [26]. С целью видовой идентификации обнаруженных водорослей и цианобактерий на пятой неделе эксперимента образцы грибного мицелия были посеяны на чашки Петри с твердой питательной средой BG-11 с азотом (pH 7,0). В результате были определены следующие виды водорослей: *Chlamydomonas reinhardtii* P.A. Dangeard, *Chlorella vulgaris* Beijerinck и *Spongiochloris minor* Chantanachat & Bold, а также цианобактерия *Nostoc muscorum* C. Agardh ex Bornet & Flahault. Морфологических изменений особей обнаружено не было: клетки имели естественные размеры, окраску и форму.

Торможение жизненной активности может рассматриваться в данном случае как наиболее общая и стратегически прогрессивная ответная реакция организма на любое стрессовое воздействие [27], так как покоящиеся клетки способны переживать такие неблагоприятные условия, при которых обычные вегетативные клетки погибают, и, следовательно, выполнять функцию сохранения жизни в токсичной среде. Кроме того, гибель спор на порядок меньше смертности вегетативных клеток [28]. В целом для сообщества уменьшение количества водорослей – процесс обратимый и гибель определенной части особей – вполне нормальное явление, так как пул спор водорослей служит гарантией сохранения сообщества в условиях токсического воздействия свинца. При уменьшении влияния стресс-фактора, которое в нашем случае обеспечивалось сорбцией свинца почвой, экзометаболитами, слизями и мёртвыми клетками водорослей, покоящие-

ся клетки перешли к вегетации и размножению, восстановив численность сообщества, что проявилось в вытеснении грибного мицелия цианобактериями и водорослями. Время отставания «цветения» водорослей в опытах от контроля зависело от уровня токсической нагрузки: массовое и визуально заметное «цветение» наблюдалось на две, три и четыре недели позже при внесении свинца в концентрациях 300, 750 и 1500 мг/кг соответственно по сравнению с контролем (табл.).

Кроме того, адаптация к неблагоприятным условиям окружающей среды на ценотическом уровне может проявляться в образовании АЦС, структурная и функциональная организация которого способна противостоять стрессовым ситуациям и экстремальным воздействиям. Так, анализ видового состава и структуры АЦС в контроле и опытах выявил уменьшение количества видов и обилия водорослей, изменения в соотношении разных таксонов водорослей при увеличении концентрации токсиканта (табл.). Наблюдалось увеличение доли зелёных водорослей и уменьшение доли цианобактерий в опытах с внесением 300 и 750 мг/кг по сравнению с максимальной концентрацией свинца, что соответствует данным многих авторов об устойчивости одноклеточных зелёных водорослей к воздействию тяжёлых металлов [18, 29, 30]. Однако максимальная токсическая нагрузка угнетала жизнедеятельность этой группы, нарушала биохимические и физиологические процессы и приводила к исчезновению из состава сообщества. У каждого вида даже в пределах одного таксона существуют индивидуальные пределы токсикорезистентности. Так, в нашей работе устойчивыми к дозам свинца 300 и 750 мг/кг оказались виды зелёных водорослей *Chlamydomonas cf. reinhardtii* и *Chlorella vulgaris*, а цианобактерии *Nostoc muscorum*, *Cylindrospermum minutissimum* Collins, *Aphanothece saxicola* Negeli и зелёная водоросль *Bracteacoccus minor* (Chod) Petrova присутствовали при всех уровнях загрязнения и доминировали в АЦС. Чувствительная цианобактерия *Chroococcus minutus* (Kutzing) Negeli и зелёная водоросль *Characium sp.* встречались только в контроле и даже при минимальной токсической нагрузке исчезали из состава сообщества. Цианобактерия *Nostoc punctiforme* (Kutzing) Hariot присутствовала в составе сообщества при низкой концентрации свинца, однако при увеличении концентрации металла носток обнаружен не был. Виды цианобактерий *Anabaena cylindrica* Lemmermann

и *Plectonema gracillimum* Zopf ex Hansgirg, а также водоросли *Tetracystis excentrica* R.M. Brown & Bold и *Vaucheria sp.*, относящиеся к отделам Chlorophyta и Xanthophyta соответственно, не проявили чёткой реакции на загрязнение.

Заключение

Показано, что адаптация АЦС к воздействию свинца достигалась за счёт увеличения размеров слизистых чехлов, которые служат сорбционными барьерами для тяжёлых металлов, торможения жизненной активности и перехода водорослей и цианобактерий в состояние покоя в стрессовых условиях. Адаптационная стратегия к токсической нагрузке на уровне сообщества основывалась на структурно-видовых изменениях АЦС: при увеличении концентрации свинца в составе сообщества сохранялись только устойчивые виды цианобактерий *Nostoc muscorum*, *Cylindrospermum minutissimum*, *Aphanothece saxicola*, а также зелёная водоросль *Bracteacoccus minor*. В целом сохранность сообщества при загрязнении почв свинцом достигалась с помощью комплекса одновременно действующих и взаимодополняющих друг друга адаптационных механизмов на разных уровнях биологической организации.

Кроме того, важным вопросом является выбор формы химического соединения металла. При внесении свинца в почву в форме легкорастворимой соли, такой, как $Pb(CH_3COO)_2$, металл является наиболее мобильным и равномерно распределяется в почве, что позволяет более точно оценить его токсическое действие. Однако в экотоксикологических экспериментах следует также учитывать сопутствующий анион, способный оказывать собственное влияние на АЦС и свойства почвы. В нашей работе установлено, что ацетат-анион стимулирует развитие АЦС и при внесении низкой дозы ацетата свинца нивелирует токсический эффект катиона.

Литература

1. Николаев Ю.А. Внеклеточные факторы адаптации бактерий к неблагоприятным условиям среды // Прикладная биохимия и микробиология. 2004. Т. 40. № 4. С. 387–397.
2. Кузяхметов Г.Г., Дубовик И.В. Методы изучения почвенных водорослей: Учебное пособие. Уфа: Изд-во Башкирск. ун-та, 2001. 60 с.

3. Хазиев Ф.Х., Кабиров Р.Р. Количественные методы почвенно-альгологических исследований. Уфа: Изд-во БФАН СССР, 1986. 172 с.
4. Королев В.А. Очистка грунтов от загрязнений. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. 365 с.
5. Андреева В.М. Почвенные и аэрофильные зелёные водоросли (*Chlorophyta: Tetrasporales, Chlorococcales, Chlorosarcinales*). СПб.: Наука, 1998. 351 с.
6. Васильева И.И. Эвгленовые и жёлто-зелёные водоросли Якутии. Л.: Наука, 1987. 366 с.
7. Голлербах М. М., Косинская Е. К., Полянский В. И. Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 2. Синие-зелёные водоросли. М.: Советская наука, 1953. 651 с.
8. Дедусенко-Щеголева Н.Т., Голлербах М.М. Определитель пресноводных водорослей СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1962. Вып. 5. Жёлто-зелёные водоросли. 273 с.
9. Царенко П.М. Краткий определитель хлорококковых водорослей Украинской ССР. Киев: Наукова думка, 1990. 208 с.
10. Komarek J., Anagnostidis K. *Cyanoprokaryota* – 1. Teil: *Chroococcales* // *Sußwasserflora von Mitteleuropa*, Band 19/1 / Eds. H. Ettl, J. Gerloff, H. Heynig, D. Moltenhauer Gustav Fischer Verlag. 1998. 548 p.
11. Komarek J., Fott V. *Chlorophyceae* (Grünalgen). Ordnung *Chlorococcales* // *Das Phytoplankton des Süßwassers. Systematik und Biologie. Teil 7, Hälfte 1*. Stuttgart: Schweizerbart, 1983. 1044 S.
12. Гецен М.В., Стенина А.С., Патова Е.Н. Альгофлора Большеземельской тундры в условиях антропогенного воздействия. Екатеринбург: Наука, 1994. 148 с.
13. De Philippis R., Vincenzini M. Exocellular polysaccharides from cyanobacteria and their possible application // *FEMS Microbiology Reviews*. 1998. V. 22. № 3. P. 151–175.
14. Шнюкова Е.И. Аккумуляция ионов металлов экзополисахаридами *Nostoc linckia* (Roth) Born. et Flach. (*Cyanophyta*) // *Альгология*. 2005. Т. 15. № 2. С. 172–180.
15. Шнюкова Е.И. Экзопалисахариды *Nostoc Vauch.* ex Born. et Flah. (*Cyanophyta*) и их сорбирующая функция // *Актуальные проблемы современной альгологии: Тез. докл. III Междунар. конф. Харьков*. 2005. С. 186–187.
16. Bender J., Rodriguez-Eatot S., Ekanemesang U.M., Phillips P. Characterization of metal-binding biofloculants produced by the cyanobacterial component of mixed microbial mats // *Applied and Environmental Microbiology*. 1994. V. 60. № 7. P. 2311–2315.
17. Кабиров Р.Р. Альгоиндикация с использованием почвенных водорослей (методические аспекты) // *Альгология*. 1993. Т. 3. № 3. С. 73–83.
18. Кузяхметов Г.Г. Альгологическая оценка токсичности препаратов меди в серой лесной почве и чернозёме выщелоченном // *Почвоведение*. 1998. № 8. С. 968–973.
19. Ochiai E.I. Toxicity of heavy metals and biological defense: principles and application in bioinorganic chemistry // *Journal of Chemical Education*. 1995. V. 72. № 6. P. 479–484.
20. Stons S.J., Badchi D. Oxidative mechanisms in the toxicity of metal ions // *Free Radical Biology & Medicine*. 1995. V. 18. № 2. P. 321–336.
21. Bender J., Lee R.F., Phillips P. Uptake and transformation of metals and metalloids by microbial mats and their use in bioremediation // *Journal of Industrial Microbiology*. 1995. № 14. P. 113–118.
22. Москвина М.И., Бреховских А.А., Бекасова О.Д., Никандров В.В. Роль слизистой оболочки цианобактерии *Nostoc muscorum* в связывании и детоксикации ионов кадмия // *Автотрофные микроорганизмы: Тез. докл. Междунар. науч. конф. М. 2000*. С. 124–125.
23. Костяев В.Я. Синезелёные водоросли и эволюция эукариотных организмов. М.: Наука, 2001. 126 с.
24. Mochapatra P.K., Mochanty R.C., Sinha M. Effect of organic carbon sources of the toxicity of mercury to *Chlorococum infusorium* (Schranck) Meheng and *Ankistrodesmus falcatus* (Corda) Ralfs // *Acta Hydrobiologica*. 1995. V. 37. № 1. P. 21–28.
25. Гапочка Л.Д., Шавырина О.Б. Популяционные аспекты устойчивости микроводорослей к токсическим воздействиям // *Альгология*. 1999. Т. 9. № 2. С. 31.
26. Фокина А.И. Влияние свинца на структуру фототрофных микробных комплексов почвы: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Сыктывкар: ИБ Коми НЦ УрО РАН, 2008. 25 с.
27. Феофилова Е. П. Торможение жизненной активности как универсальный биохимический механизм адаптации микроорганизмов к стрессовым воздействиям (обзор) // *Прикладная биохимия и микробиология*. 2003. Т. 39. № 1. С. 5–24.
28. Ильичев В.Г., Авраменко Л.Г. Механизмы адаптации водорослей. Модели и приложение // *Журнал общей биологии*. 1994. Т. 55. № 3. С. 356–366.
28. 29. Евдокимова Г.А., Мозгова Н.П., Штина Э.А. Загрязнение почв фтором и оценка состояния микробного компонента в зоне действия алюминиевого завода // *Почвоведение*. 1997. № 7. С. 898–905.
30. Nalewaiko C., Olaveson M. M. Differential responses of growth, photosynthesis, respiration phosphate uptake to copper in copper-tolerant and copper-in-tolerant strains of *Scenedesmus aquatus* (*Chlorophyceae*) // *Canadian Journal of Botany*. 1995. V. 73. № 8. P. 1295–1303.

Авторы выражают благодарность к.б.н. Патовой Е.Н. и к.б.н. Новаковской И.В. за помощь в видовом определении цианобактерий и водорослей.

Исследования выполнены при поддержке проекта Министерства образования и науки РФ № 2.1.1/3819 и гранта РФФИ №09-04-00652.

Комплексная оценка состояния цианобактерии *Nostoc paludosum* Kütz. при воздействии различных поллютантов

© 2010. С. Ю. Огородникова¹, к.б.н., с.н.с, Ю. Н. Зыкова², аспирант,
Г. И. Березин³, аспирант, Л. И. Домрачева^{1,2}, д.б.н., профессор,
А. А. Калинин², к.б.н., доцент,
¹Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,
²Вятская государственная сельскохозяйственная академия,
³Вятский государственный гуманитарный университет,
e-mail: ecolab2@gmail.com

В качестве маркерных признаков при изучении состояния популяции цианобактерии *Nostoc paludosum* под воздействием различных поллютантов были выбраны следующие показатели: титр клеток, их жизнеспособность, перекисное окисление липидов и активность каталазы. Доказана тесная коррелятивная зависимость между интенсивностью перекисного окисления липидов и количеством мёртвых клеток, а также между активностью каталазы и количеством живых клеток в популяции *Nostoc paludosum*. Было показано, что наиболее надёжным критерием состояния популяции можно считать жизнеспособность клеток.

Investigating the state of the population of the cyanobacterium *Nostoc paludosum* under the influence of different pollutants the following features were chosen as markers: cell titer, their life energy, lipid peroxidation and catalase activity. It was proved that there is a close connection between the intensiveness of lipid peroxidation and the amount of dead cells, as well as between catalase activity and the number of cells alive in the population of *Nostoc paludosum*. It was stated that the most reliable criterion of the population state is the life energy of cells.

Ключевые слова: цианобактерии, жизнеспособность клеток, токсиканты, состояние популяции, перекисное окисление липидов, каталаза

Key words: cyanobacteria, life energy of cells, toxicants, the state of the population, lipid peroxidation, catalase

Разработка микробных тест-систем в условиях продолжающегося загрязнения окружающей среды имеет большое значение. Важно выявить такие показатели состояния микробных популяций, которые бы адекватно отражали степень токсического действия поллютантов. В этом плане большой интерес представляют широко распространённые в природе виды уникальных прокариотных фототрофов – цианобактерий (ЦБ). Многочисленными исследованиями доказано, что ЦБ потенциально обладают большими адаптационными, биоремедиационными, антагонистическими способностями [1 – 6]. При этом эффект воздействия во многом определяется плотностью клеток в популяции ЦБ [7].

Целью данной работы было изучение влияния различных поллютантов на такие показатели состояния популяции *Nostoc paludosum*, как плотность клеток, их жизнеспособность, перекисное окисление липидов и активность каталазы.

Объекты и методы

Объектом исследования была почвенная ЦБ *Nostoc paludosum* Kütz. № 18 из коллекции фототрофных микроорганизмов кафедры ботаники, физиологии растений и микробиологии им. Э.А. Штиной Вятской ГСХА. Данный штамм изолирован из дерново-подзолистой почвы на территории Кировской области. *Nostoc paludosum* является одним из наиболее распространённых видов азотфиксирующих ЦБ в почвах природных и антропогенных экосистем. Он может в массе размножаться на поверхности почвы, вызывая её «цветение», легко культивируется, обладает высокой скоростью роста. Для данного штамма доказана способность восстанавливать супрессивность химически и микологически загрязнённых почв [4, 7].

В качестве токсикантов выбраны соединения, являющиеся загрязнителями в городских и сельскохозяйственных экосистемах: тяжёлые металлы (ТМ) свинец и медь, хлорид натрия, бензин и гербицид трефлан,

в концентрациях, реально присутствующих в окружающей среде.

Свинец испытывали в виде ацетата, медь – в виде сульфата. Бензин 92-й марки компании «Лукойл» отобран на одной из заправок г. Кирова. Трефлан – селективный довсходовый гербицид длительного действия для уничтожения однолетних сорняков в посевах многолетних сельскохозяйственных культур. Действующее вещество: трифлуралин (2, 6 – динитро 4-трифторметил-N, N-дипропилин). Его выбор обусловлен широким использованием в сельском хозяйстве для борьбы с однодольными сорными растениями и длительной устойчивостью продуктов разложения в почве. Установлено, что при фотохимическом разложении трефлана образуются алкил- и диалкилбензимидазолы и азоксианилины и ряд других веществ. Производные бензимидазола достаточно стабильны и могут сохраняться в объектах окружающей среды достаточно длительное время.

Концентрации поллютантов для ТМ соответствовали 5 ПДК, для бензина и хлорида натрия – 5% от объёма культуральной среды, для трефлана была выбрана производственная доза – 0,2%.

Культуру *N. paludosum* в течение 8 недель выращивали в жидкой среде Громова № 6 без азота. За этот период развитие ЦБ достигает пика экспоненциальной фазы, и культура находится в наиболее активном состоянии. Затем в накопительную культуру ностока вносили испытуемые поллютанты и оставляли на 7 суток. По истечении указанного периода отбирали пробы на проведение необходимых анализов. Плотность популяции определяли по титру клеток с помощью камеры Горяева. Жизнеспособность клеток определяли по активности деhydroгеназы тетразолюно-топографическим методом [7]. Для этого гомогенизированную культуру ЦБ после отмывания водой выдерживали в 0,075% растворе трифенилтетразолий хлорида (ТТХ) 3 часа. После повторного отмывания водой готовили мазки и просчитывали под иммерсионным микроскопом количество живых (с красными кристаллами формазана) и мёртвых (без кристаллов) клеток (по 500 клеток на каждом из 9 мазков).

Интенсивность перекисного окисления липидов (ПОЛ) в культуре *N. paludosum* анализировали по цветной реакции тиобарбитуровой кислоты с малоновым диальдегидом (МДА), образующимся в процессе ПОЛ. За основу была взята методика определения ПОЛ в растительных тканях [8] в нашей модификации.

Для анализа отбирали 1 мл гомогенизированной культуры ЦБ, добавляли ТРИС-НСI буфер (рН 7,6) и 0,5% раствор тиобарбитуровой кислоты в 20% трихлоруксусной кислоте. Полученный раствор кипятили на водяной бане в течение 30 минут. Оптическую плотность фильтрата определяли на спектрофотометре Specol-1100 при длине волны 532 нм.

Активность каталазы определяли газометрическим методом [9] в нашей модификации, разработанной для ЦБ.

Результаты и обсуждение

Наблюдения показали, что изменения в состоянии популяций ЦБ при внесении токсикантов отмечаются уже на визуальном уровне. В контрольном варианте мощное развитие цианобактериальных плёнок с бурным выделением пузырьков газа отмечается по всему объёму колбы с максимумом развития на поверхности. Внесение ацетата свинца приводит к существенному осажению биоплёнок на дно. В колбах с внесением соли меди наблюдалось осажение культуры ЦБ на дно в виде голубоватых хлопьев. Внесение хлорида натрия приводит к интенсивному окрашиванию культуральной жидкости в ярко-малиновый цвет. Добавление трефлана и бензина также вызывают изменение окраски культуральной жидкости в желтовато-розовый цвет. Изменение окраски явно свидетельствует о разрушении клеток с выделением в окружающую среду фотосинтетических пигментов.

Определение титра клеток показало, что плотность популяций во всех вариантах достаточно велика и колеблется в незначительных пределах (табл. 1).

При анализе результатов видно, что только внесение сульфата свинца и трефлана ведёт к снижению численности клеток по сравнению с контролем примерно вдвое. Действие соли меди, хлорида натрия и бензина приводит к снижению плотности клеток на 28,5–36,5% (табл. 1).

При подсчёте численности клеток в камере Горяева было отмечено, что наиболее сильные морфологические нарушения зафиксированы в варианте с бензином, где практически не сохранились нити ЦБ, а культура была представлена в виде отдельных клеток. Укорачивание и фрагментация нитей наблюдались в вариантах с ацетатом свинца, хлоридом натрия и трефланом. В варианте с внесением соли меди структура нитей, форма клеток оставались практически на том же уровне, что в

Таблица 1

Влияние токсикантов на плотность популяции *Nostoc paludosum*

Вариант	Титр, клеток/мл·10 ⁷	Снижение титра, % к контролю
1. Контроль	3,40±0,27	
2. Ацетат свинца	1,79±0,12	52,6
3. Сульфат меди	2,16±0,21	63,5
4. Хлорид натрия	2,43±0,11	71,5
5. Трефлан	1,60±0,15	47,0
6. Бензин	2,30±0,21	67,6

Таблица 2

Изменение соотношения живых и мёртвых клеток в популяции *Nostoc paludosum* под влиянием токсикантов

Вариант	Количество клеток, %	
	живых	мёртвых
1. Контроль	99,06±0,32	0,94
2. Ацетат свинца	85,13±3,77	14,87
3. Сульфат меди	0	100
4. Хлорид натрия	21,7±0,48	78,29
5. Трефлан	8,77±0,85	91,23
6. Бензин	0	100

контроле и соответствовали диагностике вида. Однако окраска клеток с интенсивной синезелёной сменилась на бледно-малахитовую.

Определение жизнеспособности клеток по ТТХ показало существенное различие в соотношении живых и мёртвых клеток в популяции ностока в разных вариантах (табл. 2).

Как видно из табл. 2, жизнеспособность *Nostoc paludosum*, развивающегося в контрольном варианте (среда Громова), чрезвычайно велика: 99% клеток проявляют дегидрогеназную активность. Любые вносимые токсиканты снижают жизнеспособность клеток. В меньшей степени это проявляется при действии соли свинца, когда погибает около 15% клеток. Хлорид натрия приводит к гибели около 80% клеток. Более 90% клеток ностока гибнет под влиянием трефлана. Полная гибель популяции регистрируется при действии сульфата меди и бензина, хотя в этих вариантах сохраняются морфологические

структуры клеток (бензин) и нитей (медь), что позволяет определить их титр. Сопоставление результатов определения плотности клеток в культуре (камера Горяева) и их жизнеспособности (проба с ТТХ) заставляют внести коррективы в результаты, отражённые в таблице 1. Пересчёт титра клеток с учётом их жизнеспособности (табл. 3) показывает, что, во-первых, действие токсикантов намного сильнее, чем это проявляется при количественном учёте клеток, и, во-вторых, при определении токсичности различных соединений для *Nostoc paludosum* тест с определением титра клеток непригоден.

Определение жизнеспособности клеток (табл. 2) показывает, что степень токсичности испытуемых соединений имеет следующий вид: Cu=бензин>трефлан> NaCl> Pb.

Физиологическое состояние клеток и пост-мортальную активность ферментных систем можно определить, используя показатели

Таблица 3

Влияние различных токсикантов на содержание живых клеток в культуре *Nostoc paludosum*

Вариант	Численность живых клеток в 1 мл, ·10 ⁷	Снижение по отношению к контролю, %
1. Контроль	3,37	
2. Ацетат свинца	1,52	54,9
3. Сульфат меди	0	100
4. Хлорид натрия	0,53	84,3
5. Трефлан	0,14	95,8
6. Бензин	0	100

интенсивности процессов ПОЛ и активность каталазы.

Установлено, что внесение поллютантов в культуру *Nostoc paludosum* приводит к возрастанию интенсивности процессов перекисного окисления липидов (рис. 1). В большей степени отмечали увеличение уровня МДА в вариантах с солью меди и трефланом – в 5,9 и 3,6 раза соответственно. В вариантах с другими поллютантами накопление МДА было выше, чем в контроле, в 1,9 раза. Значительное накопление в культуре *Nostoc paludosum* МДА свидетельствует о том, что поллютанты инициируют процессы перекисного окисления липидов, вызывают повреждение клеточных мембран и нарушение функционирования кле-

ток. Данные по интенсивности процессов ПОЛ коррелируют ($r=0,61$) с результатами по оценке жизнеспособности клеток методами ТТХ. Так, в вариантах с сульфатом меди и трефланом установлено значительное накопление МДА и максимальное количество мёртвых клеток ЦБ. В варианте с бензином также все клетки ЦБ были нежизнеспособны, но уровень ПОЛ был ниже, чем в вариантах с солью меди, медью и трефланом. По-видимому, это связано с особенностями биотрансформации бензина, которая в основном идёт по пути окислительной деструкции с поглощением активного кислорода.

Изучение активности каталазы показало, что максимальная величина этого показателя

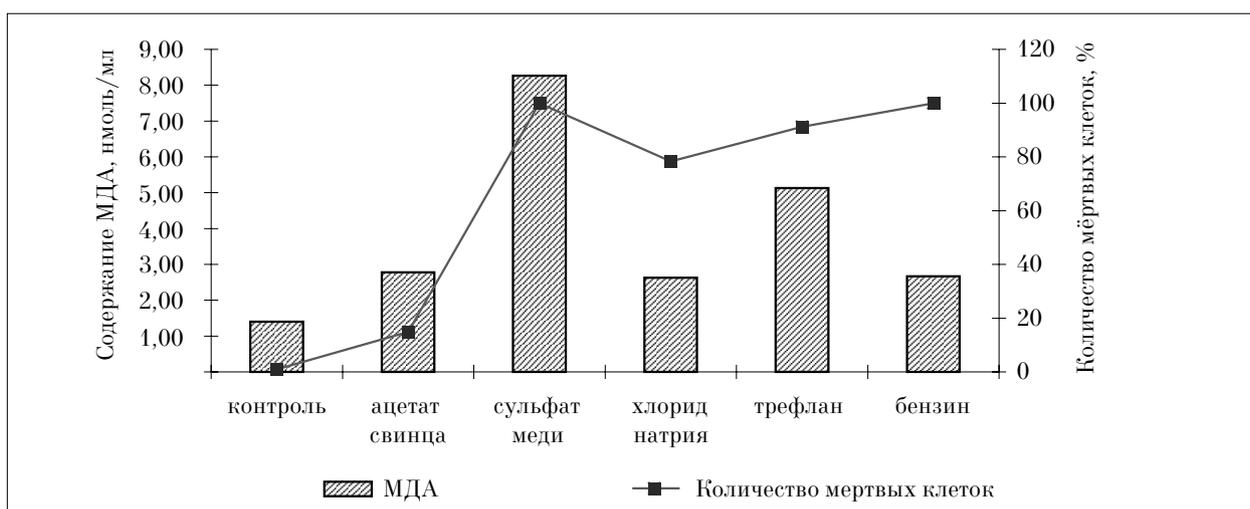


Рис. 1. Влияние токсикантов на интенсивность процессов ПОЛ и жизнеспособность клеток *Nostoc paludosum*

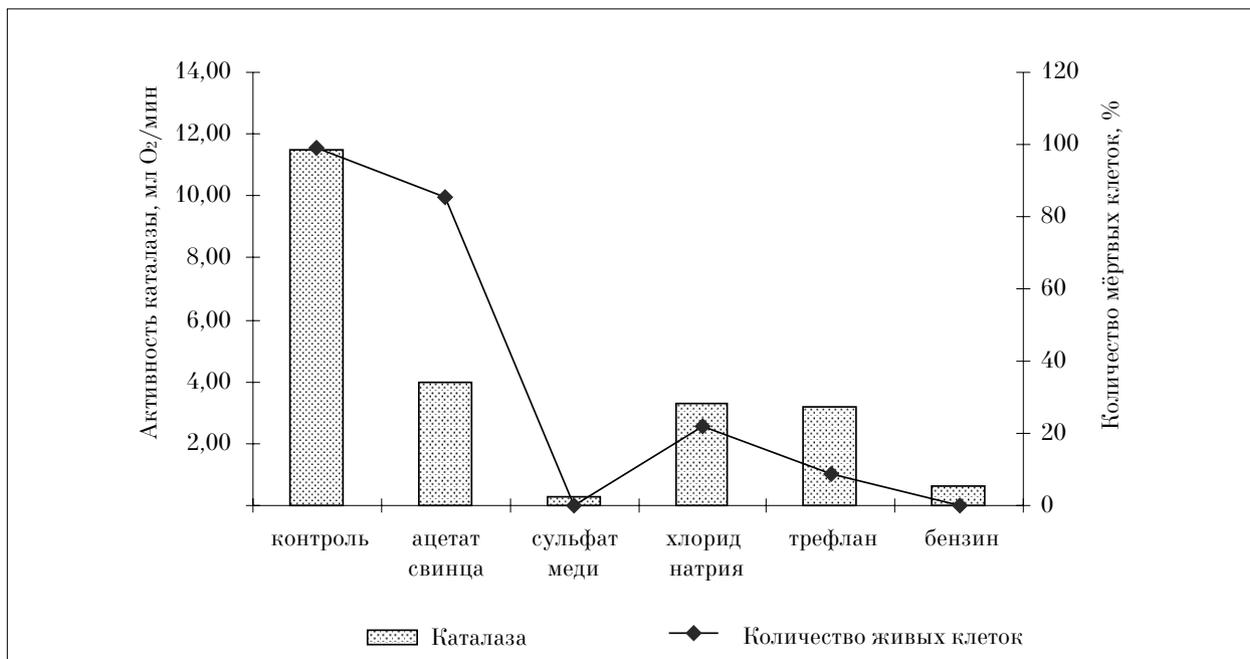


Рис. 2. Влияние токсикантов на активность каталазы и жизнеспособность клеток *Nostoc paludosum*

Таблица 4

Изменение каталазной активности культуры *Nostoc paludosum* под влиянием токсикантов

Вариант	Активность каталазы, мл O ₂ /мин
1. Контроль	11,5±1,32
2. Ацетат свинца	4,0±0,25
3. Сульфат меди	0,3±0,02
4. Хлорид натрия	3,3±0,43
5. Трефлан	3,2±0,37
6. Бензин	0,6±0,05

выявлена в контрольном варианте, а минимальные значения – в вариантах с внесением сульфата меди и бензина (рис. 2). Активность каталазы в культуре с внесением поллютантов имела тесную корреляцию с количеством живых клеток ($r=0,84$).

Таким образом, ряд токсичности соединений, выявленный по каталазе, имеет почти такой же вид, как и по жизнеспособности клеток: $Cu > \text{бензин} > \text{трефлан} = NaCl > Pb$.

Результаты определения каталазной активности показывают, что даже после полной гибели клеток (варианты с сульфатом меди и бензином) сохраняются и проявляют активность ферментные системы, вероятно, во внеклеточной среде.

Выводы

1. Доказана невозможность использования количественного учёта численности клеток *Nostoc paludosum* для определения степени токсичности различных поллютантов.

2. Показано, что при сохранении морфологической структуры клеток и нитей ЦБ при действии токсикантов может происходить их полная гибель.

3. Доказана тесная коррелятивная зависимость между интенсивностью ПОЛ и количеством мёртвых клеток, а также между активностью каталазы и количеством живых клеток в популяции *Nostoc paludosum*.

4. Можно использовать данные показатели (ПОЛ, каталазную активность и жизнеспособность клеток) в качестве биомаркеров стресса у *Nostoc paludosum* на поллютанты минеральной и органической природы.

5. Наиболее простым, доступным и экспрессным методом определения токсичности соединений для изучаемого штамма ЦБ является метод определения жизнеспособности клеток с помощью ТТХ.

Литература

1. Андреюк Е.И., Коптева Ж.П., Занина В.В. Цианобактерии. Киев: Наукова думка, 1990. 200 с.
2. Гапочка Л.Д. Популяционные аспекты устойчивости цианобактерий и микроводорослей к токсическому фактору: Автореф. дис. ... докт. биол. наук в форме научного доклада. М. 1999. 64 с.
3. Шадрина О.И. Цианобактериальные сообщества в практике рекультивации техногенных экосистем // 8-й съезд Гидробиол. о-ва РАН. Т. 3. Калининград. 2001. С. 89–90.
4. Домрачева Л.И. «Цветение» почвы и закономерности его развития. Сыктывкар. 2005. 330 с.
5. Сопрунова О.Б. Функционирование цианобактериальных сообществ в условиях техногенных экосистем // Вестн. МГУ. Сер. 16. 2006. № 2. С. 24–29.
6. Домрачева Л.И., Кондакова Л.В., Попов Л.Б., Зыкова Ю.Н. Биоремедиационные возможности почвенных цианобактерий (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2009. № 1. С. 8–17.
7. Домрачева Л.И., Кондакова Л.В., Ашихмина Т.Я., Огородникова С.Ю., Олькова А.С., Фокина А.И. Применение тетразольно-топографического метода определения дегидрогеназной активности цианобактерий в загрязнённых средах // Теоретическая и прикладная экология. 2008. № 2. С. 23–28.
8. Лукаткин А.С. Холодовое повреждение теплолюбивых растений и окислительный стресс. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2002. 208 с.
9. Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 1990. 189 с.

Трансформация микобиоты под влиянием сельскохозяйственного освоения почв в тундровой зоне

© 2010. Ф. М. Хабибуллина, д.б.н., с.н.с., А. Н. Панюков, к.б.н., н.с.,
Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,
e-mail: fluza@ib.komisc.ru

В данной статье приведены результаты исследований по влиянию сельскохозяйственного освоения тундровых почв на количественный состав микроорганизмов, на соотношение их физиологических групп, а также на видовой состав микромицетов. Установлено, что при сельскохозяйственном освоении тундровых территорий в соответствии с изменением типа экосистемы изменяется количественная и качественная характеристика микроорганизмов, теряется зональная специфика почвенной микобиоты.

The article presents the results of long-term research of the influence of tundra soils agricultural use on microorganisms' structure, ratio of different physiological groups of microorganisms and species structure of microbiocenosis. It is stated that in course of agricultural use of tundra soils quantitative and qualitative characteristics of microbiota transform in line with changing of ecosystem type; zonal specificity of soil microbiota is lost.

Ключевые слова: тундровые почвы, сеяный луг, комплекс микромицетов,
биомасса микроорганизмов

Key words: tundra soils, sieved meadow, micromycets,
microorganisms biomass

Результатом процесса сельскохозяйственного освоения земель является замена природных экосистем на культурные моноили маловидовые, что сопровождается преобразованием почвы и соответственно почвенного микробного сообщества. Исследуемым воркутинским лугам около 50 лет. Уничтожение целинной тундровой растительности, обработка почвы, посев многолетних трав мятлика лугового (*Poa pratensis* L.) и лисохвоста лугового (*Alopecurus pratensis* L.), влияние антропогенного режима, включающего в себя внесение удобрений и уборку трав, полностью преобразили верхние горизонты тундровой почвы. Вместо целинной торфянисто-поверхностно-слабоглеевой суглинистой образовалась тундровая задернованная окультуренная поверхностно-глеевая почва, хотя минеральные горизонты глубже 30 см, характерные для целинной тундровой почвы, в профиле почвы луговой экосистемы остаются морфологически и по свойствам практически без изменений. Состав травостоя в последние 38–40 лет отличается относительным постоянством – около 40 видов высших растений с доминированием высеянных мятлика и лисохвоста [1]. Для выявления изменений в сообществах почвенных микроскопических грибов, трансформации их видового разнообразия и количественных показателей

были проведены исследования микобиоты сеяных лугов тундровой зоны.

Образцы почв для микробиологического анализа отбирали с соблюдением стерильности из верхних горизонтов двух почв – подстилки (A0A1) целинной торфянисто-поверхностно-слабоглеевой суглинистой почвы ивняково-ерниковой тундры и дернового горизонта Адер. многолетнего сеяного луга. Органогенный горизонт целинной почвы характеризовался довольно низкой кислотностью почвенного раствора (рН_{вод.} 5,8), максимальным, по отношению к расположенным ниже почвенным горизонтам, содержанием элементов-биогенов (содержание органического углерода – 13,7%, гидролизующего азота – 12,3 мг на 100 г в.с.п.). В дерновом горизонте сеяного луга отмечено уменьшение кислотности почвенного раствора (рН_{вод.} 6,22), увеличение содержания углерода – 18,9% и гидролизующего азота – 20,2 мг на 100 г в.с.п.).

Для анализов использовали смешанные образцы из 10 индивидуальных с каждого участка. Количество микроорганизмов разных физиологических групп определяли методом разведения почвенной суспензии с последующим высевом её на агаризованные питательные среды [2]. Численность аммонификаторов в образцах учитывали на мясо-

пептонном агаре (МПА), микроорганизмов, усваивающих минеральные формы азота, – на крахмал-аммиачном агаре (КАА), грибов-сахаролитиков – на среде Чапека, целлюлозолитиков – на среде Гетчинсона (с целлюлозой на поверхности среды), олигокарбофилов – на среде Виноградского, олигонитрофилов – на среде Эшби. Идентификацию микроскопических грибов проводили по определителям для различных таксономических групп [3–7]. Комплексы микромицетов почв характеризовали с использованием показателей (в %) относительного обилия и частоты встречаемости видов [8, 9]. На основании частоты встречаемости выделяли типичные виды с высокой частотой встречаемости – доминанты (Д), частые (Ч) и редкие (Р), а также виды, встречаемость которых ниже 25%, – случайные (С).

Общее количество микроорганизмов определяли с помощью метода люминесцентной микроскопии [10, 11].

Известно, что почвы тундры и почвы средней и северной тайги характеризуются сходным распределением микроорганизмов по почвенному профилю [11]. Подавляющее количество их сосредоточено в самой верхней части профиля – органогенном горизонте. При переходе к минеральной части количество микроорганизмов резко падает и продолжает уменьшаться с глубиной. «Прижатость» биологически активного слоя к самой поверхности почвы характерна для целинных почв Севера, сохраняется эта особенность и в освоенных почвах тундры [12].

Из аккумулятивного слоя целинной почвы было выделено 27 видов микромицетов (табл. 1), включая представителей *Mycelia sterilia*.

Аскомицеты представлены только одним видом *Chaetomium globosum*, отмеченным единичными находками. Зигомицеты насчитывают 7 видов из родов *Mucor* и *Mortierella*, которые являются типичными для тундровых экосистем [13].

Наибольшее количество среди выделенных видов приходится на несовершенные грибы с доминирующим положением рода *Penicillium* (9 видов), среди которых преобладают виды секции *Asymmetrica*, что характерно для комплексов почвенных микромицетов тундровых почв [14–17]. Наиболее часто отмечались *Penicillium camemberti*, *P. kapuscinskii*, *P. simplicissimum*, *P. lanosum*. Род *Aspergillus* представлен видом *A. versicolor*. Высоким обилием характеризовались *Geomyces pannorum* и белая пушистая форма стерильного мице-

лия, которые входят по частоте встречаемости в разряд часто встречающихся (табл. 2). Другие светлоокрашенные микромицеты немногочисленны.

Темноцветные микромицеты представлены всего 3 видами из 3 родов – *Cladosporium herbarum*, *Humicola fusco-atra* и *Aureobasidium pullulans*. *Cladosporium herbarum* входит в разряд доминирующих, а остальные виды немногочисленны по обилию и частоте встречаемости.

Комплекс типичных видов микромицетов включает 3 доминирующих, 7 частых и 13 редких видов. Среди доминирующих и частых видов представлены как типичные для тундры *Geomyces pannorum* и *P. lanosum*, так и виды космополиты (табл. 2).

Почва сеяного луга по сравнению с целинной характеризуется более богатой в видовом отношении микобиотой (табл. 1). Выделены и идентифицированы в луговом сообществе 32 вида микромицетов, принадлежащих к 12 родам из отделов *Zygomycota*, *Ascomycota* и формального класса *Anamorphic fungi*. Наибольшее видовое разнообразие обнаружено среди анаморфных грибов (восемь родов) и зигомицетов (два рода).

Из анаморфных грибов, как и в целинной тундровой почве, наиболее представительным является род *Penicillium* (пять видов). При довольно большом разнообразии обилие *Penicillium*, однако, невелико, несколько значительнее обилие видов рода *Trichoderma*, которые нехарактерны для природных тундровых биогеоценозов. Наибольшим обилием (11,2%) среди несовершенных грибов характеризуется условный патоген *Fusarium oxysporum*, характерный для окультуренных почв, который также не был обнаружен в целинной почве.

Зигомицеты представлены восемью видами из родов *Mucor* и *Mortierella*, широко распространёнными в целинных и сельскохозяйственного использования почвах в разных географических зонах. Обилие видов родов *Mucor* и *Mortierella* существенно выше, чем анаморфных грибов. *Mucor globosum*, *Mortierella verticillata*, *M. schmuckeri* были выделены только из окультуренной почвы, тогда как *Mortierella isabellina*, наоборот, был характерен только для целинной.

Наибольшее обилие отмечено у сумчатых грибов, представленных видами рода *Chaetomium* – *Ch. globosum*, *Ch. spirale*, *Ch. spiralliformum*, которые наряду с актиномицетами являются основными целлюлозолитиками в данной почве.

Видовой и количественный состав микромицетов в почвах сеяного луга и ивняково-ерниковой тундры

Виды микромицетов	Ивняково-ерниковая тундра, А0А1		Многолетний сеяный луг, АдерА1	
	Количество микромицетов тыс. КОЕ/г в.с.п.	Обилие видов, %	Количество микромицетов тыс. КОЕ/г в.с.п.,	Обилие видов, %
Отдел Zygomycota				
<i>Mucor globosum</i> A. Fisher	–	–	10	3,8
<i>M. hiemalis</i> Wehmer	10	2,6	10	4
<i>M. plumbeus</i> Bon.	10	2,6	10	3,8
<i>M. racemosus</i> Fres	8	2,2	3	1,2
<i>Mortierella alpina</i> Peyron	40	10,4	10	3,8
<i>Mortierella isabellina</i> Oudem.	1	0,26	–	–
<i>M. ramanniana</i> (Moller) Linnem. (= <i>Umbelopsis ramanniana</i>)	10	2,6	10	4
<i>M. verticillata</i> Linnem.	–	–	40	16
<i>M. vinacea</i> Dixon (= <i>Umbelopsis vinacea</i>)	3	0,78	1	0,4
<i>M. schmuckeri</i> Linnem.	–	–	1	0,4
Отдел Ascomycota				
<i>Chaetomium globosum</i> Kunze.	1	0,26	30	11,4
<i>Ch. spirale</i> Zopf	–	–	20	8
<i>Ch. spiralliform</i> Bain.	–	–	25	9,5
Anamorphic fungi				
<i>Aspergillus fumigatus</i> Fres.	–	–	2	0,8
<i>A. versicolor</i> (Vuill.) Tirab.	30	7,8	1	0,4
<i>Geomyces</i> (= <i>Chrysosporium</i>) <i>pannorum</i> Huges	100	26	10	3,8
<i>Penicillium camemberti</i> Thom	1	0,26	1	0,4
<i>P. canescens</i> Sopp	1	0,26	1	0,4
<i>P. cyclopium</i> Westling	–	–	1	0,4
<i>P. lanosum</i> Westl.	40	10,4	1	0,4
<i>P. kapuscinskii</i> Zaleski; Raper a. Thom	17	4,4	–	–
<i>P. simplicissimum</i> (Oudem.) Thom	1	0,26	–	–
<i>P. frequentans</i> Westling	1	0,26	1	0,4
<i>P. herquei</i> Bain. Et Sart.	3	0,8	–	–
<i>P. implicatum</i> Biourge	1	0,26	–	–
<i>P. roqueforti</i> Thom	1	0,26	–	–
<i>P. verrucosum</i> var. <i>cyclopium</i> Abe	2	0,6	–	–
<i>Trichoderma album</i> Preuss	–	–	7	2,7
<i>T. viride</i> Persoon ex Fries	–	–	6	2,3
<i>T. koningii</i> Oudemans	–	–	6	2,3
<i>Paecilomyces variotii</i> Bain.	–	–	0,4	0,1
<i>Humicola fusco-atra</i> Traaen	1	0,26	–	–
<i>Aureobasidium pullulans</i> (de Bary) Arand	1	0,26	4	0,4
<i>Cladosporium cladosporioides</i> (Fres.) de Vries	1	0,26	1	0,4
<i>Cladosporium herbarum</i> (Pers.) Lk.	–	–	1	0,4
<i>Phoma</i> sp.	2	0,5	6	2,3
<i>Fusarium oxysporum</i>	–	–	31	11,2
<i>Mycelia sterilia</i>				
Неидентифицированный род (<i>Moniliac.</i>)	100	26	10	4
Неидентифицированный род 1 и 2 (<i>Dematiac.</i>)	2	0,5	1	0,4

В целом микобиота сеяного луга 50-летнего возраста характеризуется значительным видовым разнообразием, в которой обильно представлены зигомицеты и аскомицеты.

Использование для характеристики структуры комплекса грибов исследуемых экосистем такого общеэкологического показателя, как частота встречаемости вида, позволило установить, что комплекс типичных видов микромицетов сеяного луга включает в органогенном слое три доминирующих, три частых и восемь редких видов. К доминирующим и частым видам комплекса относятся, с одной стороны, типичные тундровые микромицеты *Penicillium lanosum*, *Mycelia sterilia*, а с другой – *Fusarium oxysporum*, «южный» представитель в почвах агроценозов (табл. 2).

Сопоставление видового состава почвенных грибов целинной тундры и сеяных лугов выявило невысокое сходство по Жаккару: 40% – для доминирующих, 12,5 и 22% для частых и редких соответственно.

Для характеристики соотношения основных физиологических групп микроорганизмов органогенного слоя в самый пик вегетационного периода (25 июля) нами проведён микробиологический анализ образцов органогенных горизонтов почв ивняково-ерниковой тундры и многолетнего сеяного луга (табл. 3).

Все показатели, кроме численности сахаролитиков, были значительно выше в пробах почвы многолетнего сеяного луга. Преобладание в обеих почвах микроорганизмов, использующих органический азот, связано, вероятно, с насыщенностью этих горизонтов слабо разлагающимися моховыми остатками в целинной почве и накоплением отмершей травы в луговом сообществе. Меньшее количество бактерий, растущих на среде с минеральным азотом, может быть связано с торможением процессов минерализации, особенно в переувлажнённых почвах. Резкое отличие имело место в численности целлюлозолитиков на среде Гетчинсона и условных аэробных

Таблица 2

Структура комплекса типичных видов микромицетов почвы многолетнего сеяного луга и целинной тундры (по частоте встречаемости)

Доминирующие	Частые
Многолетний сеяный луг	
<i>Cladosporium herbarum</i>	<i>Geomyces pannorum</i>
<i>Mycelia sterilia</i> (светлоокрашенный)	<i>Mortierella verticillata</i>
<i>Penicillium lanosum</i>	<i>Mycelia sterilia</i> (тёмноокрашенный)
<i>Fusarium oxysporum</i>	
Целинная тундра	
<i>Geomyces pannorum</i>	<i>Mortierella alpina</i>
<i>Mycelia sterilia</i> (светлоокрашенный)	<i>Mortierella isabellina</i>
<i>Cladosporium herbarum</i>	<i>Penicillium camemberti</i>
	<i>P. kapuscinskii</i>
	<i>P. simplicissimum</i>
	<i>P. lanosum</i>
	<i>Mycelia sterilia</i> (тёмноокрашенный)

Таблица 3

Характеристика почвенной микробиоты сеяного луга и ивняково-ерниковой тундры

Горизонт, глубина, см	Количество микроорганизмов, вырастающих на средах, тыс. КОЕ/г в.с.п.					
	МПА	КАА	Виноградского	Эшби	Гетчинсона	Чапека
Целинная тундра						
А0А1 0-4(6)	502±56	150±18	890±58	34±5	62±5	391±32
Многолетний сеяный луг						
Адер.А1 0-3(6)	2400±130	444±51	352±28	472±37	160±17	252±19

Таблица 4

Количественная характеристика почвенной микробиоты природной и луговой экосистем

Глубина взятия образца, см	Мицелий актиномицетов, м/г	Бактерии, млрд. клеток/г	Мицелий грибов, м/г	Споры грибов, млн. спор/г
Целинная тундровая почва				
0-10	128,2–256,4	0,45–3,78	76,8–128,1	0,2–0,6
Сеяные луга (нижняя часть склона)				
0-10	245,3	26,11	2459,7	150

Таблица 5

Биомасса почвенной микробиоты сеяного луга и ивняково-ерниковой тундры, мг/г (%)

Глубина, см	Актиномицеты	Бактерии	Грибы		Итого
			Мицелий	Споры	
Ивняково-ерниковая тундра					
0-10	0,005–0,01 (1,57–1,6)	0,01–0,076 (3,15–12,6)	0,3–0,5 (83,3–94,6)	0,002–0,006 (0,6–1)	0,317–0,592 (100)
Многолетний сеяный луг					
0-10	0,63 (5,14)	0,52 (4,24)	9,6 (78,4)	1,5 (12,25)	12,25 (100)

азотфиксаторов с олигонитрофилами на среде Эшби. Олигонитрофилы относятся к так называемой «микротрефе» [18] и способны довольствоваться ничтожным содержанием в среде азота [17].

Общее количество микроорганизмов в органогенных горизонтах исследуемых почв определяли с помощью метода люминесцентной микроскопии. Как и предполагалось, количество микроорганизмов резко отличается от значений, полученных посевным методом, по-видимому, в связи с присутствием в местообитаниях значительной доли некультивируемых вообще или не растущих на используемых средах микроорганизмов. Например, количество бактерий, отмеченное в подстилке ивняково-ерниковой тундры, составило 450–3780 млн./г в.с.п., что гораздо выше данных, полученных методом посева на твердые питательные среды.

По данным прямого счёта, количество актиномицетов, бактерий, грибов луговой почвы по сравнению с их содержанием в целинной почве, было на несколько порядков больше (табл. 4).

Было установлено, что как в природных, так и в луговых тундровых почвах преобладает грибная биомасса (табл. 5). Биомасса спор грибов в целинной почве незначительна, а в почве сеяного луга этот показатель больше на два-три порядка (более 12%). Процентное соотношение бактерий и актиномицетов в общей биомассе микроорганизмов в луговой почве было значительно выше показателя в целинной тундровой почве. Общая биомасса микроорганизмов в условиях луговой

экосистемы больше, чем в целинной тундре в 20–40 раз.

Это свидетельствует о высокой биологической активности почвы сеяного луга, а значительное количество микроорганизмов – благоприятных для них условиях в луговой почве.

Проведённый микробиологический анализ органогенного (продуктивного) слоя почвы показывает, что в составе микробиоты, как и в растительном сообществе, при значительном видовом разнообразии обильны лишь некоторые группы видов, играющих главную роль в биологических процессах. Луговая экосистема характеризуется более богатым родовым и видовым составом микромицетов (рис. 1).

Различаются в исследуемых экосистемах и основные деструкторы органики – в условиях агроценоза основными целлюлозоразрушителями являются виды *Chaetomium*, тогда как в целинной тундре – актиномицеты и микромицет *Geomyces pannorum* (табл. 6).

Таким образом, под влиянием сельскохозяйственного освоения в тундровых почвах происходят изменения количественного и качественного состава микроорганизмов, структуры их биомассы, зональных комплексов микромицетов и формирование специфической микробиоты. Микробиота многолетних сеяных лугов в условиях Крайнего Севера характеризуется преобладанием представителей родов *Trichoderma*, *Chaetomium*, большим видовым разнообразием зигомицетов, уменьшением в количественном и видовом отношении пенициллов, появлением нехарактерных для тундры видов родов *Aspergillus*, *Fusarium*. Сре-

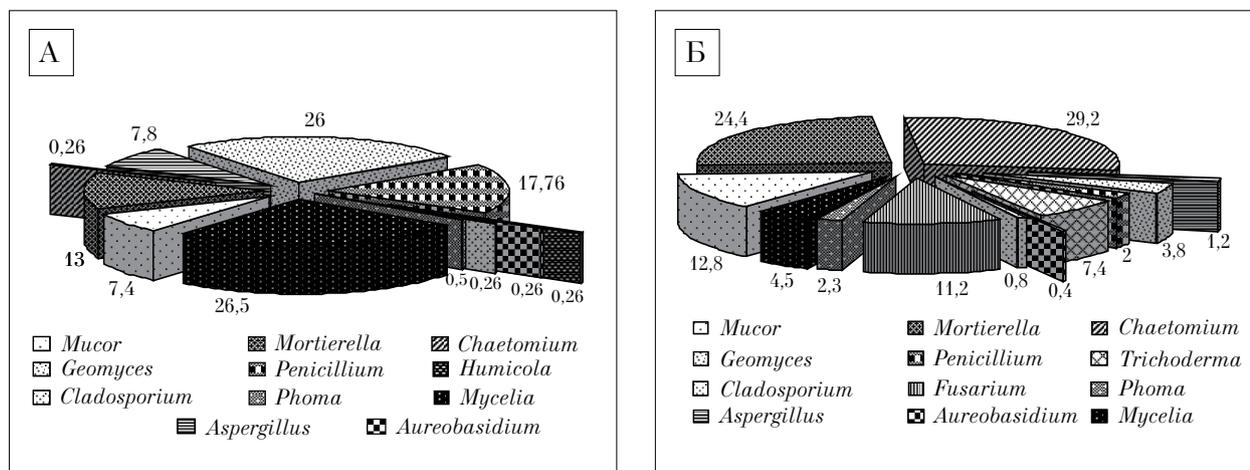


Рисунок. Распределение микромицетов по родам и их обилие, %:
 А – ивняково-ерничиковая тундра, Б – многолетний сеяный луг

Таблица 6

Сравнительная характеристика комплексов микробиоты целинной и освоенной тундры (сеяный луг)

Показатель	Экосистема	
	Сеяный луг	Целинная тундра
Разнообразие микромицетов: родов видов	12	11
	32	27
Основные целлюлозолитики	<i>Chaetomium globosum, Ch. spirale, Ch. spiralliformum</i>	<i>Geomyces pannorum, актиномицеты</i>
Биомасса, мг/г в.с.п. грибов бактерий	11,1	0,5
	1,12	0,08
Соотношение биомассы мицелий грибов:споры грибов: бактерии	78,4:12,3:9,3	90:1:9
Сходство состава грибов по Жаккару, % для доминирующих частых редких видов	40	
	12,5	
	22	

ди доминирующих и частых видов выявлены как типичные для тундровых почв *Penicillium lanosum*, так и формы, представленные стерильным мицелием, и *Fusarium oxysporum*, характерные для почв под сельскохозяйственными культурами.

При сельскохозяйственном освоении тундровых территорий в соответствии с изменением типа экосистемы (изменяются растительность и почва) теряется зональная специфика почвенной микробиоты. Изменяются состав и обилие, в заметных количествах отмечаются более «южные» виды. Антропогенное влияние проявляется не только на уровне растительности, о чём широко известно, но и на уровне микробного пула, т. е. затрагивает все основные компоненты экосистемы.

Литература

1. Экологические принципы природопользования и природовосстановления на Севере. Сыктывкар. 2009. 176 с.
2. Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. 303 с.
3. Егорова Л. Н. Почвенные грибы Дальнего Востока. Л.: Наука, 1986. 207 с.
4. Ainsworth and Bisby's Dictionary of the fungi. 8th ed. / Eds. D. L. Hawksworth et al. CABI Bioscience. 1995. 540 p.
5. Domsh K. H., Gams W., Anderson T.-H. Compendium of soil fungi. IHW-Verlag Eching. 2007. 672 p.
6. Ellis M. B. Dematiaceous Hyphomycetes. Kew. 1971. 608 p.
7. Ramirez C. Manual and atlas of the Penicillia. Amsterdam-N.-Y.-Oxford: Elsevier Biomedical Press, 1982. 874 p.

8. Мирчинк Т.Г., Озерская С.М., Марфенина О.Е. Способы выявления типичных для определенных условий комплексов микроскопических грибов на основе характеристики их структуры // Биологические науки. 1982. Вып. 20. С. 198–226.
9. Мирчинк Т.Г. Почвенная микология. М.: Изд-во МГУ, 1988. 220 с.
10. Князева И.Н., Полянская Л.М., Кожевин П.А., Звягинцев Д.Г. Учет почвенных микроорганизмов с помощью микроскопии при низкой численности объектов // Вестник МГУ. Сер. Почвоведение. 1985. Т. 2. С. 62–70.
11. Паринкина О.М. Микрофлора тундровых почв: Эколого-географические особенности и продуктивность. Л.: Наука, 1989. 159 с.
12. Стенина Т.А. Биологическая активность некоторых почв Коми АССР // Материалы по почвам Коми АССР. Сыктывкар. 1974. С. 35–42.
13. Егорова Л.Н. Почвенные грибы Дальнего Востока: Гифомицеты. Л.: Наука, 1986. 207 с.
14. Бабьева Е. Н., Сизова Т. П. Микромицеты в почвах арктоундровых экосистем // Почвоведение. 1983. № 10. С. 98–101.
15. Кирцидели И.Ю. Изменение комплексов микромицетов при смене условий в некоторых почвах района озера Левинсон-Лессинга (п-ов Таймыр) // Микология и фитопатология. 1999. Т. 33. Вып. 3.
16. Кирцидели И. Ю. Почвенные микромицеты полярных пустынь острова Эллеф-Рингнес (Канадский арктический архипелаг) // Микология и фитопатология. 2007. Т. 41. Вып. 3. С. 217–225.
17. Гришкан И.Б. Микобиота и биологическая активность почв верховий Колымы. Владивосток: Дальнаука, 1997. 136 с.
18. Заварзин Г.А. Заповедники для микробов // Природа. 1990. № 2. С. 39–45.

Создание сорбента и фильтров на его основе для поглощения радионуклидов цезия-137 из питьевой воды

© 2010. В. Ф. Олонцев¹, д.т.н., профессор, Е. А. Сазонова², к.х.н., нач. отдела, Е. А. Фарберова², к.х.н., доцент, В. В. Олонцев³, к.м.н., доцент,

¹Научный центр порошкового материаловедения ГОУ ВПО ПГТУ,

²Пермский институт железнодорожного транспорта,

³Саратовский военно-медицинский институт,

e-mail: urgups@pochta.ru

При создании высокоэффективного, селективного к ионам цезия сорбента для очистки воды в качестве основы выбраны активные угли, а в качестве активного компонента – ферроцианид меди. Разработана технология получения нового сорбента, обладающего сорбционными свойствами по отношению к радионуклидам цезия. Новый сорбент прошел испытания на соответствие требованиям ГОСТ 2874-82 «Вода питьевая».

At creation of a highly effective absorbent that is selective to ions of cesium, for water cleaning on the basis of active carbons, with ferrocyanide copper as an active component. The technology of getting the new absorbent with adsorption properties in relation to cesium radionuclides is developed. The new absorbent has passed tests for conformity to requirements of GOST 2874-82 «Drinking Water».

Ключевые слова: активные угли, сорбция, радионуклиды, селективность

Key words: active carbons, absorption, radionuclide, selectivity

Необходимость очистки питьевой воды от ионов радиоактивного цезия-137 вызвана тем, что в ряде регионов, пострадавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС, в водоёмах, из которых поступает вода в водопроводную сеть, зафиксировано повышенное содержание ионов цезия-137.

Описана большая группа [1] природных сорбентов (вермикулит, различные глины, природные цеолиты и др.), способных сорбировать ионы цезия из воды. В работе [2] изучены процессы сорбции радионуклидов цезия-137 из природных вод на карбонатсодержащих минералах-доломитах и мергелистых породах, прошедших механохимическую и термохимическую обработку.

Однако эти сорбенты обладают целым рядом недостатков: небольшой ёмкостью катионного обмена, низкой эффективностью, замедленной скоростью обмена.

Использование активных углей для очистки воды от изотопов цезия-137 позволяет обеспечить лишь 40–77%-ную степень очистки [1].

Использование ферроцианидов тяжёлых металлов для извлечения ионов радиоактивного цезия из воды известно давно [3]. Предложены были методы сорбции цезия осадками ферроцианидов тяжёлых металлов (Ni, Zn, Cd, Fe и др.) как в статических условиях, так и в

динамических. Методы извлечения основаны на избирательной способности ферроцианидов двух и трехвалентных металлов захватывать из растворов тяжёлые щелочные металлы. Из всех щелочных металлов цезий обладает максимальной склонностью к внедрению в ферроцианидную решетку и потому легко вытесняет часть тяжёлого металла из простого ферроцианида, а также ионы натрия или калия из смешанных солей. Ионообменный процесс иногда сопровождается и молекулярной сорбцией.

В.В. Вольхин и сотрудники Пермского государственного технического университета [4] доказали, что смешанные ферроцианиды меди обладают исключительной селективностью по отношению к ионам цезия, за счет ионного обмена одновалентного катиона, входящего в состав смешанного ферроцианида, на ион цезия. В работе [5] с помощью рентгеноструктурного анализа подтверждено, что наряду с ионным обменом наблюдается и молекулярная сорбция соли цезия на ферроцианиде меди за счёт дефектной структуры последнего.

Еще в 1957 г. И.В. Тананаев обращал внимание на то, что реакции обмена катионов внешней сферы ферроцианидов протекают без перехода ионов $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ в раствор.

Таким образом, смешанные ферроцианиды меди, малорастворимые в воде, могут

стать незаменимыми сорбентами для очистки питьевой воды ввиду их высокой селективности по отношению к ионам цезия и отсутствия побочных выделений в очищенную воду.

Известно, что осадки ферроцианидов могут пептизироваться, в результате чего при их использовании для очистки воды в фильтрующих устройствах может нарастать гидравлическое сопротивление [3]. Использование носителя позволит исключить этот недостаток и достичь большей механической прочности сорбента.

Питьевая вода, поступающая через систему водоснабжения, как правило, может содержать такие примеси, как фенол, различные соединения хлора, пестициды и т. п. и нуждается в дополнительной очистке.

Активные угли, которые в последнее время широко используются для решения этой задачи, могут служить не только высокоэффективными сорбентами, но и носителями специализированных сорбентов, сохраняя при этом высокую адсорбционную способность в процессе доочистки питьевой воды.

Принимая во внимание все вышеизложенное, для создания высокоэффективного, селективного к ионам цезия сорбента (ФЦУ), предназначенного для очистки воды в качестве основы-носителя, были выбраны активные угли, а в качестве активного компонента – смешанный ферроцианид меди – калия.

В качестве носителя было исследовано два типа активных углей – на каменноугольной основе (АГ-ОВ) и древесной (БАУ-МФ), разрешённых Минздравом России для очистки питьевой воды.

Основная задача в процессе разработки сорбента состояла в том, что применяемые технологические приемы должны были обеспечить получение стабильного сорбента, активный компонент которого (смешанный ферроцианид меди – калия) прочно удерживается на поверхности активного угля.

Разработанная технология – нанесение ферроцианида меди на активированный уголь – обеспечивает получение сорбента, обладаю-

щего высокими сорбционными свойствами по отношению к радионуклидам цезия и устойчивостью при длительном контакте с водой.

Анализ водных вытяжек, полученных при обработке сорбента ФЦУ, показал, что ионы Cu^{2+} , Fe^{2+} , $[Fe(CN)_6]^{4-}$ практически в них отсутствуют (табл. 1).

Эти результаты подтверждают, что разработанный сорбент при обработке его водой не выделяет в последнюю побочных продуктов.

Принимая во внимание, что в литературе имеются указания на то, что ферроцианиды начинают разлагаться в слабощелочных средах при $pH > 8,5$ [3], нами была изучена устойчивость разрабатываемого сорбента ФЦУ в воде при максимально допустимых в питьевой воде значениях pH .

Для этой цели через колонку с параметрами $d_k = 0,8$ см и $h_k = 35$ см, содержащую 12 мл сорбента ФЦУ, пропускали воду при значении pH 8,57; 9,0; 9,3 со скоростью 8 колоночных объемов в час.

В фильтрате определяли содержание железа атомно-абсорбционным методом на приборе ААС-30.

В результате проведенных исследований было показано, что сорбент ФЦУ устойчив в исследованном интервале pH в питьевой воде (табл. 2) [6]. Согласно ГОСТ 2874 - 82 pH питьевой воды допускается в интервале 6–9.

Сорбционные свойства сорбента ФЦУ по ионам радиоактивного цезия-137 изучали в условиях, близких к условиям эксплуатации сорбента в бытовых фильтрах.

Для создания заданной концентрации цезия-137 в водопроводной воде использовали раствор, меченный цезием-137. Для приготовления этого раствора использовали хлористый цезий, меченный цезием-137, без носителя в количестве 4 мл активностью 2,5 МКи с удельной активностью 63 МКи/мл в 1,9 н соляной кислоте. Этот препарат разбавляли водой, в которую добавляли в качестве носителя неактивный хлористый цезий из расчета 1 мг/дм³. Активность полученного раствора составляла $6,3 \cdot 10^{-7}$ Ки/дм³.

Таблица 1

Содержание ионов в водных вытяжках сорбента ФЦУ

№ п/п	Содержание Cu^{2+} , мг/дм ³	Содержание Fe^{2+} , мг/дм ³	Содержание $[Fe(CN)_6]^{4-}$, мг/дм ³
1	0,002	0,001	0,003
2	0,045	0	0
3	0,055	0	0
ГОСТ 2874-82	не более 1,0	не более 0,3	–

Таблица 2

Устойчивость сорбента ФЦУ при различных значениях рН воды

№ п/п	рН воды	Содержание железа, мг/дм ³
1	8,57	0,20
2	9,0	0,26
3	9,3	0,28
ГОСТ 2874-82	6 – 9	не более 0,3

Для определения содержания цезия-137 в воде использовали гамма-спектрометр на базе амплитудного анализатора марки АИ-1024-16 со сцинтилляционным колодецевым детектором венгерского производства марки NZ-138 со свинцовым домиком.

Испытания сорбентов проводили в стеклянных колонках с поперечным сечением 3 см².

Водопродонную воду, содержащую ионы цезия-137, из ёмкости подавали в колонки с помощью перестальтического насоса со скоростью 5 м/час.

Испытания сорбентов проводили в непрерывном потоке с периодическим определением содержания ионов цезия-137 в очищенной воде.

Длину слоя сорбента изменяли от 4 до 14 см. На рисунке представлена зависимость изменения коэффициента очистки воды от длины слоя сорбента при фиксированном ресурсе работы колонки (300 колоночных объемов). При длине слоя от 5 до 10 см наблюдается некоторая стабильность в процессе извлечения цезия-137 из воды (коэффициент очистки C_0/C_1 составляет 78–85). С увеличением длины слоя сорбента выше 10 см происходит дальнейшее увеличение величины C_0/C_1 .

При использовании сорбента ФЦУ в бытовых фильтрах для доочистки питьевой воды следует учитывать следующие условия:

1. Ресурс работы слоя сорбента ФЦУ, размещенного в фильтре, должен быть соизмерим с ресурсом работы фильтра в целом.

2. В процессе эксплуатации фильтра активность слоя сорбента ФЦУ, в результате накопления радиоизотопов цезия, не должна превышать допустимого уровня – $2 \cdot 10^{-6}$ Ки/кг.

В результате проведенных исследований было показано, что слой сорбента ФЦУ может обеспечивать очистку более 3000 колоночных объёмов воды, содержащих цезий-137, активностью $10^{-8} - 10^{-9}$ Ки/дм³.

При этом уровень накопленной активности в слое сорбента не превышает $10^{-8} - 10^{-9}$ Ки/кг, т. е. отработанный сорбент не является

радиоактивным отходом и не подлежит специальному захоронению.

Следует обратить внимание на то, что содержание активных компонентов, нанесённых на уголь АГ-ОВ, значительно меньше, чем на активном угле БАУ-МФ при идентичных условиях нанесения. По-видимому, это связано с различным характером пористой структуры активных углей и природы их поверхности.

Активный уголь АГ-ОВ обладает значительно меньшим суммарным объемом пор, в связи с чем возникают трудности при получении на его основе сорбента ФЦУ. Поэтому сорбент ФЦУ и технология его изготовления созданы на основе активного угля БАУ-МФ, обладающего к тому же лучшими адсорбционными свойствами по очистке воды.

Сорбент ФЦУ был испытан на соответствие требованиям ГОСТ 2874-82 «Вода питьевая», и была показана его высокая эффективность по органическим примесям и остаточному хлору в воде.

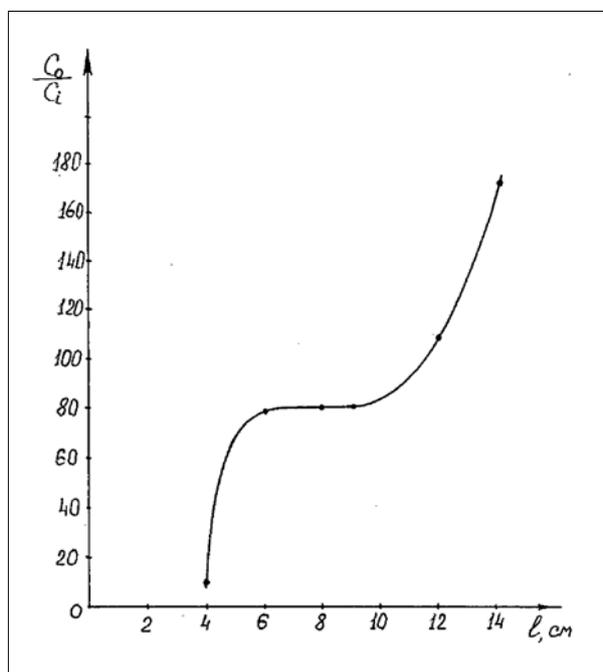


Рис. Зависимость коэффициента очистки воды от ионов цезия-137 от длины слоя сорбента $C_0 = 6,0 \cdot 10^{-7}$ Ки/дм³; $V = 5$ м/час

Таблица 3

Результаты испытаний сорбента ФЦУ по доочистке водопроводной (питьевой) воды

Проба воды	Окисляемость, мг/дм ³	Остаточный хлор, мг/дм ³	Галоген-содержащие, γ	Коли-индекс, число бактерий /дм ³
Водопроводная вода (контрольный опыт)	5,42	0,53	47	< 3
После сорбента ФЦУ	3,04	0,22	13	< 3

В таблице 3 приведены результаты испытания сорбента ФЦУ по доочистке питьевой воды с ресурсом работы более 3000 колоночных объёмов.

Сорбент ФЦУ обеспечивает снижение содержания в питьевой воде органических галогенсодержащих примесей, остаточного хлора более чем на 50% при практически уже отработанном ресурсе. Кроме того, в процессе его эксплуатации не наблюдается изменения в значении коли-индекса.

Получено разрешение Минздрава России на применение сорбента ФЦУ в практике водоподготовки.

С применением сорбента ФЦУ созданы эффективные бытовые и коллективные фильтры для доочистки питьевой воды от радионуклидов цезия с общим ресурсом работы 2500–3000 колоночных объёмов.

Бытовой фильтр «Сорбент» прошел испытания в областном Центре Госсанэпиднадзора г. Перми и разрешен к применению.

Литература

1. Кузнецов Ю.В., Щebetковский В.Н., Трусов А.Г. Основы очистки воды от радиоактивных загрязнений. М.: Атомиздат, 1974. 360 с.
2. Корнилович Б.Ю., Спасенова Л.Н., Косорук А.А., Пшинко Г.Н., Масько А.П. Очистка вод от цезия-137 и стронция с использованием природных и активированных карбонатсодержащих материалов // Химия и технология воды. 1992. Т. 14. № 1. С. 48–52.
3. Тананаев И.В., Сейфер Г.Б., Харитонов Ю.Я., Кузнецов В.Г., Корольков А.П. Химия ферроцианидов. М.: Наука, 1971. 320 с.
4. Шульга Е.А., Вольхин В.В., Зильберман М.В. Ионнообменные свойства смешанных ферроцианидов ряда переходных металлов // Неорганические материалы. 1971. Т. VII. № 1. С. 77–81.
5. Зильберман М.В., Вольхин В.В. Структура смешанного ферроцианида меди и соответствующих ему продуктов молекулярной сорбции // Журнал структурной химии. 1971. Т. XII. № 4. С. 649–562.
6. ГОСТ 2874-82. Гигиенические требования и контроль за качеством воды.

Операции рециклирования в технологии переработки арсенита натрия гидролизного

© 2010. А. Г. Демахин, д.х.н., гл.н.с., В. Н. Чупис, д.ф.-м.н., директор,
О. Ю. Растегаев, к.х.н., нач. отдела, Н. Н. Кузнецов, к.х.н., с.н.с.,
А. В. Кошелев, к.т.н., с.н.с.,

Государственный научно-исследовательский институт промышленной экологии,
e-mail: ecovector@sar-ecoinst.org

В статье представлены результаты по разработке технологии рециклинга, которые в максимальной степени реализуют вопросы промышленной безопасности и предельно снижают нагрузку на окружающую среду в процессе переработки одного из продуктов детоксикации люизита – арсенита натрия гидролизного.

This article shows the results of recycling technology that maximally solve industrial safety problems and bring down the hazards of the impact upon the natural environment to the minimum during processing hydrolytic sodium arsenite, one of lewisite detoxicity products.

Ключевые слова: рециклирование, детоксикация отходов,
промышленная безопасность, оксид мышьяка

Key words: recycling, wastes detoxicity, industrial safety, arsenic oxide

Известно, что в России процесс переработки люизита осуществлялся путём проведения щелочного гидролиза с получением жидких реакционных масс и продуктов их выпаривания – «сухих» солей с техническим названием арсенит натрия гидролизный (АНГ). Реакционные массы люизита являются ценным мышьяксодержащим сырьем, вследствие чего они подвергаются переработке с получением товарной продукции – элементного мышьяка и его оксида. Однако разработанные процессы переработки реакционных масс характеризуются малой глубиной утилизации токсичного компонента в рамках единичной операции – одного цикла. Так, при переработке жидких реакционных масс методом электролиза образуется отработанной катодит, содержащий после окончания единичного цикла в своём составе половинное количество арсенита натрия. Процесс получения оксида мышьяка из «сухих» солей приводит в рамках одного цикла к выведению из оборота не более 65% арсенита натрия. Указанные причины заставляют совершенствовать технологические процессы в сторону увеличения глубины переработки токсичных реагентов.

В статье [1] авторами представлены результаты по разработке технических решений процесса переработки АНГ в аспекте охраны окружающей среды и экологической безопасности. За прошедшее с 2008 г. время вы-

полнен большой объём экспериментальных работ как на лабораторном оборудовании, так и на специально созданной модельной демонстрационной установке (объект УХО п. Горный, Саратовская область) с целью оптимизации условий проведения технологических операций переработки АНГ в мышьяк и его соединения, минимизации количества твёрдых отходов и жидких стоков с созданием эффективных систем их очистки.

В настоящей статье представлены результаты исследований, целью которых являлась разработка замкнутых циклов по мышьяксодержащим соединениям на основных технологических операциях при переработке АНГ в мышьяк и его оксид As_2O_3 с помощью операций рециклинга.

Под рециклингом (синоним рециклизация, рециклирование) в экологическом понимании подразумевается направление опасных (токсичных, радиоактивных и т.п.) отходов на повторное использование. В настоящей публикации под рециклингом понимается многократный оборот мышьяксодержащих технологических сред с целью исключения (или минимизации) образования токсичных отходов.

Кроме увеличения глубины передела мышьяксодержащего сырья, причиной введения операций рециклинга в технологии переработки АНГ является непостоянство

Таблица 1

Паспортные данные образцов арсенита натрия гидролизного

Показатель / № партий	Арсенит натрия в пересчете на оксид мышьяка, % масс.	Натрия хлорид, % масс.	Нерастворимые в воде вещества, % масс.
Требования ТУ	Не менее 20	Не более 55	Не более 3,5
10	9,08	42,58	2,76
22	20,62	48,45	1,65
32	29,38	49,97	6,4
38	18,11	50,74	15,2

состава исходного сырья. Следует отметить, что АНГ выпускался согласно техническим условиям «Арсенит натрия гидролизный (технический), ТУ 2622-159-04872-2005». В таблице 1 приведены сравнительные данные по составу различных партий АНГ и нормативные показатели по ТУ.

Широкий разброс состава исходного сырья по высокотоксичному компоненту потребовал ввести в технологию переработки АНГ многократно повторяющиеся операции (рециклы). На рисунке приведена базовая схема процесса, отвечающая требованиям низкоотходной технологии переработки высокотоксичного сырья, включающая анализ основных технологических операций.

Введение АНГ (рис., блок 1) в водный раствор соляной кислоты с формированием системы, имеющей значение pH 8,0 – 8,5, позволяет одновременно с растворением основных компонентов проводить нейтрализацию средних солей мышьяка. Образование кис-

лых солей создаёт систему с более широким диапазоном жидкого состояния мышьяковых соединений из-за больших значений растворимости кислых солей по сравнению со средними солями.

Одновременно с процессом нейтрализации средних мышьяксодержащих солей введение соляной кислоты приводит к высаливанию из формируемой системы хлорида натрия в количестве от 35 до 65 масс.%. Тем самым уже при растворении АНГ в водном растворе соляной кислоты закладываются основы процесса разделения «сухих солей» на базовые ветви – мышьяксодержащую (раствор) и хлорида натрия (твёрдая фаза). Тем самым указанный простой технологический приём позволяет осуществить процесс растворения практически любых партий АНГ без проведения анализа состава фаз в сложной гетерогенной системе АНГ-НСl-H₂O.

Полученная гетерогенная система подвергается процессу фильтрования, в ходе

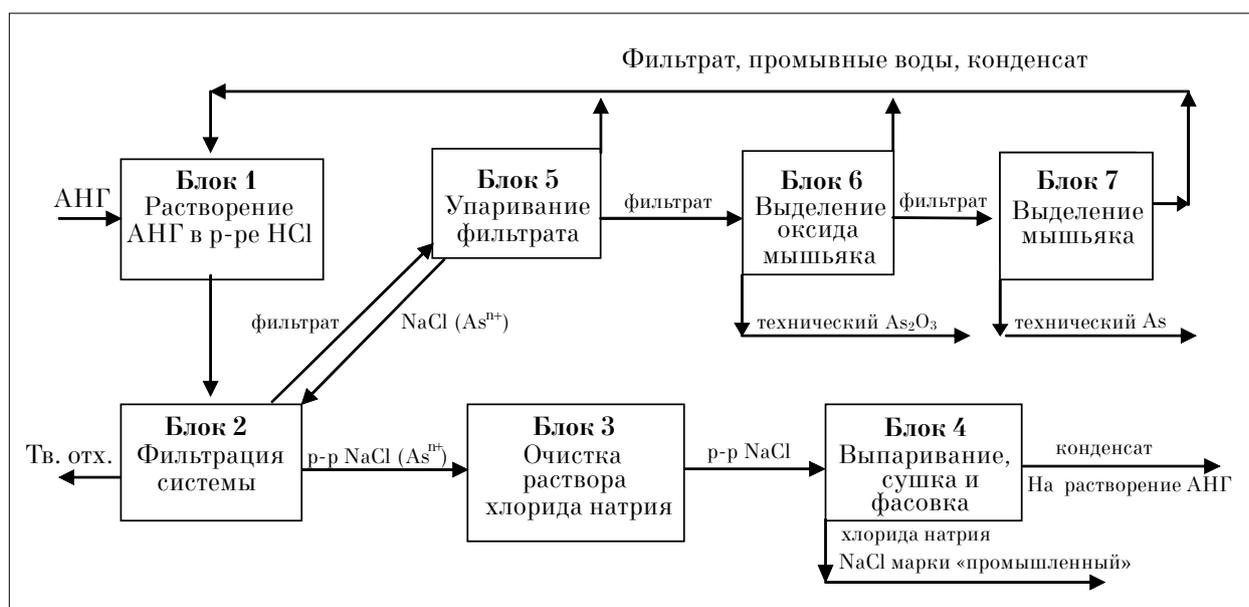


Рисунок. Блок-схема процесса переработки арсенита натрия гидролизного (АНГ)

которого на фильтре отделяется от жидкой фазы смесь «нерастворимых в воде веществ» и хлорида натрия.

Отделяемый осадок, содержащий адсорбированные соединения мышьяка, тщательно промывается последовательно тремя порциями 20% водного раствора хлорида натрия. Применение в качестве промывной жидкости раствора соли, а не воды, обусловлено минимизацией растворения хлорида натрия при сохранении хорошей растворяющей способности по отношению к мышьяксодержащим соединениям.

Первая порция промывного раствора, содержащая наибольшее количество вымываемых солей мышьяка, соединяется с отделенным фильтратом, а две последующие направляются на формирование растворителя ($H_2O - HCl$) для растворения следующей партии АНГ.

В зависимости от партии АНГ фильтрат, образующийся при растворении «сухих солей» с применением в качестве растворителя водного раствора HCl , содержит арсениты и арсенаты в концентрации 15–19 масс.%. При замене части воды на промывной раствор концентрация мышьяксодержащих солей возрастает до 20–24 масс.%. Поскольку величина растворимости кислых солей мышьяксодержащих кислот примерно равна 50 масс.%, рост концентрации этих солей при замене части воды на промывную жидкость не является препятствующим фактором, более того, это снижает энергозатраты при проведении следующей технологической операции – выпаривании фильтрата (рис., блок 5). Из выполненного анализа следует, что получаемые промывные воды, имеющие качественный состав, близкий к составу жидкой фазы растворяющей АНГ, могут быть использованы в качестве соразтворителя на втором (и последующем) циклах процесса растворения новых порций АНГ.

Фильтрат, полученный в ходе растворения АНГ, поступает в выпарной аппарат, где происходит концентрирование дигидроарсенита натрия до уровня более 25 масс.% (рис., блок 5). Эта операция позволяет в последующем снизить время процесса осаждения оксида мышьяка (рис., блок 6) с 4–20 часов до 15–30 минут. Процесс осаждения оксида мышьяка происходит вследствие нейтрализации полученного раствора дигидроарсенита натрия соляной кислотой. Выпадающий осадок отделяется от жидкой фазы путём фильтрования и далее подвергается

процессу репульпирования в водной среде для выведения из состава хлорида натрия. По достижению содержания в оксиде мышьяка основного вещества более 95 масс.% процесс отмывки осадка заканчивается. Воды от промывки и репульпирования оксида мышьяка (рис. 1, блок 6) содержат в своем составе хлорид натрия и оксид мышьяка. Поскольку раствор, образующийся при растворении АНГ в воде, имея щелочную реакцию, растворяет оксид мышьяка с образованием арсенита натрия, то данный вид остаточных растворов также может быть использован в качестве растворителя АНГ начиная со второго цикла процесса.

Фильтрат, получаемый в ходе отделения оксида мышьяка, содержащий смесь арсенитов и арсенатов натрия, поступает в реактор восстановления (рис., блок 7), где происходит процесс получения элементного мышьяка марки «технический». В качестве восстановителя применяется диоксид титана [2], позволяющий проводить процесс восстановления в щелочной среде с высокой степенью эффективности (более 85%). После отделения мышьяка и его промывки водой образуется новая жидкая фаза, содержащая смесь солей мышьяка и хлорида натрия. Она также направляется на растворение АНГ, создавая замкнутый цикл по соединениям мышьяка.

Таким образом, анализ операций, протекающих в блоках 2, 5, 6, 7 однозначно свидетельствуют о возможности повторного использования всех видов технологических жидких растворов для переработки АНГ. Данное обстоятельство, исключая необходимость очистки образующихся стоков от токсичных соединений, существенно улучшает экологические показатели технологии, повышая при этом экономическую составляющую технического процесса.

Хлорид натрия, очищенный до определенного уровня в блоке 2, вымывается с фильтра водой до формирования насыщенного $\approx 20\%$ раствора, который направляется в блок 3 на очистку последовательно химическим и адсорбционными способами. Сущность химического способа заключается в окислении соединений мышьяка (III) гипохлоритом натрия с последующим осаждением полученных арсенатов хлоридом железа (II) [3]. Осадок нерастворимого арсената железа отделяется на фильтре и подвергается процессу утилизации (захоронение или сжигание на специальных объектах). Раствор

хлорида натрия подвергается окончательной очистке, проходя через каскад адсорберов, с дальнейшей выпаркой и сушкой. Получаемый хлорид натрия соответствует марке «Промышленный» по ТУ 18-11-3-85 «Натрий хлористый (поваренная соль) для промышленного потребления», является ценным сырьем для хлорной промышленности. Кроме того, он может быть использован для приготовления буровых растворов в процессах добычи нефти и газа.

В заключение необходимо отметить, что разработанная совокупность технических решений позволила применить операции рециклирования к переработке высокотоксичного сырья (АНГ) и тем самым одновременно улучшить экологические и экономические показатели предложенной технологии.

Литература

1. Елисеев Д.А., Демахин А.Г., Чупис В.Н., Олискович В.В. Процесс переработки продукта детоксикации люизита – арсенита натрия гидролизного в аспекте охраны окружающей среды и экологической безопасности // Теоретическая и прикладная экология. 2008. № 4. С. 103–106.
2. Чупис В.Н., Растегаев О.Ю., Малишевский А.О. Перспективные подходы к перепрофилированию объектов по уничтожению химического оружия. Реагентные технологии извлечения мышьяка из мышьяксодержащих реакционных масс и отходов // Теоретическая и прикладная экология. 2010. № 1. С. 87–95.
3. Демахин А.Г., Елисеев Д.А., Талаловская Н.М. Основные направления создания технологии глубокой и комплексной переработки техногенного мышьяк-содержащего сырья // Цветные металлы. 2009. № 4. С. 65–67.

Эволюция представлений о восстановлении земель. II. Античность. Неевропейские и Римская цивилизации

© 2010. И. В. Коньшев¹, ответственный секретарь Совета, нач. управления,
А. Г. Назаров^{1,2}, д.б.н., профессор, директор центра, зам. председателя Совета,

¹Госкорпорация «Росатом», Общественный Совет Госкорпорации «Росатом»,

²Экологический центр Института истории естествознания и техники
им. С. И. Вавилова РАН,

e-mail: igorcon@yandex.ru, anaz@yandex.ru

В статье рассматриваются вопросы эволюции представлений о восстановлении земель в неевропейских очагах земледелия и античном периоде Римской империи. Показаны положительные попытки восстановления земель, плодородия почв в процессе их сельскохозяйственного освоения. Рассмотрены научно-практические подходы выдающегося античного естествоиспытателя и земледельца Колумеллы по улучшению и восстановлению земель в процессе их интенсивного сельскохозяйственного использования.

The article considers evolution of ideas of soil remediation in non-European foci of agriculture as well as during the antique period of the Roman Empire. Positive attempts of remediation of soil and soil fertility in the process of agriculture are shown. Scientific-practical approaches of the outstanding antique naturalist and agriculturalist Kolumella aiming at soil improving and remediation in the process of its intensive agricultural use are considered.

Ключевые слова: античность, восстановление земель, агроэкология, плодородие почв, римская агрокультура, неевропейские очаги земледелия, теория агрокультуры, Колумелла

Key words: antiquity, soil remediation, agroecology, soil fertility, non-European foci of agriculture, theory of agriculture, Kolumella

Период античной цивилизации определяют с VIII в. до н. э. до V в. н. э., когда пала Римская империя от нашествия тюркских племен гуннов, германских племен готов (410 г.) и вандалов (455 г.), захвативших и разграбивших Рим [1]. По существу, античным периодом называют исторический период, связанный с древнегреческой и древнеримской цивилизациями. В культурном смысле античность часто ассоциируется с греческой цивилизацией эпохи расцвета Афин с 500 до 300 гг. до н. э.

В ранней Римской империи были выработаны теоретические представления о необходимости восстановления земель как целостной системы природы, неотделимой от человека.

Неевропейские очаги земледелия

Особенности использования и подходы к восстановлению земель в других, неевропейских, очагах земледелия – Западной Азии, Индии, Китае, Америке формировались в период, хотя и не вполне синхронный, но близкий к периоду начала европейской (эллинско-римской) античности.

Западноазиатский очаг земледелия формировался на территории Ассирии, древнего государства, основанного Ассуром около 2200 г. до н. э. в Северном Двуречье, образованном долинами рек Тигр и Евфрат (современная территория Ирака). К началу периода эллинистической античности (VII в. до н. э.) Ассирия была широко известна благодаря высокой культуре земледелия. В столице Ассирии Ниневии в VII в. до н. э. была осуществлена, по видимому, первая успешная попытка создания искусственных природно-антропогенных ландшафтов. Примером такого оптимального биоантропогенного ландшафта явились «висячие» сады Семирамиды – «седьмое чудо света». Основой садов послужили искусственные террасы, на которые был нанесен почвенный слой с последующей посадкой декоративных и плодовых деревьев. Для полива почвы применялось искусственное орошение, при котором вода подводилась по акведукам. В этот период в Ниневии было создано одно из богатейших хранилищ мира – царская библиотека, содержащая около 30 тысяч клинописных табличек, разрушенная в 612 г. до н. э. Археологические раскопки в XIX веке позволили

расшифровать тексты табличек, на которых, наряду с другими, содержались сведения о повышении плодородия почв, сохранении и восстановлении обрабатываемых земель.

В Древней Греции и Древнем Риме также были знакомы, скорее всего на примере Ассирии, со способами искусственного создания почвенного покрова: перенос плодородного слоя почвы был важным приемом повышения продуктивности земель. До сих пор этот метод создания почвенного горизонта на восстанавливаемых землях широко применяется в разных регионах и странах мира [2].

Древнейшая *Индская*, или *Хараппская*, цивилизация сложилась в долине Инда на территории современного Пакистана в V–IV тыс. до н. э. и просуществовала до середины II тыс. до н. э. Ареал её распространения составлял по долине Инда с севера на юг до 1000 км, с запада на восток – до 1500 км. Отличительная черта Хараппской цивилизации – строительство городов. Всего выявлено около 800 городов и поселений. Благоприятные климатические и географические условия способствовали развитию в долине Инда продуктивного земледелия и скотоводства. На полях выращивались пшеница, ячмень, просо, горох, кунжут, хлопчатник. Археологические исследования подтверждают высокий уровень обработки металлов (плавку, ковку и литье), что позволяло изготавливать прочные и долговечные орудия для вспашки и рыхления земель. Поддержание плодородия почв – многовековая традиция индийской культуры. Можно с большой долей вероятности утверждать, что представления о восстановлении земель сложились у древних индийцев раньше, чем в Европе и Малой Азии [3].

Сменившая Хараппскую *Ведийская* (Индоарийская) цивилизация конца II – середины I тыс. до н. э. на раннем этапе (XIII–X в. до н. э.) связана с расселением племен ариев в Северной Индии. Центральная часть Индо-Гангской равнины почиталась как Арьяварта – священная земля ариев. На позднем этапе (IX–V вв. до н. э.) происходило образование первых государств [4]. В индоарийских ведах отразился экономический уклад формировавшейся новой этнической общности. Освоение долины Ганга в процессе миграции ариев с северо-запада Индии было длительным. Крупных центров-городов, подобных хараппским, ведийские индийцы не создавали до VI в. до н. э. Земледелие играло значительную роль в хозяйственной жизни. Для вспашки и рыхления земель повсеместно применялись

плуг и мотыга. На полях культивировались пшеница, ячмень, кунжут, хлопчатник и впервые в истории – рис. При раскопках найдены остатки примитивной системы орошения, которая служила восстановлению плодородия засушливых земель и давала возможность получать по два урожая в год.

Огромную роль играло скотоводство. Крупный рогатый скот являлся мерилем богатства и процветания. Сменившая ведийскую цивилизацию *империя Маурьев*, объединившая десятки самостоятельных государственных образований Индии, просуществовала с середины I тыс. до н. э. до I в. н. э. Земледелие здесь развивалось по пути, близкому к интенсивному, вводились примитивные севообороты, набор основных культур, судя по археологическим данным, существенно не менялся, но разнообразие сортов увеличивалось [3, 4].

Китайская цивилизация прошла длительный путь развития. Значительный период её истории от III–II тыс. до н. э. по III в. н. э. составляло древнекитайское общество. Становление государства в Китае происходило в бассейне р. Хуанхэ в эпоху Шань-Инь, которая соответствовала эпохе бронзового века. Наиболее высокого развития в Китае достигает земледелие. В сельском хозяйстве Китая уже во втором тысячелетии до н. э. применялись системы севооборотов, использовались удобрения. Набор возделываемых культур остаётся тем же, что и в соседних странах Азии: ячмень, сорго, просо, различные виды пшеницы, садово-огородные культуры. Для обработки земель использовались деревянные орудия с вставными каменными вкладышами. Несмотря на преобладание ручного труда, кропотливая забота древних китайских земледельцев о возделываемой земле, повышении её плодородия, своевременном восстановлении нарушенных участков позволяла получать не только необходимое для пропитания продовольствие, но и прибавочный продукт – избытки урожая [5].

По-видимому, эффективности китайского земледелия способствовала система управления сельским хозяйством. Земли обрабатывались общинами из больших семей, которые были свободны и за которыми закреплялись определенные территории (земельные массивы). Они были общими, «общинными», во главе стоял Ван – главный правитель, управлявший земледельческим хозяйством больших, совместно обрабатываемых разными семьями общин. Ван следил не только за посевами и сбором урожая, но и состоянием

используемых земель, их своевременным «ремонтом», проведением противэрозионных мероприятий. В сознании древних земледельцев Китая издавна формировались представления о необходимости восстановления нарушенных земель, их возвращения в состояние, близкое к природному [1, 6 – 8].

Последующее создание централизованного государства в Китае – империи Цинь в 221 г. до н. э. прошло после завершения эпохи Чжоу, отмеченной кровопролитными войнами и социальными потрясениями. В ходе реформ, проведенных императором Цинь Шихуанди, приоритет отдавался сельскому хозяйству и военному делу. Когда по приказу императора были уничтожены все книги с философскими рассуждениями, этой участи избежали лишь трактаты о медицине и сельском хозяйстве, исторические хроники и книги об искусстве пророчества.

Открытие обработки железа, возможность изготовления прочных железных орудий, вспашки и обработки земли еще больше повысили эффективность земледелия. В эпоху Цинь, как отмечают историки, произошел переход к интенсивной системе ведения сельского хозяйства. Это выразилось в проведении больших объемов ирригационно-мелиоративных мероприятий, в освоении новых массивов земель, в совершенствовании технологий земледелия, конструировании сложных насосов для подъема воды с большой глубины и др. Особой охране и улучшению земель подлежали места посадок тутовых деревьев (шелковица). Со времени объединения Китая под властью династии Хань (206–200 гг. до н. э.) китайская цивилизация в относительно устойчивом виде сохранилась до революции XX в. Сохранилось и упрочилось представление о необходимости восстановления земель [8].

Наиболее крупные древние цивилизации **Америки** – майя (II тыс. до н. э. – X в. н. э.), ацтеки (XII–XVI вв.), инки (XIII–XVI вв.) в основу своего развития положили земледелие. Установлено, что они не знали плужного мотыжного земледелия, железных орудий труда и тягловых животных, но сумели культивировать множество растений, вошедших в обиход всего человечества. Среди них *картофель, кукуруза, подсолнечник, томаты, бобы, какао, арахис, табак, каучуконосы* и др. [9].

До завоевания Америки Колумбом и испанцами индейцы создали не только высоко развитую земледельческую, но и инженерно-строительную цивилизацию: многие из них

были искусными инженерами и опытными строителями. Инженерные навыки широко применялись при строительстве каналов для искусственного орошения земель и их обустройства в суровых условиях песчаных и каменистых пустынь. Индейцам принадлежит изобретение особого способа земледелия – «плавучие сады», или чинампы. Они до сих пор встречаются в некоторых районах Мексики и представляют собой насыпные или плавучие островки из веток и прутьев, засыпанных плодородной землей. Строились они на неглубоких озерах или болотах, сохраняя плодородие искусственно созданных земель несколько столетий и давая по несколько урожаев в год [1].

Приведенные примеры говорят о высокой степени проникновения в сущность биологического потенциала земель, острой наблюдательности индейцев за процессами роста и преобразования растений в фило- и онтогенезе, о большом накопленном опыте бесплужного возделывания земли (до сих пор до конца не выясненном), о знании тонких приемов агротехники и восстановления плодородия земель, видимо, путем их своевременной рекультивации и применения продуманной системы севооборотов.

Широкое развитие в это время приобретает ирригационная система в низовьях Нила, в Средней и Малой Азии, в Индии, Китае, Южной и Центральной Америке. Ирригационные конструкции прошлого поражают своей законченностью и эффективностью, о чем свидетельствует высокая плотность населения в этих районах. На орошаемых землях Туркмении в позднем неолите, во II–I вв. до н. э., она достигала 80–90 человек на км² [10].

Помимо поверхностных вод для орошения земель и снабжения водой пастбищ начинают успешно использоваться подземные воды, извлекаемые каризами – дренажными галереями, перехватывающими подземные потоки в предгорьях хребтов Средней и Малой Азии, Азербайджана. Пробразом современных инфильтрационных водосборов являются колодцы, сооруженные на глинистом днище плоских западин – такыров. Эти колодцы принимали в себя и сохраняли под землей воды весеннего и зимнего стока, давая возможность использовать их для водопоя скота в жаркое летнее время. Более совершенные по устройству конденсационные колодцы и бассейны обеспечивали получение воды на основе процесса естественной конденсации паров из воздуха. Их строительство относят к IV–III вв.

до н. э., ко времени существования Боспорского рабовладельческого государства [1, 10].

Теория и практика агрикультуры Римской империи

Общеизвестны достижения античной, прежде всего греческой, а позже и римской научной мысли в отдельных областях научного знания, таких, как философия, математика, астрономия, механика, медицина. Но даже в эпоху расцвета научного знания в Греции (VI–V вв. до н. э.) наука не входила в число общезначимых и объективных систем познания мира, которые бы основывались на обобщении опытных данных, эксперименте, математическом анализе. В античной науке важную роль играл субъективный (человеческий) фактор. Господствовали философские представления отдельных учёных и философских школ об устройстве Мира и порядке вещей в нём.

Римская научная традиция, унаследовавшая общую традицию Античности, была направлена на осознание единства природы и человека, на познание закономерностей универсума. Мир в Античности воспринимался живым, вечным, неделимым, прекрасным целым [1, 2].

Мировоззренческие особенности римской науки объясняют примечательную особенность античной цивилизации в целом: при общем высоком развитии знаний цивилизация античного периода не стала технической цивилизацией. Последней не было места в одушевленном и одухотворенном космосе с почитаемым всеми ареопагом богов. Несмотря на относительную разработанность в теоретическом знании античности некоторых методов экспериментальных и опытных исследований, а в ряде случаев и их математического обоснования, в практике ведения хозяйства они почти не применялись [11]. Римская наука в целом не представляла значимую общественную силу; социального института учёных, равно как и отдельных групп узких специалистов, не существовало [12].

В Римской империи науки делились на умозрительные, или теоретические (*artes doctae*), и эмпирические, связанные с практической деятельностью. К практическим наукам (*artes liberales*) относились земледелие (агрикультура), медицина, военное и строительное дело, искусство мореплавания и некоторые другие области прикладного знания [12].

Поскольку научное знание в Римской империи было тесно связано с философией,

учёные-теоретики (философы) относили каждое конкретное естественно-научное знание к философии, а ученые-естествоиспытатели, занимающиеся медициной, математикой, географией или теорией агрикультуры, спешили называть себя философами [13].

Возвращаясь к эпохе становления и развития Римской империи от Республики II в. до н. э. до расцвета империи II в. н. э., нам вполне понятной становится некоторая «странность» и неожиданность отнесения теории агрикультуры, наряду с математикой, медициной, астрономией, к числу основных наук. Действительно, к рассматриваемому этапу периода Античности теория агрикультуры, отраженная в трудах греческих и римских авторов, насчитывала уже несколько столетий [14]. Такое длительное развитие отрасли сельскохозяйственного знания в Римской империи не является чем-то экстраординарным. Могущество империи и благосостояние римского общества держались на земледелии. К началу II в. н. э. Римская держава занимала с запада на восток и с севера на юг огромную территорию площадью 1 млн. 750 тыс. миль. Численность же населения достигала 50 млн. человек – половину обитаемой Ойкумены. Сельское хозяйство на этой территории было основой развития производительных сил. Все влиятельные люди Рима и провинций были крупными землевладельцами. В само понятие свободного римского гражданина входило право наделения его землёй.

Многие крупные учёные-естествоиспытатели и философы эпохи Римской империи (Варрон, Вергилий, Цельс, Плиний Старший, Колумелла и др.) в круг «благородных наук» включали и теорию агрикультуры. Широко распространённая Энциклопедия Корнелия Цельса (I в. н. э.) ограничила список «свободных наук» шестью науками: агрикультура, медицина, военное и ораторское искусства, философия и право [15 – 16].

За последующие 300 лет становления Римской империи возникли новые формы сельскохозяйственного производства, отразившиеся в литературе по сельскому хозяйству. Основной формой организации сельскохозяйственного труда стали средние по размеру хозяйства – рабовладельческие виллы, продукция которых была тесно связана с рынком [14]. Представления римлян о научном знании, связанном с сельским трудом, явились следствием социального института римской гражданской общины. Она выработала такие правила ведения хозяйства и способы землепользова-

ния, которые, по словам Плиния Старшего, определили «безмерное величие римского общественного порядка». Оно заключалось прежде всего в том, что *статус свободного гражданина устанавливал обязательное владение землёй*.

«Безмерное величие общественного порядка» опиралось на социальную организацию сельской общины. Её структурообразующей единицей была «сельская фамилия» – объединенная семья, состоящая из родственников (свободных граждан) и рабов. Глава семьи, «отец семейства» (*pater familias*) обладал неограниченной властью. Но на него ложилась и большая ответственность за правильное доходное владение землёй, своевременное восстановление «сил земли», уплату налогов, поддержание здоровья работников, включая и рабов, и выполнение массы других обязанностей, связанных с тяжёлым крестьянским трудом.

Подробное описание жизни и установлений замкнутой сельской фамилии оставил потомкам Марк Порций Катон Старший в своём трактате о земледелии под названием «О философии хозяйства» (165 г. до н. э.). Он был написан после победы Рима в III Пунической войне, когда под влияние будущей мировой империи попали страны Средиземноморья с богатыми, разнообразными традициями хозяйства и землепользования [17].

Основными источниками сведений о состоянии сельского хозяйства Рима, способах обработки земель, возможности (или невозможности) их восстановления после длительного использования служат труды Плиния Старшего и Колумеллы, а также ряда других авторов. Из 37 книг своей «Естественной истории» шесть книг, с 14-й по 19-ю, Плиний Старший посвятил энциклопедическому обзору практического опыта и достижений сельскохозяйственного производства, но без их теоретического обобщения. Наиболее плодотворная попытка теоретического обобщения и анализа практического опыта земледелия своей эпохи принадлежит выдающемуся естествоиспытателю Античности – Колумелле.

Гигантская фигура Колумеллы выделяется среди учёных и практиков-земледельцев Античности, оказавших влияние на многие последующие поколения работников сельского хозяйства. Луций Юний Модерат (*Columella, Lucius Iunius Moderatus*) был родом из Гадеса (совр. Кадис) в Испании. В энциклопедиях и словарях характеризуется

как римский писатель и агроном I в. н. э. Он обогатил римскую литературу в этой области специальным трактатом, своеобразным пособием «О сельском хозяйстве» (*De re rustica*) в 12 книгах. Автор изложил в I книге основные принципы ведения хозяйства, во II – сведения о сельскохозяйственных работах, в III–V – учил, как ухаживать за деревьями и обрабатывать виноградник, в VI–IX кн. описал разведение домашнего скота, рыб и пчёл [17, 19].

Из более ранних произведений о сельском хозяйстве сохранился «Трактат о деревьях» (*Liber de arboribus*) того же автора, содержание которого превосходит книги III и IV позднейшего трактата-пособия, написанного, как полагают, в 60–65 гг. (книга III имеет датировку 42 г.). Его произведение меньше всего напоминает набор сухих лекций; в нём много страниц отведено воспеванию сельской жизни, восхищению работой земледельца, пронизано страстной любовью к природе. Его изложение ясное и точное, стиль и язык хотя и просты, без изысканных выражений, и обращены по большей части к практикам сельского хозяйства, но показывают человека наблюдательного, широко мыслящего, хорошо образованного. Сочинение Колумеллы было популярно не только в Античности, но и в Средневековье, в Новое Время, а также в эпоху формирования капиталистических отношений и в период Новейшей истории.

В практических целях с 1470-го по 1655 г. вышло 63 печатных переиздания этого произведения, переводы на французский, немецкий и др. языки осуществлялись в IX–XX вв.; последнее русское издание собрания трудов римских авторов по сельскому хозяйству, с текстами Колумеллы, вышло в свет в 1958 г. [17].

Знаменитый трактат Колумеллы «О сельском хозяйстве», написанный в I в. н. э., представляет, по мнению исследователей-историков науки, выдающийся памятник научной мысли Античности, где опыт землепользования тщательно систематизирован и *впервые вводится теория агрокультуры*.

Основная историческая заслуга Колумеллы состоит в том, что он выдвинул и глубоко обосновал тезис, резко противоречащий широко распространенной в его время теории убывающего плодородия почв [18]. Используя достижения теории агрокультуры и собственный многолетний опыт ухода за землёй, Колумелла высказал противоположное утверждение: давая земле отдыхать и своевременно её под-

кармливая, можно получать большие урожаи. Теоретические положения Колумеллы охватывают общую теорию агрикультуры, практические же рекомендации и вытекающие из них теоретические обобщения Колумеллы лучше всего черпать из его опыта возделывания садов и особенно его любимых виноградников. В развитие своего нового взгляда на землепользование Колумелла пишет: *«Причина скудных урожаев не в одряхлении земли; не от усталости и не от старости, как думало большинство, а от нашего собственного нерадения поля меньше щедры к нам. Можно получать большие урожаи, если восстанавливать силы земли частым, своевременным и умеренным уваживанием»* [19, с. 286].

Сельскохозяйственная наука и практика его времени, к I в. н. э., накопили богатый арсенал наблюдений, способов и средств ухода за землёй как сложной экосистемой. Это и выбор оптимальных мест (природных участков, территорий) для тех или иных видов землепользования (посева хлебных культур, посадки овощей, закладки садов, виноградников, масличных и цветочных культур и др.); изучение различных видов почв и их группировка по свойствам (пробраз классификации), по степени пригодности выращивания для разных культур; совершенствование техники пахоты, рыхления и сева; знание бесчисленных видов лоз и деревьев, правил посадки и ухода за ними, прививок и обрезок плодов и овощей; уход за домашним скотом и птицей, сбор и компостирование их органических удобрений и многие другие способы и приёмы ведения хозяйства, которые, по мнению Колумеллы, *«хотя и не требуют очень тонкого ума», но «не по плечу и тупице»* [19, с. 287].

Славу искусного земледельца и прижизненное признание своих учёных коллег и молодых владельцев поместий Колумелла приобрел благодаря тому, что его теоретические изыскания в области агрикультуры основываются на его личном практическом опыте, и тому, что его теория агрикультуры изложена в лучших традициях философской системы своего времени.

В книге о садах и виноградниках Колумелла рассказывает о том, как ему удалось воссоздать выродившуюся в Италии аманейскую виноградную лозу в тех местах, где, как считали, земля *«от старости перестала рожать»*. Он потратил несколько лет в упорных поисках лучших способов *восстановления земли: подбору и улучшению свойств (практически – рекультивации!) каменистой почвы, созданию*

оптимальных (экологических) условий произрастания этого сорта винограда, проведению множества экспериментов с виноградной лозой и приемами её обрезки, пока не добился получения высоких урожаев аманейского сорта винограда, дававшего, как и прежде, превосходное вино.

Это лишь один из сохранившихся примеров практических достижений Колумеллы, но, судя по высокому авторитету, который он имел среди современников-землевладельцев, были и другие, не дошедшие до нас, его личные успехи в земледелии.

Как каждый крупный владелец земли, живущий исключительно за счет доходов от своего поместья, имевший, судя по его трудам, хорошее и весьма разностороннее образование, Колумелла глубоко вдумывался, как бы мы сейчас сказали, в социально-экономическую и экологическую сферы деятельности земледельческого труда, в связанную с ними область организации и управления сельскохозяйственного производства. Он нигде не говорит об этом прямолинейно, высказывается довольно осторожно, но становится ясным, что ко времени его активной деятельности традиционная замкнутая «сельская фамилия», мельчайшая социальная единица гражданской общины Рима, с её мелким и средним по размеру хозяйством и экстенсивным типом земледелия, как и получившие распространение крупные поместья-латифундии, в его глазах и в глазах ряда немногих его единомышленников перестала определять плиниевское «безмерное величие римского общественного порядка».

Наступили другие времена. Исподволь, вначале незаметно, а затем всё более зримо выступая на арену общественной жизни, начали проявляться черты экономического и нравственного упадка состоятельного слоя Римской империи. До самого упадка и распада «державы мира», по земным меркам, ещё очень далеко – не меньше трёх столетий. Но признаки его проступили к середине и концу I в. н. э.

Колумелла осознает изменения, происшедшие в системе культурных ценностей со времени Катона: под влиянием перемен ветшали и ценности замкнутого общинного хозяйства. Носители их, *«оставив плуги и серпы, сползались (!) в город»*. Под влиянием процесса урбанизации бывших сельских труженников и разложения прежних понятий о чести *«общепринятым стало убеждение, с горечью отмечает Колумелла, что сельское хозяйство – дело грязное»*.

В исследованиях советских историков, широко и разносторонне рассмотревших культуру Древнего Рима, некоторые их оценки научного метода Колумеллы и целей научного изучения современной ему действительности не кажутся нам справедливыми и правильно акцентированными [20]. В отношении изложенного выше авторы «Культуры...» заключают: «Излюбленным предметом авторов эпохи Империи на долгое время стали моральные поучения на тему о страсти к роскоши и падении нравов современников. В этом отношении Колумелла не отличался оригинальностью» [19, с. 288].

Нам же видится совсем другое: исторический метод рассмотрения Колумеллой материала предшественников близок к прототипу ещё не сформировавшегося в то время историко-научного метода исследования, что по отношению к греческим и римским мыслителям-естествоиспытателям впервые отметил В.И. Вернадский [21]. И целью наброска картины состояния сельского хозяйства Римской империи, думается, для Колумеллы были не «моральные поучения на тему о страсти к роскоши и падении нравов», а иные, более высокие и более прагматические побуждения для практиков-земледельцев. Пафос трактата и советы Колумеллы обращены к «рачительному хозяину»: он хочет убедить читателя в том, что земледелие – не «грязное дело», а наиболее благородный и достойный способ достижения благосостояния, самый чистый способ сохранения и приумножения имущества. Он говорит на понятном каждому землевладельцу, хозяину и управляющему имением языке простых экономических понятий выгоды, прибыли, обогащения, увеличения имущества и других столь же употребительных в быту вещей. Но за внешне кажущейся простотой стоят годы неустанного труда, полевых опытов («экспериментов»), теоретических изысканий и раздумий о путях развития сельского хозяйства, о наиболее эффективных способах восстановления земель, которые должны прийти на смену ущербной и разорительной для практики земледелия «теории убывающего плодородия и неотвратимой старости земли».

Практические наставления Колумеллы, изложенные в его трактате, можно объединить в три основные группы:

- как и где выбрать имение;
- какие требования, на основе теории агрикультуры, предъявлять к обрабатываемой земле – к «уходу за землей»;

– какой способ ведения хозяйства, основанный на землепользовании, является более предпочтительным.

Вопрос о выборе и местоположении имения был связан с изменившимися реалиями жизни римского общества: часть состоятельных граждан, занятых в форумах и магистратах, не могла постоянно находиться в поместьях, как это было раньше. Поэтому Колумелла в первой группе своих советов-наставлений обстоятельно рассматривает конкретные вопросы: где, поблизости или вдали от города, следует приобрести поместье; какими должны быть оптимальные его размеры; как выбрать месторасположение имения с учётом климата, природы местности и почвы; как правильно расположить постройки; какие требования предъявлять к соседям; какими качествами должен обладать управляющий имением); как часто нужно посещать имение и др. Автор приходит к выводу, что наиболее подходящим служит пригородное имение, куда нетрудно приезжать после завершения дел в городе и занятому человеку. Вопрос о выборе пригородного имения и предъявляемых к нему требованиях, впервые поставленный и для условий своего времени разрешенный Колумеллой, – это вопрос, в конечном счёте, о путях научной организации и реабилитации хозяйственно-селитебной территории, в частности фермерских и дачных хозяйств, он не потерял актуальности и в наши дни.

Вторая группа вопросов по уходу за землей и практических советов автора трактата выше уже нами рассмотрена. Колумелле принадлежит историческая заслуга во введении в теорию агрикультуры и в практику земледелия научно обоснованного и успешно выдержавшего испытания на практике понятия «восстановление земель» и разработки ряда практических способов восстановления «сил земли» (регулярного и умеренного удобрения, чередования циклов пользования землей с циклами её отдыха (пара), совершенствования приёмов вспашки и сева новыми сельскохозяйственными орудиями, включая колесный плуг и ряд приспособлений, разработанных лично Колумеллой).

Третья группа «наставлений, советов», скорее – обращений Колумеллы к землевладельцам относится к наиболее существенным экономическим и естественно-историческим проблемам землепользования и управления сельскохозяйственным производством. Переходя на понятный хозяину поместья «потребительский язык», автор трактата

«О сельском хозяйстве» выдвигает перед ним три важнейших принципа извлечения дохода с поместья: *знание дела, возможность тратиться и воля действовать*. Колумелла подчеркивает, что для успешного претворения этих принципов в жизнь необходимо знание теории агрикультуры, иначе «*воля и возможность, не соединенные со знанием, принесут хозяину большие потери*» [19, с. 288].

Далее Колумелла четко формулирует своё понимание наиболее перспективного, экономически выгодного типа сельскохозяйственного производства: таковым является *интенсивное ведение хозяйства, основанное на использовании теории агрикультуры, финансовых вложениях и возможности экспериментировать*. При таком способе ведения хозяйства поместье, судя по контексту, предполагается более крупным по размерам, но меньшим, чем поместья-латифундии.

Выделение крупных земельных наделов, латифундий, началось при императоре Августе в I в. до н. э. и к I в. н. э. стало в землепользовании Римской империи распространенным явлением. Увеличение общей площади имения происходило за счет включения в него необрабатываемых площадей пастбищ, лесных, кустарниковых, каменистых и прочих неудобий, не приносящих хозяину дохода, но нужных ему для повышения престижа. Со временем неудобья зарастали сорной растительностью или выбивались скотом и полностью выходили из хозяйственного обращения.

По нашей оценке, при переводе площадей земли в современные меры (гектары), площади латифундий колебались в пределах 500–1500 га, возможно, в отдельных случаях, до 2000 га. Большинство же традиционных рабовладельческих вилл имели размеры 100–300 юг (один юг – мера площади земли, которую может вспахать пара волов в течение дня; приблизительно составляет четверть гектара). Следовательно, размер имения-виллы колебался в пределах 25–75 га, более крупных – до 100–150 га, в среднем около 50 га. В них обрабатывался каждый клочок земли. Многоплановое поместье Колумеллы в Ардее (близ Рима, ныне входит в территорию города) было крупнее и, как отмечают некоторые авторы, могло достигать 1500 юг (375 га). По нашим оценкам, с использованием пересчетов через площади центурий (квадратов со стороной 2400 футов), – в пределах 150–400 га, что определенно должно было быть меньше латифундий, поскольку Колумелла был страстным противником таких экстенсивных больших

по размерам хозяйств-латифундий, когда «на поля выпускается целая толпа рабов», а скот стравливает посадки и разрушает плодородные почвы.

Обоснование Колумеллой, говоря современным языком, *интенсивного* ведения хозяйства с использованием научных достижений теории агрикультуры и новых его представлений о возможности восстановления земель можно назвать настоящим прорывом в будущее. Прорыв этот в эпоху господствования, по существу, экстенсивных методов хозяйствования и обветшалых представлений о «старении земли» на большей площади огромной территории Римской империи кажется феноменальным, ничем, кроме трудолюбия и таланта автора, не подготовленным, для периода Античности совершенно не своевременным. Но такая точка зрения была бы односторонней и не соотносилась бы с той культурной средой римской эпохи середины I в. н. э., в которой жил и работал Колумелла.

Он был не просто крупным землевладельцем, заботящимся о повышении доходности своего имения. Агрикультура для Колумеллы не ограничивается разработкой только практических рекомендаций земледельцу, она для него – «разнообразная и обширная наука».

Агрикультура Колумеллы объединила высшие достижения сельскохозяйственной теории длительного 300-летнего этапа II в. до н. э. — I в. н. э. Наполненная новым содержанием, она критически переработала существовавшие теории греческих и ранних римских авторов. Из римских учёных он называет Катона, отца и сына Сазернов, Тремеллия Скрофу, М. Теренция и Вергилия. Среди современников Колумеллы упомянуты Корнелий Цельс, кроме своей известной «Энциклопедии» написавший пять книг о сельском хозяйстве и книгу об уходе за ложами, Марк Варрон, не земледelec, а чистый философ, обобщивший произведения 50 греческих и римских авторов, и Юлий Грецин, который, отмечает автор, «изящно и учено» написал две книги о виноградниках, предмете особой заботы Колумеллы.

Наряду с выдающимися теоретическими достижениями в области теории плодородия почв и восстановления земель Колумелла практическими делами и советами, изложенными в его трактате о сельском хозяйстве, вместе с другими своими предшественниками и современниками способствовал тому, что к концу периода Античности пошатнулась одна из главных философских догм его времени

о невмешательстве в Природу. Он понимал, что это невозможно, и опыт общественного строительства и организации оптимального рентабельного имения открывал возможные пути *экологически оправданной деятельности человека*, как говорил Колумелла, «в союзе с природой», когда земледелец не только нарушает, но восстанавливает нарушенные земли, делает их плодородными и цветущими.

Концепция восстановления земли явилась качественно новой альтернативой бытовавшим долгие годы, многие столетия, а для ряда районов, возможно, даже тысячелетия, представлениям об истощении и старости земли, неспособной, подобно старой женщине, рожать. Эти представления в период античности и в более поздние периоды истории приобрели ложный статус «теории убывающего плодородия почв» [22]. Концепция Колумеллы явилась общей теоретической основой последующего восстановления нарушенных земель, возвращения их в новый хозяйственный оборот или в рекреационное использование для целей реабилитации (оздоровления) территории.

Поразительна экологическая интуиция Колумеллы, проявленная им за два тысячелетия до официального «открытия» экологии как науки, а точнее, введения в современное научное мировоззрение издавна существующего восприятия мира, жизни и человека как единого космического целого. Хорошо об этом написал J.D. Hughes в своей известной экологам книге «Ecology in Ancient Civilization» [23].

Обращённый к будущему, завет Колумеллы не скоро, но был услышан новыми поколениями, развивающими ныне его представления далекой Античности о возможности и необходимости восстановления и отдельных нарушенных участков, и обширных территорий земель – прообраза нынешней биологической реабилитации территорий.

Таким образом, краткий обзор неевропейских – западноазиатского, индийского, китайского, американского – очагов древнего земледелия позволяет с высокой степенью достоверности утверждать, что хронологически близкий к европейской античности период развития охарактеризованных цивилизаций (начало – середина I тыс. до н. э. – первые века н. э.) свидетельствуют об их более высоком, преимущественно интенсивном уровне обработки и восстановлении земельных ресурсов. Представления о необходимости своевременного восстановления убывающего плодородия почв путем агротехнических и

биотехнологических мероприятий (увеличение разнообразия окультуренных растений, создание искусственных плодородных биосистем, дозированное прикорневое орошение, отвод избыточных вод и др.) прочно вошли в арсенал повседневной практики земледельцев.

Относительная ограниченность пригодных для земледелия плодородных земель в описываемых регионах резко ограничила экстенсивные методы ведения сельского хозяйства, стимулировала к переходу на интенсивный путь освоения земель, составивший основу устойчивого и длительного по времени земледелия индийцев, китайцев и американских индейцев, земледельцев Ближнего Востока, Западной и Центральной Азии.

Развитие городов, торговли и ремесел во всех рассмотренных цивилизациях привело к появлению каменоломен, карьеров для добычи строительных материалов, рудников, шахт, мест выплавки металлов, красящих и других ремесленных предприятий. Все они начинались с отчуждения земель с последующим нарушением их плодородного почвенного слоя, либо полным разрушением плодородных земель (карьеры, рудники и др.).

Визученных литературных источниках не содержится сведений о какой-либо их дальнейшей рекультивации. Скорее всего, после обработки сырья нарушенные участки забрасывались и не восстанавливались. По-видимому, в доантичный и античный периоды представления о возможности полезного использования заброшенных и сильно нарушенных земель еще не были сформированы. Восстановление земель рассматривалось с точки зрения возможности восстановления их плодородия – по существу, как бы мы сегодня сказали, с биологической точки зрения. Несмотря на довольно развитую и в Древнем мире, и в Античности строительную технологию, практического интереса разрушенные участки земли не вызывали. Возможно, некоторые из них в целях сохранения плодородных земель, использовались для размещения на них ряда промышленных и ремесленных производств. Вопрос этот нуждается в дальнейшем изучении; частично он решался экономическими и правовыми методами в Римской империи путем оценки качества земель (прообраз кадастра) и разработки налоговой базы землепользования. Процесс осознания необходимости рекультивации – восстановления земель – был длительным, его корни, как видим, уходят к начальным периодам становления человеческого рода, но осмысление рекультивации земель

как важной практической сферы деятельности пришло почти два тысячелетия спустя, при иных масштабах воздействия человека на природные комплексы Земли.

Литература

1. Древний мир. Средневековье. М.: Мир книги. 2005. 563 с.
2. Рожанский И.Д. История естествознания в эпоху эллинизма и Римской империи. М.: Наука, 1988. 448 с.
3. Щетенко А.Я. Первобытный Индостан / Под ред. В.М. Массона. Л.: Наука, 1979. 274 с.
4. Новая история Индии. М.: Изд-во восточной литературы, 1961. 634 с.
5. Крюков М.В. и др. Древние китайцы в эпоху централизованных империй. М.: Наука, 1983. 415 с.
6. Яншина Э.М. Формирование и развитие древнекитайской мифологии. М.: Наука, 1964. 248 с.
7. Юань Мэй. Новые [записи] Ци Се (Синь Ци Се) или О чем не говорил Конфуций (Цзы бу юй). Пер. с кит., предисл., коммент. и прил. О. Л. Фишман. М.: Наука, 1977. 504 с. (Серия «Памятники письменности Востока», LV).
8. Фитцджеральд Ч.П. История Китая. М.: Мысль, 2005. 460 с.
9. Ларичева И.П. Палеоиндейские культуры Северной Америки. Новосибирск: Сибирское отд. изд-ва Наука, 1976. 229 с.
10. Мухина Л.И., Толстихин О.Н. Природа и научно-техническая революция. М.: Недра, 1985. 112 с.
11. Landels J.G. Engineering in the Ancient World. Berkeley; Los Angeles. 1978. 172 с.
12. Stahl W.H. Roman Science. Madison. 1962.
13. Блаватский В.Д. Природа и античное общество. М.: Наука, 1976. 80 с.
14. Кузицин В.И. Очерки по истории земледелия Италии II в. до н.э. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1966. 310 с.
15. Сергеев М.Е. Жизнь древнего Рима. М.; Л.: Наука, 1964. 336 с.
16. Сергеев М.Е. Ремесленники древнего Рима. Л.: Наука, 1968. 164 с.
17. Катон, Варрон, Колумелла, Плиний. О сельском хозяйстве / Под ред. М.И. Бурского. М.: Изд-во сельскохозяйственной литературы, 1958. 352 с.
18. Ковда В.А. Основы учения о почвах. В 2-х книгах. М.: Наука, 1973.
19. Культура древнего Рима. В 2-х томах / Отв. ред. Е.С. Голубцова. Т. I. М.: Наука, 1985. С. 167–290.
20. Культура древнего Рима. В 2-х томах / Отв. ред. Е.С. Голубцова. Т. II. М.: Наука, 1985. 390 с.
21. Вернадский В.И. Избранные труды по истории науки. Т. 1. М.: Наука, 1981. 387 с.
22. Кобышев И.В., Назаров А.Г. Эволюция представлений о восстановлении земель. I. Древний мир // Теоретическая и прикладная экология. 2010. № 2. С. 65–71.
23. Hughes J.D. Ecology in Ancient Civilization. New Mexico Press. 1975.

Международно-правовые принципы устойчивого управления лесами, экологический аспект

© 2010. А. И. Карпилович¹, к.т.н., и.о. начальника, Е. М. Гордеева², зам. главы,

¹Департамент лесного хозяйства по Приволжскому Федеральному округу Рослесхоза,
²Департамент лесного хозяйства Кировской области,
e-mail: deples-pfo@mail.ru, gordeeva@ako.kirov.ru

В статье рассматриваются вопросы разработки современных международно-правовых принципов устойчивого управления лесами, являющихся важным компонентом биосферной, экологической и экономической безопасности, что подчеркнуто резолюцией Генеральной Ассамблеи ООН, провозгласившей 2011 год Международным годом леса.

The article considers the problems of working out contemporary international law principles of sustainable management of forests that are an important component of biospheric, ecological and economical safety. This fact was pointed out by the resolution of the General UNO Assembly that declared 2011 to be The Year of Forests.

Ключевые слова: лес, экология, международное право, принципы устойчивого управления лесами

Key words: forest, ecology, international law, principles of sustainable forest management

Проблема обеспечения экологической безопасности стала особенно актуальной в связи с возрастанием негативного воздействия на окружающую природную среду хозяйственной и иной антропогенной деятельности, ростом количества техногенных катастроф, недостаточностью финансирования природоохранительной деятельности, частыми реформами государственного управления охраной природной среды, в том числе её важнейшей составляющей – лесами [1, 2].

Приоритетная роль важности сохранения и рационального использования лесов в решении этой проблемы объясняется тем, что они образуют на обширной части поверхности земной суши интенсивный растительный «... покров, выступающий в роли заряженной энергией Солнца и углеродом атмосферы аккумулятора, хранителя вод, видового и генетического разнообразия живых существ, мощного демпферного механизма, сглаживающего пики атмосферных процессов и, конечно, источника жизненно важных благ для людей, живущих в этих лесах или рядом с ними...» [3].

На Земле леса занимают более 3,4 млрд. га, или 27% площади суши. Россия исторически считалась самой богатой лесной державой, и в наши дни она обладает самыми большими лесными территориями, составляющими совокупно около 22% мировых площадей леса

(площади лесов трех других ведущих лесных государств от мировых лесов составляют: Бразилии – 16%, Канады – 7%, США – 6%) [4, 5]. Площадь покрытых лесной растительностью земель России составляет 776,1 млн. га, в которых находится около 81,6 млрд. м³ древесины, что составляет около четверти мировых запасов, всего же земель лесного фонда – 1173,1 млн. га, или 69% всех земель России [6]. В то же время эффективность работы лесопромышленного комплекса России остается исключительно низкой. Россия производит в 6–10 раз меньше добавленной стоимости в расчете на 1 м³ потребленного древесного сырья в сравнении с Германией, Швецией, Финляндией, США, Австрией [7].

Русские ученые одними из первых начали разноплановое изучение лесов и обосновали исключительную их роль в планетарных процессах сохранения состава и пригодности для жизнедеятельности человека всех компонентов биосферы: атмосферы, гидросферы, геосферы – всех областей распространения жизни на нашей планете [8 – 10]. Доказано, что лесные биоценозы участвуют в глобальных циклах важнейших биогенных химических веществ, воды в наземных экосистемах, кислородного и углеродного обменов в тропосфере, почвообразовании, регулировании сезонных осадков, формировании погоды и климата, температурных колебаний на конкретных территориях,

определяют эффективность ведения сельского хозяйства, создают благоприятные условия для жизнедеятельности человека [9, 10].

Экологические аспекты привлекли общественное внимание, и их социальная значимость возросла во второй половине прошлого века. Экологические веяния проникли на уровень международных соглашений, в национальные законодательства, в административные и ведомственные акты и в общественное мнение. Такое возрастание экологического мегатренда продолжается и поныне.

Исключительная красота русского леса, жизнь в окружении богатейших своими природными ресурсами лесов, которые безвозмездно кормили, согревали и укрывали людей в тяжелые для страны времена социальных потрясений и чужеземных нашествий, а затем помогали быстро восстанавливать разрушенное хозяйство, сказались на духовном формировании национального характера и объясняют любовь российских народов к лесу [8 – 10].

В настоящее время ввиду интенсивной экономической интеграции государств, их тесных географических контактов (близость территорий, трансграничный обмен людскими и материальными потоками, воздушной и водной средой) нельзя обеспечить полную экологическую безопасность какого-либо отдельного государства или региона. Только правильно организованная международно-правовая кооперация в области охраны окружающей среды и рационального использования опыта передовых государств, достигших лучших экономических результатов при сохранении и улучшении экологической обстановки в своей стране, в том числе при разработке современных принципов управления лесами, позволит решить возникающие проблемы в лесопромышленном комплексе крупнейших лесных держав, к которым относится Россия [11, 12].

Определяющая роль лесов для экологической, экономической и социально-культурной устойчивости и безопасности России подчеркивается во многих документах в области использования, охраны, защиты лесного фонда и воспроизводства лесов, принятых государственными органами в последнее десятилетие: в Федеральной целевой программе «Экология и природные ресурсы России (2002–2010 гг.) и её подпрограмме «Леса», в разработанных в развитие данной программы «Экологической доктрине Российской Федерации» и «Лесном кодексе Российской Федерации» [13 – 16].

Отмечая важность лесов для сохранения международной экологической безопасности и «...признавая, что леса и устойчивое ведение лесного хозяйства могут внести существенный вклад в устойчивое развитие, искоренение нищеты и достижение согласованных на международном уровне целей в области развития, особо отмечая необходимость устойчивого использования всех видов лесов, включая уязвимые лесные экосистемы...», Генеральная Ассамблея ООН в своей резолюции от 20.12.2006 № 61/193 постановила – провозгласить 2011 год Международным годом лесов [17].

Привлечение внимания к вопросам устойчивого управления лесами связано прежде всего с тем, что международное сотрудничество по охране, защите, рациональному использованию и воспроизводству лесов в настоящее время осложняется бессистемным и фрагментарным состоянием международной нормативной базы в этих сферах. Мировой опыт показывает, что проблема устойчивого управления лесами с целью сохранения лесных экосистем не решается лишь путем ограничений и ужесточения пользования ими, вплоть до исключения из пользования значительных территорий отдельного государства. Нужны новые инструменты регулирования лесной «политики» для реализации обязательств в области устойчивого управления лесами.

Система международно-правового регулирования является наиболее целостной системой регулирования. По уровню организации и целостности она превосходит систему политического и других видов регулирования. Правовое регулирование более устойчиво, меньше зависит от политических колебаний, его результаты легче предвидеть. Оно более формализовано и точно, отличается определенностью содержания и обязательной силой [18].

Сегодня на развитие принципов международного права в области сохранения лесов и управления ими особенно влияют экономические, социальные и экологические мировые процессы. Как указал Шумилов В.М.: «...природа не является бесплатным приложением к экономике; она имеет свою стоимость...» [19]. Юридически равноценные принципы образуют корпус принципов – *jus cogens* (императивное право) [20, 21].

На международной конференции ООН по окружающей среде и развитию в Рио-де-Жанейро в 1992 г. 70 стран подписали документ под названием «Лесные принципы», чем определили основную цель международных

принципов лесоводства – содействовать рациональному использованию, сохранению и развитию лесов и реализации их многоцелевых и взаимодополняющих функций и видов использования [22]. Генеральная Ассамблея ООН, подтверждая свою приверженность принципам международного «лесного» права, принятым в Рио-де-Жанейро, резолюцией от 31.01.2008 № 62/98 постановила принять «Лесные принципы» по всем видам лесов, которыми дополнила принципы международного права 1992 года в отношении лесов [23].

Подписав документы, государства-члены Генеральной Ассамблеи ООН взяли на себя добровольные обязательства разработать научно-обоснованные критерии и положения по устойчивому развитию лесов. В соответствии с этими обязательствами ряд стран, основываясь на общности географического положения и типов лесов, объединились по группам в так называемые международные «процессы» по разработке критериев и положений устойчивого лесопользования (Sustainable Forest Management – SFM). Например, в Монреальском процессе по лесам таежной и умеренной зон участвуют 12 стран мира, в том числе Россия, Канада, США, Япония и другие страны.

В Европе на уровне министров были проведены пять конференций (The Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe): в 1990 г. в Страсбурге (Франция), в 1993 г. в Хельсинки (Финляндия), в 1998 г. в Лиссабоне (Португалия), в 2003 в Вене (Австрия), в 2007 в Варшаве (Польша) [24, 25].

По инициативе Франции и Финляндии первая конференция на уровне министров по защите лесов в Европе (MCPFE) была проведена в Страсбурге в 1990 г. В конференции приняли участие 30 европейских стран, а также целый ряд межправительственных организаций в качестве наблюдателей. Исходя из необходимости трансграничной защиты лесов в Европе, участники приняли шесть резолюций. Эти Страсбургские резолюции заострили внимание в первую очередь на техническом и научно-исследовательском сотрудничестве с целью предоставления необходимых данных для принятия общих мер для лесов Европы.

На конференции по охране лесов в Хельсинки (Хельсинский процесс) страны-участники приняли ряд конкретных обязательств относительно принципов устойчивого управления лесопользованием в Европе (резолюция Н-1) и принципов сохранения

биологического разнообразия лесов в Европе (резолюция Н-2). В резолюции Н-1 устойчивое лесопользование определено как «управление лесами и лесными угодьями и их использование такими способами и в таких масштабах, которые обеспечивают сохранность их биологического разнообразия, продуктивности, способности к воспроизводству, жизнеспособности и потенциала выполнять в настоящем и в будущем соответствующие экологические, экономические и социальные функции на местном, национальном и глобальном уровнях и которые не наносят ущерба другим экосистемам».

На конференции в Лиссабоне в 1998 г. руководители лесных ведомств Европы рассмотрели выполнение обязательств, взятых в Хельсинки в 1993 г., и официально утвердили общеевропейские критерии и индикаторы устойчивого лесопользования.

Сорок европейских стран и Европейское сообщество подписали Венскую декларацию «Леса Европы – всеобщее благо, всеобщие обязанности» и приняли пять Венских обязательств. Венская декларация освещает разнообразные роли, которые играют леса в жизни как сельской местности, так и городского населения, затрагивает важность связей между организациями, отвечающими за состояние лесов и других экономических секторов, и подчеркивает значимость глобального подхода в этих вопросах. Венская декларация сосредоточена на сотрудничестве между различными хозяйственными секторами и национальными программами по поддержанию лесов, на экономической жизнеспособности долгосрочных лесных проектов, на социально-культурных вопросах, на разнообразии лесной флоры и фауны и на влиянии лесов на изменение климата. Кроме того, министры, ответственные за леса, одобрили проект о сотрудничестве между Советом министров по охране лесов Европы (СМОЛЕ) и Европейской/Общеевропейской Стратегии поощрения разнообразия ландшафта, которая также была принята министрами по защите окружающей среды на Пятой конференции министров «Окружающая Среда в Европе» (Май 2003 г.).

На конференции в Варшаве в 2007 г. министры и другие высокопоставленные представители 46 европейских стран, в том числе стран-участниц Европейского сообщества, утвердили Варшавскую декларацию и две Варшавские резолюции: «Леса, дерево и энергия» и «Леса и вода».

Всего, по данным ФАО (Food and Agriculture Organization), в мире известны девять региональных процессов (инициатив), в составе которых более 150 государств-членов, устанавливающих основные направления для дальнейшего развития устойчивого лесопользования [24]. Характерной особенностью этих процессов является рекомендательный характер всех разрабатываемых документов (т. е. необязательность следования им в практической деятельности органов лесного хозяйства государства-участника). Разрабатываемые межправительственными группами «критерии и индикаторы устойчивого управления лесами» лишь позволяют отслеживать крупномасштабные изменения, происходящие в лесном фонде стран-участниц этих групп, но не обеспечивают каких-либо принципов и стандартов устойчивого управления лесами и лесопользования.

Для крупных мировых экспортеров и импортеров древесной продукции более актуальной становится система добровольной лесной сертификации на неправительственном уровне. Независимая сертификация стимулирует заинтересованность участников в ответственном управлении [26]. В условиях рыночной экономики сертификат подтверждает устойчивое управление лесами с соблюдением всех законов, норм и правил, установленных определенным стандартом, а также позволяет лесопромышленникам и органам лесного хозяйства оценить уровень собственной работы и сообщить об этом потребителям через товарный знак.

Процесс добровольной лесной сертификации, как правило, включает научно-обоснованные принципы к неистощительному ведению лесного хозяйства, предусматривающему сохранение биоразнообразия, защиту дикой жизни; рациональному использованию лесных ресурсов и лесных площадей для удовлетворения социальных, экономических, экологических, культурных и духовных потребностей нынешнего и будущих поколений.

Предприятия, организации, учреждения, изъявившие желание сертифицироваться, принимают на себя обязательства следовать этим принципам. Оценка деятельности дается аудитором аккредитованной международной организации.

В настоящее время в мире действуют более 50 программ и организаций добровольной лесной сертификации, самыми крупными являются:

- Канадская ассоциация стандартизации (Canada's National Sustainable Forest Management Standard (CSA));
- Лесной попечительский совет (Forest Stewardship Council (FSC));
- Инициатива по устойчивому лесопользованию (Sustainable Forestry Initiative (SFI));
- Программа поддержки сертификации лесов, или Панъевропейская программа лесной сертификации (Program for the Endorsement of Forest Certification schemes или Pan-European Forest Certification (PEFC) [25].

Хотя первоначальной целью лесной сертификации являлась остановка уничтожения тропических лесов, наибольшее развитие сертификация приобрела в развитых «лесных» странах, таких, как Северная Америка, Канада, Россия. В Российской Федерации наибольшее распространение получили системы добровольной лесной сертификации на принципах FSC- и PEFC сертификации.

Лесной попечительский совет (FSC) – это неправительственная некоммерческая международная организация, в состав которой входит свыше 130 членов из 33 стран. FSC состоит из представителей природоохранных организаций, лесоводов, лесопромышленников, экономистов, общественных организаций, учреждений, защищающих интересы коренного населения, сертифицирующих организаций. Цель FSC – содействие становлению независимой лесной сертификации, обеспечение экологически грамотного, социально и экономически выгодного управления лесами во всём мире, а также обучение и маркетинг. Добровольная сертификация производится только при желании и готовности владельца леса (лесозаготовителя) удостоверить уровень ведения лесного хозяйства (переработки). Сертифицируются ведение лесного хозяйства и продукция лесозаготовки и переработки, а также недревесные продукты [26].

Панъевропейская система лесной сертификации (PEFC) – программа, которая основывается на 7 критериях устойчивого лесопользования, дополняющихся 27 количественными и описательными индикаторами на национальном уровне. Каждая страна имеет возможность вести их дальнейшую разработку. Цель системы – обеспечить взаимное признание национальных и региональных сертификационных систем за счет минимальных общих требований и единого логотипа для лесопродукции. В настоящее время в странах, входящих в Панъевропейскую систему лесной сертификации, сертифицировано около

46,1 млн. га лесных земель. В рамках этой программы разработана система добровольной сертификации лесопользования в России (РССЛ), при разработке которой учтены требования, предъявляемые советом РЕФС к национальным системам лесной сертификации.

Предполагается, что в России к 2020 г. сертификаты будут иметь вся древесина и изделия из нее, как поступающие на экспорт, так и закупаемые для удовлетворения нужд Российской Федерации, что явится одним из основополагающих условий укрепления экономического, экологического и социально-культурного компонентов устойчивого развития лесов России [27, 28].

В последние десятилетия в качестве своеобразных путеводителей в мировом лесном хозяйстве служат ежегодные обзоры состояния лесного сектора, отчеты о результатах глобальной инвентаризации лесов, выпускаемые специалистами ООН каждые 5 лет, каждые два года дается «Обзор состояния лесов мира» (State of the World Forests, SOFO). Последний обзор состояния лесов опубликован в 2009 г. В обзорах даются соответствующие прогнозы на краткосрочные и отдаленные периоды до 2020, 2030 и 2040 гг. С учетом предполагаемых изменений и прошлых тенденций специалисты ООН прогнозируют повсеместное возрастание экологической и социально-экономической роли лесов: в сохранении биоразнообразия, в повышении влияния на изменение климата, в защите от опустынивания и деградации земель, в повышении водосборных функций леса [29].

Литература

1. Писаренко А.И., Страхов В.В. О Лесном кодексе в эпоху модернизации страны // Лесное хозяйство. 2010. № 2. С. 2–6.
2. Дубовик О.Л. Экологическое право. М.: Проспект, 2010. 720 с.
3. Шутов И.В. Почему оказалось забытым лесное хозяйство // Лесное хозяйство. 2010. № 2. С. 14–15.
4. Алексеев В.А., Марков М.В. Статистические данные о лесном фонде и изменение продуктивности лесов России во второй половине XX века. СПб. 2003. С. 22.
5. Лесной фонд России. Справочник. М. 2003. С. 13–15.
6. Энциклопедия лесного хозяйства: в 2-х томах / Под ред. С.А. Родина. Т 1. М.: Изд-во ВНИИЛМ, 2006. 371 с.
7. Клейнхоф И.А. Системный подход к реформированию управления лесами и лесным хозяйством // Лесное хозяйство. 2008. № 6. С. 10–12.
8. Тепляков В. К. Лес в истории допетровской Руси. М. 1992. 80 с.
9. Редько Г. И., Редько Н. Г. История лесного хозяйства России. Пушкино. 2004. 456 с.
10. Орлов М.М. Лесоустройство. М. 2006. 319 с.
11. Писаренко А.И., Страхов В.В. Леса и вода – единая основа устойчивого развития // Лесное хозяйство. 2009. № 1. С. 5–7.
12. Трейфельд Р.Ф. Вклад лесоустройства в реализацию международных обязательств России по проблеме глобального потепления климата // Лесное хозяйство. 2007. № 3. С. 7–8.
13. Федеральная целевая программа «Экология и природные ресурсы России (2002–2010 гг.)», подпрограмма «Леса», утв. Постановлением Правительства РФ от 7 декабря 2001 года // СЗ РФ. 2001. № 52 (ч. II). С. 4973.
14. Сборник нормативных правовых актов в области использования, охраны, защиты лесного фонда и воспроизводства лесов (по состоянию на 1 июля 2002 г.). М. 2002. 640 с.
15. Экологическая доктрина Российской Федерации // Распоряжение Председателя Правительства Российской Федерации «Об одобрении Экологической доктрины Российской Федерации» от 31.09.2002 г. № 1225-р.
16. Лесной кодекс Российской Федерации от 4 декабря 2006 г. № 200-ФЗ. О введении в действие Лесного кодекса Российской Федерации от 4 декабря 2006 г. № 201-ФЗ // Российская газета. 8 декабря 2006 г.
17. Резолюция Генеральной Ассамблеи ООН от 20.12.2006. № 61/193.
18. Международное публичное право / Под ред. К.А. Бекяшева. М.: Проспект, 2007. 81 с.
19. Шумилов В.М. Международное право. М.: ВЕЛБИ, 2007. С. 64.
20. Пуряева А.Ю., Пуряев С.А. Лесное право. М.: Деловой двор, 2009. 408 с.
21. Экологическое право / Под ред. Т.С. Бакунина, Г.Е. Быстров, Г.В. Вышханова и др. М.: Проспект, 2008. 656 с.
22. <http://www.un.org/russian/document/declarat/forest.htm>.
23. Резолюция Генеральной Ассамблеи ООН от 31.01.2008. № 62/98.
24. OECD Foresight Forum, Next Generation Networks: Evolution and Policy Considerations. Draft Summary Report. Budapest. 2006. 17 p.
25. Gane Michael Forest Strategy: Strategic Management and Sustainable Development for the Forest Sector. Springer. 2007. 414p.
26. Рябников В. Добровольная лесная сертификация // Живой лес. № 1 (10) 2010. С. 96–97.
27. Моисеев Н.А. Лесная экономика: проблемы и решения // Лесное хозяйство. 2010. № 2. С. 7–11.
28. Савинов А.И. Государственное лесное планирование и лесной план субъекта Российской Федерации // Лесное хозяйство. 2009. № 1. С. 2–4.
29. Писаренко А.И. Мировое лесное хозяйство с точки зрения интересов России // Лесное хозяйство. 2010. № 3. С. 2–6.

Температурные адаптации мицелиальных бактерий почв тундры и тайги

© 2010. Г. М. Зенова, д.б.н., профессор, Н. А. Манучарова, к.б.н., доцент, М. С. Дуброва, студентка, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, e-mail: zenova38@mail.ru

Показано, что в почвах Полярного и Бореального географических поясов развиваются почвенные психротолерантные актиномицеты. Численность психротолерантных мицелиальных прокариот составляет в почвах северных регионов тысячи и сотни тысяч КОЕ/г субстрата, мицелий достигает длины 380 м/г почвы. Методом гибридизации *in situ* (метод FISH – fluorescent *in situ* hybridization) показано, что физиологически активные психротолерантные представители филогенетической группы *Actinobacteria* составляют до 30% от общего числа бактерий в прокариотных микробных сообществах почв и подстилок, доля метаболически активных мицелиальных актинобактерий превышает долю одноклеточных актинобактерий. Установлена ксерофильность психротолерантной культуры *Streptomyces aburaviensis*, выделенной из глее-слабоподзолистой почвы. Психротолерантные актиномицеты проявляют пектинолитическую, амилитическую, а также антагонистическую активности при низкой температуре (5°C).

The article shows that soil psycho-tolerant actinomycetes develop in the soils of Polar and Boreal geographical zone. In the soil of northern regions the number of psycho-tolerant filamentous prokaryotes is thousands and hundreds of thousands CFU/g of substrate, mycelium length reaches 380 m/g of soil. By the method of hybridization *in situ* (method FISH – fluorescent *in situ* hybridization) it was shown that physiologically active psycho-tolerant representatives of the phylogenetic group *Actinobacteria* account for up to 30% of the total number of bacteria in prokaryote microbe communities of soils and mats, the amount of metabolically active mycelium actinobacteria is larger than the amount of unicellular actinobacteria. Xerophilous quality of the psycho-tolerant culture *Streptomyces aburaviensis* was stated, this culture was isolated from weakly-podzolic grey soil. Psycho-tolerant actinomycetes demonstrate pektinolytic, amyolytic, and antagonistic activity at low temperatures.

Ключевые слова: адаптация, психротолерантность, актиномицеты, длина мицелия, прокариотные микробные сообщества

Key words: adaptation, psycho-tolerance, actinomycetes, mycelium length, prokaryote microbe communities

Введение

Мицелиальные бактерии имеют множественные приспособления для жизни в почве. Эти приспособления связаны с особенностью развития актиномицетов – апикальным ростом, множественными типами спорообразования, наличием воздушных гиф, позволяющим гифам проникать через границу раздела фаз в воздушную среду. Преимущества, которые создают актиномицетам перечисленные особенности развития, позволяют мицелиальным бактериям успешно колонизировать новые пространства в условиях, делающих излишней активную подвижность клеток. Исследования актиномицетов, адаптированных к существованию в холодных почвах, позволяют не только расширить пределы наших представлений об экологических нишах, занимаемых мицелиальными бактериями, но и выявить среди холодостойких видов продуценты новых биологически активных веществ.

Минимальная, максимальная и оптимальная температуры (основные температурные точки) значительно варьируют среди прокариот. По отношению к температуре их условно делят на три группы – мезофилы, термофилы и психрофилы. У мезофилов, к которым относится большая часть бактерий, оптимальная для роста температура лежит в интервале между 20 и 42°C. Среди этих организмов имеются термотолерантные виды, способные выживать при температуре до 50°C. Оптимальная температура для роста психрофильных бактерий не превышает 20°C. Они обитают в морской воде и в полярных областях земного шара. Строгие психрофилы растут при 0°C и отрицательных температурах, не растут при 28°C. Психротолерантные бактерии растут при 0°C, плохо растут при 37°C, имеют оптимум роста от 10 до 28°C [1].

Температурные границы роста психрофильных бактерий в почве шире по сравнению с температурными границами роста

этих бактерий в субстратах с постоянно низкими температурами, например, на дне моря. Долгое время считалось, что мицелиальные бактерии с трудом адаптируются к низким температурам и среди них нет представителей, способных жить при 0°C [2, 3]. В последнее десятилетие появились сообщения о выделении психрофильных и психротолерантных актиномицетов из наземных и водных экосистем [1, 4 – 12].

Многочисленные психрофильные представители филогенетической группы *Actinobacteria* являются продуцентами холодоактивных галактозидаз и других ферментов, а также антибиотиков криомицина, азаломицина и др. [4, 13, 14].

Целью настоящей работы было установление закономерностей распространения и оценка таксономической и функциональной структуры комплексов психротолерантных актиномицетов почв тундры и тайги.

Материалы и методы

Объектами исследования служили почвы Полярного и Бореального географических

поясов (табл.). Тундровые почвы – торфяно-криозём типичный (п-ов Ямал) и криозём грубогумусный глееватый (близь города Воркуты), а также почва северной тайги глее-слабоподзолистая (в районе г. Надыма) являются холодными, промерзающими, на глубине 10 см в них отмечены отрицательные среднегодовые температуры. Следующие почвы северной тайги – подзолы, гипсовые петроземы, серогумусовые турбированные (Чугский заказник, Архангельская обл.), пелозёмы гумусовые глеевые (Пинежский заповедник, Архангельская обл.), подзолы железистые (Соловецкие о-ва, Архангельская обл.) характеризуются положительными среднегодовыми температурами (4–8°C). Для сравнения использовали торфяную олиготрофную почву (южная тайга, Тверская обл.).

Для выделения и учёта актиномицетов в исследуемых почвах использовали традиционный метод посева на питательную среду Гаузе 1. Учитывая температурные границы и оптимум роста исследуемых мезофильных и психротолерантных актиномицетов, чашки с посевами инкубировали при температурах 5, 20 и 28°C.

Таблица

Характеристика исследуемых образцов

Название почвы, профиль или глубина взятия образца (см)	Район взятия образца	Среднегодовая температура почвы на глубине 20 см	Сумма активных температур почвы выше 10°C на глубине 20 см
Торфяно-криозем типичный ТО-Т1-ВСg	типичная тундра Центральный Ямал	от -12 до -8	400°
Криозём грубогумусный глееватый ТО-Т1-А-ВG	мохово-лишайниково-кустарничковая тундра в районе г. Воркуты	от -8 до -4	400–1200°
Глее-слабоподзолистая Ad-АЕ-Еg-Вg,t,f,h,al (0-10)	Северная тайга Надымский район Ямало-Ненецкого автономного округа окрестности г. Надыма	от -8 до -4	400–1200°
Подзолы, гипсовые петроземы, серогумусовые турбированные (0-5)	Северная тайга Чугский заповедник Архангельская обл.	от 4 до 8	1200–2000°
Пелозёмы гумусовые глеевые (0-5)	Северная тайга Пинежский заповедник Архангельская обл.	от 0 до 8	нет данных
Подзол иллювиально-железистый (лесные подстилки)	Северная тайга Большой Соловецкий остров	от 4 до 8	1200–2000°
Торфяная олиготрофная ТО-ТТ (0-10)	Южная тайга Западнодвинский р-н Тверской обл.	от 4 до 8	1200–2000°

В лабораторных микрокосмах изучали динамику развития мицелия актиномицетов в ходе инициированной микробной сукцессии [16]. Использовали органогенные горизонты олиготрофной торфяной и глее-слабоподзолистой почвы, а также лесные подстилки подзолов железистых. Подготовку почвы и растительных субстратов и инициацию микробной сукцессии увлажнением проводили согласно традиционно используемой методике [16]. Инкубирование почвы и растительных субстратов, а также посевов из почвенных и растительных суспензий проводили в термостатах при температурах 5, 20°C. Посевы из исследуемых образцов производили на 1, 3, 7, 14, 21, 28-е сутки после инициации сукцессии. Длину мицелия актиномицетов в почве определяли с помощью люминесцентного микроскопа. Для окрашивания мицелия использовали водный раствор акридина оранжевого (разведение 1:10000; 2–4 мин). Длину мицелия вычисляли по формуле:

$$M = 4 \text{ an} \times 10^{10} / \rho,$$

где M – длина мицелия в 1 г почвы (м); a – средняя длина мицелия в поле зрения; p – площадь поля зрения (мкм²); n – показатель разведения. При расчете биомассы принимали, что 1 м сухого актиномицетного мицелия диаметром 0,5 мкм имеет биомассу $3,9 \times 10^{-8}$ г [15].

Молекулярный метод гибридизации *in situ* (метод FISH – fluorescent *in situ* hybridization) использовали для оценки биомассы метаболически активных клеток бактерий. Гибридизацию препаратов с флуоресцентно-мечеными зондами проводили в соответствии с методикой [16]. Для гибридизации использовали набор рРНК-специфичных олигонуклеотидных меченных флуоресцентным красителем СуЗ зондов, разработанных для детекции представителей различных филогенетических групп домена Bacteria. Условия гибридизации различаются в зависимости от используемого зонда [17, 18].

Предварительную идентификацию изолированных из исследуемых почв актиномицетов проводили согласно определителям [19, 20] по следующим морфологическим и хемотаксономическим признакам: наличие/отсутствие фрагментации мицелия, образование одиночных или цепочек спор на воздушном и/или субстратном мицелии; присутствие в гидролизатах целых клеток LL- или

мезо-изомера диаминопимелиновой кислоты (ДАПК) и дифференцирующих сахаров ксилы, арабинозы, галактозы.

Филогенетическое положение выделенных психрофильных актиномицетов (шт. 5-4-1 и мох 18) определяли на основании секвенирования гена 16S рРНК. Выделение ДНК из бактериальной биомассы проводили с использованием набора реактивов Wizard Genomic DNA Purification Kit, технологии Promega, США, согласно рекомендациям производителя, с незначительными модификациями [21]. Для проведения полимеразной цепной реакции и дальнейшего секвенирования ПЦР-фрагментов гена 16S рРНК использовали универсальную праймерную систему [22, 23]. Получение полноразмерной копии гена проводили на приборе Mastercycler personal («Eppendorf» 11F, Германия) с использованием праймеров: 11F 5`-AGAGTTTGATCMTGGCTCAG-3` 1492R 5`-TACGGYTACCTTGTTACGACTT-3`, где M = C или A, Y = C или T.

Объем амплификационной смеси составлял 50 мкл и имел следующий состав: 1x буфер ДНК полимеразы BioTaq (17 mM (NH₄)₂SO₄, 67 mM трис-HCl, pH 8.8, 2 mM MgCl₂); 12.5 нмоль каждого из dNTP, 50 нг ДНК-матрицы; 5 пмоль соответствующих праймеров (11F и 1492R). 3 ед. ДНК полимеразы BioTaq (Диалат ЛТД, Россия).

Температурно-временной профиль ПЦР был следующим: первый цикл – 94°Cx9 мин, 55°Cx1 мин, 72°Cx2 мин; последующие 30 циклов – 94°Cx1 мин, 55°Cx1 мин, 72°Cx2 мин; завершающий цикл – 72°Cx7 мин.

Первичный анализ сходства нуклеотидных последовательностей гена 16S рРНК изучаемого штамма был проведен с помощью программы BLAST. Построение бескорневых филогенетических деревьев исследуемых актиномицетов производили с помощью методов, реализованных в пакете программ MEGA.

Оптимальные и ограничительные для роста культур стрептомицетов температуры определяли по величине радиальной скорости роста колоний на плотной питательной среде Гаузе 1 при температурах 5, 8, 10, 15, 20, 28 и 37°C. Расчет радиальной скорости роста колоний проводили по формуле: $Kr = (d2 - d1) / (t2 - t1)$, где d1 и d2 – диаметр колонии (мм) в начальный и конечный моменты измерения соответственно; t1 и t2 – время (сут) начального и конечного измерения. Измерения проводили в 20-кратной повторности.

Зависимость радиальной скорости роста колоний стрептомицета от влажности и температуры культивирования определяли в следующем опыте. Готовили агаризованную глицерин-нитратную среду с различным осмотическим давлением влаги, которое создавали в среде определённой концентрацией глицерина. Предварительно строили кривую зависимости осмотического давления от концентрации глицерина в среде [24]. Использовали следующие значения осмотического давления влаги: (ОВ 67%, a_w 0,67) – 60% водный раствор глицерина; (ОВ 86%, a_w 0,86) – 40% водный раствор глицерина; (ОВ 98%, a_w 0,98) – 3% водный раствор глицерина.

Для определения пектинолитической активности психротолерантных актиномицетов использовали 2%-ый водный раствор гексадецилтриметиламмония бромид (цетавлон) [15]. Амилолитическую активность психротолерантных актиномицетов определяли с раствором йода [15]. Для выявления

антибактериальной активности психротолерантных актиномицетов использовали метод блоков [15].

Результаты и обсуждение

При инкубировании посевов при 5°C психротолерантные актиномицеты выявляются не во всех горизонтах тундровых почв, чаще – из нижних. Численность психротолерантных актиномицетов, выделяемых на плотной питательной среде при инкубировании посевов при 20°C, сопоставима с количеством мезофильных форм, выделяемых при 28°C, – тысячи и десятки тысяч КОЕ/г субстрата (рис. 1). Психротолерантные актиномицеты составляют приблизительно половину актиномицетного комплекса тундровых почв.

В подзолах и гипсовых петрозёмах на территории Чугского заказника Архангельской области количество психротолерантных мицелиальных бактерий также сопоставимо

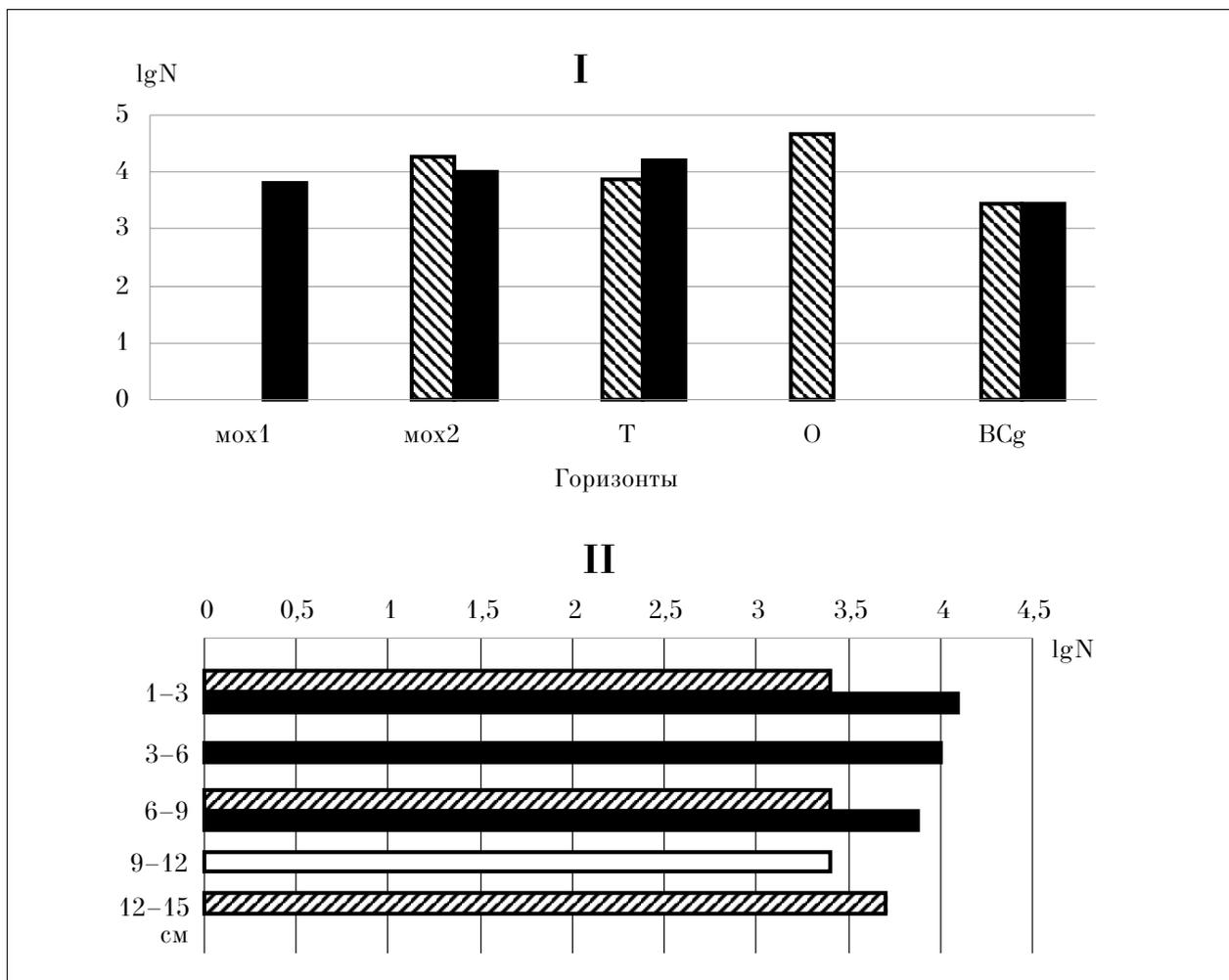


Рис. 1. Численность психротолерантных актиномицетов, выделенных из торфяно-криозёма типичного (I) и криозёма грубогумусного глееватого (II) при 5°C (белые столбики) и 20°C (заштрихованные столбики), и мезофильных актиномицетов, выделенных из этих почв при 28°C (чёрные столбики)

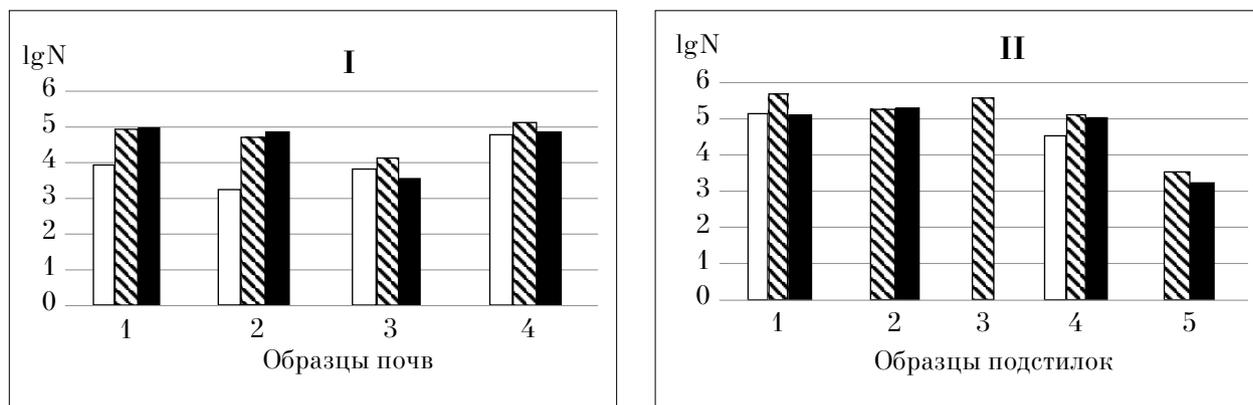


Рис. 2. Численность психротолерантных и мезофильных актиномицетов, выделенных при разных температурах из пелозёмов гумусовых глееватых (I) и лесных подстилок подзолов иллювиально-железистых (II). Обозначения см. рис. 1

с количеством мезофильных форм (тысячи и десятки тысяч КОЕ/г субстрата).

Особое место среди актиномицетных комплексов исследуемых территорий занимают комплексы мицелиальных бактерий пелозёмов гумусовых глееватых на территории Пинежского заповедника Архангельской области. Эти почвы расположены в карстовом ландшафте, где за счёт перепадов рельефа образуются крупные замкнутые понижения, в которых после зимы застаивается холодный воздух и не тает снег под затенёнными склонами. Важным фактором формирования здесь низких температур является поток холодного воздуха из трещин, связанных с карстовыми пещерами. В результате температура почвы на дне карстовой воронки на глубине 10 см не

превышает 4°С в летний период. Почвенный профиль пелозёма имеет мощность 3–5 см и состоит из верхнего горизонта подстилки, гумусового горизонта и нижнего оглеенного горизонта.

Низкие температуры этих почв способствуют развитию в них психротолерантных актиномицетов в количествах тысяч и сотен тысяч КОЕ/г субстрата (рис. 2, I). Доля этих актиномицетов в комплексе превышает долю мезофильных форм.

Значительное количество (сотни тысяч КОЕ/г субстрата) психротолерантных форм, часто превышающее количество мезофильных, выявлено в лесных подстилках подзолов железистых Большого Соловецкого острова (рис. 2, II). Психротолерантные актиномицеты

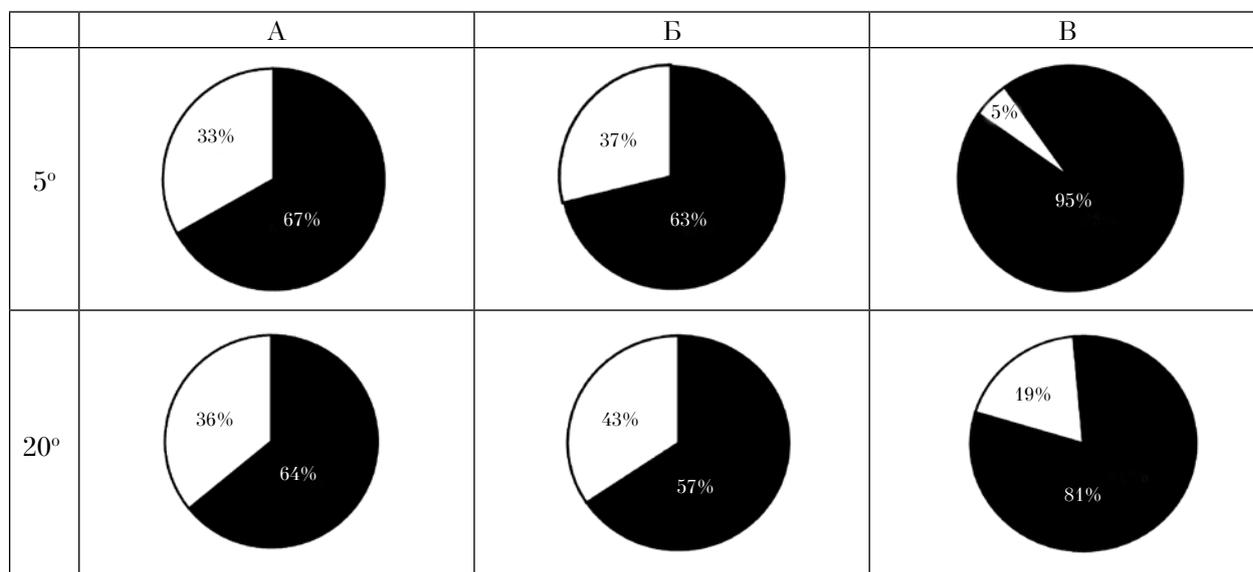


Рис. 3. Соотношение биомасс метаболически активных мицелиальных (чёрные сегменты) и одноклеточных (белые сегменты) представителей филогенетической группы *Actinobacteria* в прокариотном микробном сообществе органогенных горизонтов исследуемых почв; А – глее-слабоподзолистой почвы, Б – торфяной олиготрофной, В – лесных подстилок подзолов иллювиально-железистых

составляют значительную часть актиномицетного комплекса (а иногда и целиком комплекс) в лесных подстилках этих почв.

Для наблюдения за динамикой длины актиномицетного мицелия нами были выбраны две контрастные по температурным условиям почвы: глее-слабоподзолистая с отрицательными среднегодовыми температурами и олиготрофная торфяная с положительными температурами, не превышающими 10°C. При инкубировании посевов при 5°C психротолерантные актиномицеты в торфяной олиготрофной почве обнаружены не были, тогда как в глее-слабоподзолистой почве их численность достигала сотен тысяч КОЕ/г. Численность психротолерантных форм, выделяемых при 20 °С, оказалась на порядок выше в подзолистой почве по сравнению с торфяной олиготрофной почвой.

Люминесцентно-микроскопические исследования показали, что в ходе микробной сукцессии, инициированной увлажнением почвы и инкубированием её при 5 или 20°C, мицелий актиномицетов растёт и развивается. В торфяной почве при 5°C прирост мицелия психротолерантных актиномицетов в ходе сукцессии оказался менее значительным (до 140 м/г) по сравнению с приростом мицелия в подзолистой почве (до 380 м/г).

Исследование прокариотного микробного сообщества органогенных горизонтов олиготрофной торфяной и глее-слабоподзолистой почв, а также кедровой подстилки подзола методом гибридизации *in situ* с помощью 16S рРНК специфичных олигонуклеотидных зондов, определяющих представителей филогенетической группы *Actinobacteria*, показало, что метаболически активные представители этой группы составляют приблизительно третью часть от всех бактерий прокариотных микробных сообществ органогенных горизонтов исследуемых почв. В филогенетической группе *Actinobacteria* микробного прокариотного сообщества исследуемых почв метаболически активные мицелиальные актинобактерии составляют большую долю по сравнению с одноклеточными, что особенно заметно в подстилке кедрового леса на подзоле железистом (рис. 3).

В результате проведённых исследований выделены культуры актиномицетов. По фенотипическим признакам установлено таксономическое положение выделенных штаммов. Все они отнесены к разным видам рода *Streptomyces*. Для штаммов 5-4-1 и мох 18 проведено определение фенотипических признаков и секвенирование генов 16S рРНК и

показано сходство штамма 5-4-1 с *Streptomyces beijiagensis*, новым видом психротолерантного стрептомицета, выделенного из почв Китая [6], а штамма мох 18 – со *Streptomyces parvus* (рис. 4).

С использованием расчёта радиальной скорости роста колоний стрептомицетов установлены температурные границы их роста. Выявлено, что температурный диапазон роста стрептомицетов, выделенных из почв при 5, 20 и 28°C, различен. Мезофильный стрептомицет *Streptomyces tenebrarius* шт. 3 А, выделенный при 28°C, растёт в диапазоне температур от 12 до 45°C, оптимум роста отмечен при 28°C. Психротолерантные стрептомицеты *S. wedmorensis* шт. Н-5-2, *S. xanthochromogenes* шт. Н-5-1; *S. helveticus* шт. 8-5-3, шт. 8-5-2, *S. aburaviensis* шт. Н-5-6, *S. caeruleus* шт. Н-5-4, выделенные при 5 или 20°C, растут в диапазоне температур от 5 до 37°C. Максимальная величина радиальной скорости роста колоний отмечена при 20°C. *Streptomyces beijiagensis* шт. 5-4-1 и *S. aburaviensis* шт. Н-5-6, выделенные при 50°C из почвы, имеют диапазон роста от 2 до 28°C. Оптимум роста отмечен у этих культур при 50°C. По классификации психрофильных актиномицетов [1] их можно отнести к умеренным психрофильным стрептомицетам.

Выявлена зависимость роста психротолерантного стрептомицета *S. aburaviensis* шт. Н-5-6 от двух экологических факторов – температуры и влажности. Показано, что каждому уровню влажности и температуры соответствует определённая специфика развития стрептомицета. Психротолерантный стрептомицет растёт на среде при ОВ 98% (aw 0,98) при температурах 20 и 28°C и проходит полный цикл развития от споры до образования колоний с субстратным воздушным мицелием и цепочками спор. При 5°C в условиях ОВ 98% отмечено образование субстратного мицелия, воздушный мицелий и споры не образуются. При ОВ 86% (aw 0,86) культура растёт при 28, 20 и 5°C, однако не проходит полного цикла развития. Споры прорастают, образуя лишь субстратный мицелий без воздушного мицелия и спор. При экстремально низком уровне влаги (aw 0,67) видимого роста колоний актиномицета не наблюдается. Можно заключить, что исследуемый стрептомицет *S. aburaviensis* является психротолерантным и ксеротолерантным.

При низких температурах выделенные из холодных почв актиномицеты проявляют антагонизм к грамотрицательным бактериям

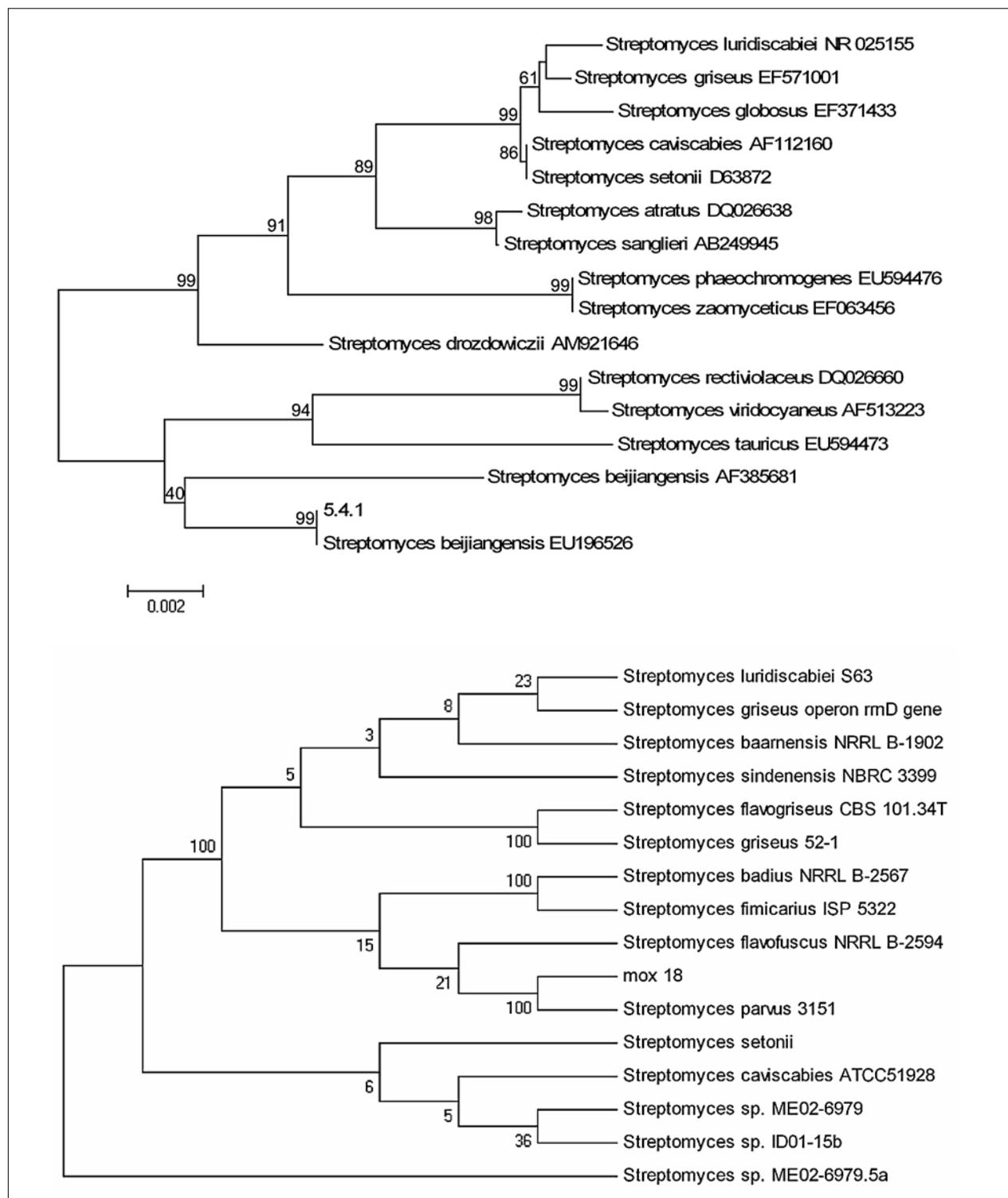


Рис. 4. Филогенетическое положение актиномицетов шт. 5-4-1; шт. мох 18, выделенных из почв тундры и северной тайги

родов *Aquaspirillum*, *Bacteroides*, грибам родов *Fusarium*, *Penicillium* и грибам *Mucor riemalis*, *Cladosporium herbarum*; у психротолерантных актиномицетов отмечена пектинолитическая и амилолитическая активность.

Таким образом, наши исследования показали, что в северных почвах с низкими

температурами, не превышающими 10°C даже в поверхностных слоях в летнее время года, активно растут и развиваются физиологически активные почвенные психротолерантные актиномицеты, образуют мицелий и составляют неотъемлемую часть гидролитического микробного блока, принимающего участие в

деградации растительных остатков. Очевидно, температурная адаптация мицелиальных бактерий (актиномицетов) к почвенной среде способствует сохранению биологического разнообразия в почвах северных регионов.

Литература

1. Jiang C., Xu L. Actinomycete diversity in unusual habitats // *Actinomycetes*. 1993. V. 4. № 2. P. 47–57.
2. Williams S.T., Vickers T.C. Actinomycetes in environment // *Biology of Actinomycetes* / Eds. Y. Okami et al. Tokio. 1988. P. 265–270.
3. Калакуцкий Л.В., Агре Н.С. Развитие актиномицетов. М.: Наука, 1977. 287 с.
4. Gesheva V. Distribution of psychrophilic microorganisms in soil of Terra Nova Bay and Edmonson Point, Victoria Land and their biosynthetic capabilities // *Polar Biol*. 2009. V. 32. P. 1287–1291.
5. Hakvag S., Fjervik E., Josefsen K.D., Ian E., Ellingsen T.E., Zotchev S.B. Characterization of *Streptomyces* spp. isolated from the Sea Surface Microlayer in the Trondheim Fjord, Norway // *Mar Drugs* 2008. V. 6 (4). P. 620–635.
6. Li W.-J., Zhang L.-P., Xu P., Cui X.-L., Lu Z.-T., Xu L.-H., Jiang C.-L. *Streptomyces beijiangensis* sp. nov., a psychrotolerant actinomycete isolated from soil in China // *Inter. J. System. Evolution. Microbiol*. 2002. V. 52. P. 1695–1699.
7. Sheridan P.P., Loveland-Curtze J., Miteva V.I., Brenchley J.E. *Rhodoglobov vestalii* gen. nov., sp. nov., a novel psychrophilic organism isolated from an Antarctic Dry Valley lake // *Inter. J. System. Evol. Microbiol*. 2003. V. 53. P. 985–994.
8. Clocksin K.M., Jung D.O., Madigan M.T. Cold-active chemoorganotrophic bacteria from permanently ice-covered lake Hoare, Mc Murdo dry Valleys, Antarctica // *Appl. Environment. Microbiol*. 2007. P. 3077–3083.
9. Wang Q.L., Cao G.M., Jiang W.B., Zhang Y.S. Study on actinomycetes population of alpine meadow soil in Qinghai // *Wei Sheng Wu Xue Bao* 2004. V. 44. № 6. P. 733–736.
10. He J.Q., Wu Y.F., Zhang G.J. Activity and ecological distribution of actinomycetes from soil in the south-eastern of Tibet // *Wei Sheng Wu Xue Bao*. 2006. V. 46. № 5. P. 773–777.
11. Xu L., Li Q., Jiang C. Diversity of soil actinomycetes in Yunnan, China // *Appl. Nviron. Microbiol*. 1996. V. 62. № 1. P. 244–248.
12. Nichols D.S., Sanderson K., Buia A., Van de Kamp J., Hollway P., Bowman J.P., Smith M., Nichols M.C., Nichols P.D., McMeekin A. Dioprospecting and biotechnology in Antarctica // *The Antarctic: Past, Present and Future*. Antarctic CRC research Report. № 28. Hobart. 2002. P. 85–103.
13. Sheridan P.P., Brenchley J.E. Characterization of salt-tolerant family – galactosidase from a psychrophilic Antarctic *Planococcus* isolate // *Appl. Environ. Microbiol*. V. 66. P. 2438–2444.
14. Sheridan P.P., Lanasik N., Coombs J.M., Brenchley J.E. Approaches for deciphering the structural basis of low temperature enzyme activity // *Biochim. Biophys. Acta Prot. Struct. Molec. Enzymol*. 2000. № 1543. P. 417–433.
15. Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. 303 с.
16. Amann R.I., Ludwig W., Schleifer K.-H. Phylogenetic Identification and In Situ Detection of Individual Microbial Cells without Cultivation // *Microbiol. Rev*. 1995. V. 59. № 1. P. 143–169.
17. Amann R.I., Krunholz L., Stahl D.A. Fluorescent-oligonucleotide probing of whole cells for determinative, phylogenetic, and environmental studies in microbiology // *Bacteriol*. 1990. V. 172. P. 762–770.
18. Roller C., Wagner M., Amann R., Ludwig W., Schleifer K.-H. In situ probing of Gram-positive bacteria with high DNA G+C content using 23S rRNA-targeted oligonucleotides // *Microbiology*. 1994. V. 140. P. 2849–2858.
19. Определитель бактерий Берджи / Под ред. Дж. Хоулта, М. Крига, П. Смита, Дж. Стейли, С. Уилльямса. М.: Мир, 1997. 799 с.
20. Гаузе Г.Ф., Преображенская Т.П., Свешникова М.А., Терехова Л.П., Максимова Т.С. Определитель актиномицетов. М.: Наука, 1983. 245 с.
21. Манучарова Н.А. Молекулярно-биологические аспекты исследований в экологии и микробиологии. М.: Изд-во «Университет и школа», 2010. 47 с.
22. Edwards U., Rogall T., Bloeker H., Ende M.D., Boeettge E.C. Isolation and direct complete nucleotide determination of entire genes, characterization of gene coding for 16S ribosomal RNA // *Nucl. Acids Res*. 1989. V. 17. P. 7843–7853.
23. Lane D.J. 16S/23S rRNA sequencing // *Nucleic Acid Techniques in Bacterial systematic* / Eds. Stackebrandt E., Goodfellow M. Chichester. UK: John Wiley & Sons, 1991. P. 115–177.
24. Звягинцев Д.Г., Зенова Г.М., Судницын И.И., Дорошенко Е.А. Способность почвенных актиномицетов развиваться при экстремально низкой влажности // *Доклады Академии наук*. 2005. Т. 405. № 5. С. 702–704.

**Изменчивость количества семядолей у семян сосны обыкновенной
производственной и опытной заготовки на Северо-Востоке
Русской равнины**

© 2010. А. И. Видякин, д.б.н., в.н.с.,
Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,
e-mail: les@aiv.kirov.ru

Изучена изменчивость количества семядолей в выборках семян сосны обыкновенной производственной и опытной заготовки. Установлено, что частоты признака в сравниваемых выборках семян одинакового географического происхождения в большинстве случаев не различаются. Предложена методика использования среднего количества семядолей при изучении популяционно-хорологической структуры вида.

Changeability of the number of cotyledons of *Pinus sylvestris* L. seeds is considered in samples of production and experimental parties. It is stated that frequency characteristics in the samples compared are mostly similar if the samples are of the same geographical origin. The method of using a medium number of cotyledons while investigating population-chorologic structure of the species is offered.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, семена производственной
и опытной заготовки, семядоли, изменчивость

Key words: *Pinus sylvestris* L., seeds in production
and experimental parties, cotyledons, changeability

Введение

Известно, что значительная часть территории Русской равнины в плейстоцене была покрыта ледником [1 – 3]. Здесь обнаружены следы донского, окского, днепровского, московского оледенений. Они были разделены тёплыми межледниковыми эпохами. Последнее сильное похолодание, вызвавшее обширное материковое оледенение севера Европы было 18–22 тыс. лет назад. В области сплошного оледенения и на некотором расстоянии от неё, в так называемой перигляциальной зоне, лесов не было [4 – 7]. Древесная растительность в это время произрастала в ледниковых убежищах (рефугиумах), находящихся за пределами перигляциальной зоны в районах с относительно благоприятными условиями [1, 6, 8]. В каждом из них под влиянием специфики действия микроэволюционных факторов сформировалась определённая генетическая структура популяций. В голоцене в связи с потеплением климата одновременно из нескольких пространственно разобщённых центров происходила миграция древесной растительности в северные широты [3 – 9].

Поэтому современная популяционно-хорологическая структура древесных рас-

тений и сосны обыкновенной в частности должна отражать в себе как неоднородность генетической структуры популяций в прошлом, так и те эволюционно-генетические изменения, которые произошли в результате действия микроэволюционных процессов во время расселения видов и после занятия ими определённых ареалов. Данное положение подтверждено нами в процессе феногеографических исследований сосны обыкновенной на Северо-Востоке Русской равнины. Установлено, что популяционно-хорологическая структура вида представляет собой трёхуровневую иерархическую систему [10 – 13]. Первый уровень её включает локальные популяции, второй – группы популяций, третий – крупные ареальные подразделения, объединяющие группы популяций и, как правило, пересекающие несколько природных зон. Эти крупные ареальные подразделения были выделены на основании пространственной специфики и однородности значений частот комплекса генотипически детерминированных признаков, в том числе количества семядолей, которое является наиболее информативным маркером данного уровня структурной организации вида. Согласно нашей гипотезе [12], эти подразделения, названные миграционными комплексами, могут отражать пути расселе-

ния сосны обыкновенной в послеледниковое время.

Для проверки данной гипотезы, а также дальнейшего изучения популяционно-хорологической структуры вида и закономерностей её формирования необходимо установить границы миграционных комплексов. В наших предыдущих исследованиях достичь этого не удалось, так как границы этих ареальных подразделений выходили за пределы района исследований [12]. Установление их возможно при условии проведения феногеографических исследований на очень большой территории, включающей, например, всю Европейскую часть России и Урал. По нашим расчётам для этого необходимо будет определить количество семядолей примерно у 1,5 тысяч, популяционных выборок семян. С учётом существующей периодичности семяношения сосны обыкновенной, составляющей 4–5 лет, а на северном пределе распространения вида – 8–10 лет, для заготовки такого количества выборок потребуется несколько десятилетий. Поэтому необходим поиск новых методических подходов, существенно снижающих продолжительность периода сбора семян.

Одним из возможных вариантов решения этой проблемы может являться использование семян производственного сбора. Их можно взять на лесосеменных станциях из оставшейся неиспользованной при определении посевных качеств семян части средних образцов, которые в соответствии с существующими требованиями отбираются от каждой заготавливаемой в лесничествах партии семян [14]. В зависимости от величины обслуживаемой территории, а также долевого участия сосны обыкновенной в структуре лесного фонда в урожайный год на лесосеменную станцию может поступать до 100–150 средних образцов семян. В настоящее время в Европейской части России и на Урале имеется 34 лесосеменных станции. Таким образом, необходимое для анализа количество образцов семян с данной территории страны может быть получено за 1–2 урожайных года. При этом решается проблема массового получения семян для проведения широкомасштабного эксперимента по определению количества семядолей у сосны обыкновенной. Однако семена производственного сбора будут пригодными для эксперимента только в том случае, если по частотному распределению семядолей они не отличаются от контрольных популяционных выборок, взятых в том же лесничестве.

Целью наших исследований является изучение изменчивости количества семядолей

в выборках семян сосны обыкновенной производственной (ПР) и опытной (ОП) заготовки в лесничествах северо-восточной части Русской равнины и оценка возможности использования семян производственной заготовки при исследовании популяционно-хорологической структуры вида.

Материалы и методы

Для исследований используются 10 выборок семян сосны обыкновенной производственной заготовки, взятых на лесосеменных станциях Кировской области, Коми Республики и 7 опытных популяционных выборок, полученных нами из шишек, собранных на лесосеках со срубленных деревьев. Опытная популяционная выборка семян, используемая в эксперименте в качестве контроля, формировалась следующим образом. В каждом лесничестве с 70–80 деревьев собирали по 10 шишек, которые высушивали в термостате при $t=40^{\circ}\text{C}$. От каждого дерева данного образца, примерно пропорционально количеству шишек на нём и семян в собранных шишках, отбирали от 10 до 20 семян, которые ссыпали вместе, получая при этом популяционную смесь, включающую около 1 тыс. семян. Количество шишек на дереве определяли глазомерно во время их заготовки, а количество семян, полученных с каждого дерева, после извлечения их из шишек. Сформированная таким образом выборка семян будет, вероятно, наиболее полно отражать частоты семядолей в данной природной популяции сосны обыкновенной.

Все выборки семян производственной и опытной заготовки проращивали в специальном аппарате [15] при одинаковом температурном режиме ($t=24^{\circ}\text{C}$) [16] до момента полного расхождения семядолей у каждого проростка. От выборки семян для проращивания брали 4–5 проб по 100 семян в каждой. Затем подсчитывали количество семядолей у каждого проростка. Определяли количество встречающихся в выборке групп (классов) проростков по числу семядолей, абсолютные и относительные классовые частоты.

Результаты и обсуждение

Анализ общей изменчивости изучаемого признака показывает, что в выборках семян Вятскополянского, Афанасьевского, Суводского, Корткеросского лесничеств количество семядолей варьирует от 4 до 8, а Сысольского, Ертомского и в выборке семян опытной

Таблица 1

Распределение проростков сосны обыкновенной по количеству семян в выборках производственной и опытной заготовки семян в популяциях Северо-Восточной части Русской равнины

Номер выборки семян	Способ заготовки семян: производственный (ПР), опытный (ОП)	Единица измерения частоты проростков	Количество проростков						Среднее кол-во семян (M±m)
			с числом семян						
			4	5	6	7	8	Всего	
Вятскополянское лесничество Кировской области									
1	ПР	шт.	15	111	178	31	5	340	5,71±0,042
		%	4	33	53	9	1	100	
2	ПР	шт.	19	125	187	46	3	380	5,71±0,040
		%	5	33	49	12	1	100	
3	ПР (семенной участок)	шт.	6	54	183	81	9	333	6,10±0,042
		%	2	16	55	24	3	100	
4	ПР (семенной участок)	шт.	0	35	135	82	11	263	6,26±0,046
		%	0	13	51	31	5	100	
5	ОП	шт.	3	67	118	30	1	219	5,81±0,046
		%	1	30	54	14	1	100	
Афанасьевское лесничество Кировской области									
6	ПР	шт.	30	143	140	27	3	343	5,50±0,043
		%	8	42	41	8	1	100	
7	ОП	шт.	29	110	90	6	1	236	5,31±0,052
		%	12	46	38	3	1	100	
Суводское лесничество Кировской области									
8	ПР	шт.	12	53	82	10	4	161	5,63±0,064
		%	8	33	51	6	2	100	
9	ОП	шт.	24	81	124	12	1	242	5,52±0,048
		%	10	33	51	5	1	100	
Кирсинское лесничество Кировской области									
10	ПР	шт.	5	53	185	89	13	345	6,15±0,042
		%	1	15	54	26	4	100	
11	ОП	шт.	11	83	105	14	0	213	5,57±0,047
		%	5	39	49	7	0	100	
Сысольское лесничество Республики Коми									
12	ПР	шт.	14	60	87	13	0	174	5,57±0,057
		%	8	35	50	7	0	100	
13	ОП	шт.	23	76	123	14	0	236	5,54±0,048
		%	10	32	52	6	0	100	
Ертомское лесничество Республики Коми									
14	ПР	шт.	35	77	54	8	0	174	5,19±0,061
		%	20	44	31	5	0	100	
15	ОП	шт.	63	153	86	4	0	306	5,10±0,041
		%	21	50	28	1	0	100	
Корткеросское лесничество Республики Коми									
16	ПР	шт.	21	94	131	23	3	272	5,61±0,052
		%	8	35	48	8	1	100	
17	ОП	шт.	13	103	99	20	2	237	5,56±0,049
		%	6	44	42	8	1	100	

заготовки Кирсинского лесничества от 4 до 7. В Вятскополянском, Суводском, Кирсинском, Сысольском, Корткеросском лесничествах наиболее часто встречаются проростки с 6 семядолями, составляющие 50–55% выборки, а в Афанасьевском и Ертомском – с 5 семядолями. Среднее количество семядолей в выборках изменяется от 5,10 до 6,26 (табл.1).

В результате попарного сравнения выборок семян производственной и опытной заготовки по распределению классовых частот и среднему количеству семядолей установлено, что одни из них значительно различаются (выборки 3 и 5, 4 и 5, 10 и 11), другие являются сравнительно однородными (выборки 12 и 13, 16 и 17). Кроме того, имеются пары выборок, занимающие по данному показателю среднее положение между указанными крайними вариантами (табл. 1). Это даёт основание полагать, что по количеству семядолей сравнимые пары выборок одного географического происхождения (одного лесничества) могут быть одинаковыми или различными. Для оценки этого необходимо применение соответствующего статистического анализа. Данные нашего эксперимента представлены в виде рядов распределения классовых частот признака, для которых известны основные статистические показатели ($M \pm m$; σ ; S , %). Поэтому для сравнительной статистической оценки их вычислены значения критериев χ^2 [17] и t_{st} [18], которые приведены в табл. 2.

Анализ полученных данных показывает, что 6 из 10 вариантов сравнения (выборки 1-5, 2-5, 8-9, 12-13, 14-15, 16-17) статистически однородны, так как фактические значения критериев χ^2 и t меньше табличных при всех

уровнях значимости P . Выборки 3 и 5, 4 и 5, 10 и 11 статистически значимо различаются между собой по обоим критериям оценки при всех уровнях значимости P . Выборки 6 и 7 однородны по критерию χ^2 и статистически значимо различаются по критерию t при $P < 0,01$. В связи с неоднозначностью полученных оценок эти выборки можно считать статистически различными. Тогда 60 % сравниваемых выборок семян производственной и опытной заготовки будут статистически однородными и 40 % статистически значимо различными.

При этом в трёх случаях из четырёх причины различий установлены. Выборки семян № 3 и 4 были заготовлены на постоянных лесосеменных участках (ПЛСУ). В процессе их формирования проводился селекционный отбор лучших семенных деревьев. В результате этого генотипическая структура ПЛСУ стала иной, чем в местной природной популяции. Это привело к смещению природных популяционных частот семядолей и, как следствие, к статистически значимым различиям между выборками семян, заготовленными на ПЛСУ и в древостоях сосны естественного происхождения. Статистически значимые различия выборок Кирсинского лесничества обусловлены неоднородностью семян по географическому происхождению. Семена выборки № 10, считавшиеся местными (кирсинскими), фактически были заготовлены на лесосеменной плантации Вятскополянского лесничества, а опытная выборка (№ 11) – на территории Кирсинского лесничества. Причины различия выборок семян № 6 и 7 Афанасьевского лесничества неизвестны.

Таким образом, можно считать, что не менее 50–60% выборок семян, взятых на лесосе-

Таблица 2

Результаты статистической оценки однородности рядов распределения частот семядолей по критериям χ^2 и t_{st} в выборках семян производственной и опытной заготовки

№ п/п	Номера сравниваемых выборок	Значение критерия χ^2				Значение критерия t факт.
		факт.	табличное при P			
			0,05	0,01	0,001	
1	1-5	7,22	9,49	13,30	18,50	1,56
2	2-5	6,09	9,49	13,30	18,50	1,59
3	3-5	23,77	9,49	13,30	18,50	4,53
4	4-5	43,02	9,49	13,30	18,50	6,82
5	6-7	9,47	9,49	13,30	18,50	2,79
6	8-9	4,29	9,49	13,30	18,50	1,41
7	10-11	70,24	7,81	11,30	16,30	8,92
8	12-13	0,95	7,81	11,30	16,30	0,40
9	14-15	6,08	7,81	11,30	16,30	1,25
10	16-17	4,74	9,49	13,30	18,50	0,67

Примечание: для всех пар сравниваемых выборок t_{st} при $P_{0,05} = 1,96$; $P_{0,01} = 2,58$; $P_{0,001} = 3,29$

менных станциях, будут являться пригодными для изучения географической изменчивости семядолей у сосны обыкновенной. Получаемые при этом данные можно использовать как дополнительные сведения, значительно уточняющие характер пространственной изменчивости признака и границы определённых подразделений биохорологической организации вида, выявленные по результатам оценки специально заготовленных популяционных выборок семян.

Критерием достоверности различий выборок, наблюдаемых между средними \bar{X}_1 и \bar{X}_2 , является отношение разности $\bar{X}_1 - \bar{X}_2 = D$ к своей статистической ошибке (m_D), т. е. $t_\phi = \frac{D}{m_D}$ (1), где t_ϕ – критерий достоверности различий; D – разность средних значений сравнительных выборок; m_D – ошибка разности средних значений сравнительных выборок. [18]. На основании вычисленных статистических показателей рядов распределения частот по количеству семядолей (\bar{X} , σ) по данной формуле можно приблизительно определить максимальное значение разности средних двух сравниваемых выборок (D), при котором они будут статистически однородными ($t_\phi < t_{0,05}$), т. е. будут принадлежать к одной совокупности. Из выше приведённой формулы следует, что $D = t_\phi \times m_D$ (2). Максимальное значение t , при котором среднее двух выборок не будет различаться между собой для $P_{0,05}$ и объёма рядов ($n > 120$), равно 1,95 [18]. Статистически значимо не различающиеся между собой выборки 1 и 5, 2 и 5, 8 и 9, 12 и 13, 14 и 15, 16 и 17 имеют объём $n = 250-350$ проростков, максимальное отклонение средних $D = 0,11$, пределы статистических ошибок отклонения средних $m_D = 0,063-0,078$. У выборок, статистически значимо различающихся между собой, ошибки отклонения средних изменяются примерно в тех же пределах ($m_D = 0,064-0,075$). Из формулы (1) следует, что при постоянном значении D величина t будет возрастать при уменьшении статистической ошибки отклонения средних (m_D). Минимальное значение m_D в нашем эксперименте равно 0,063. Если принять $t_\phi = 1,95$, $m_D = 0,063$, то по формуле (2) $D = 1,95 \times 0,063 = 0,12$. Следовательно, можно считать, что сравниваемые по числу семядолей выборки будут являться однородными, если разность их средних значений будет равна 0,12 и менее. Вероятно, данная величина является очень высоким критерием оценки. Однако при таком методическом подходе можно без дополнительной, достаточно трудоёмкой статистической оценки с очень высокой степенью

вероятности утверждать, что вся совокупность выборок данного географического района, в которой разность минимального и максимального значения средних не превышает этот пороговый уровень, по числу семядолей будет являться статистически однородной. Все выборки, среднее значение которых выходит за пределы данной изменчивости, бракуются. Данный подход применим только при наличии большого количества выборок, которые будут получены за счёт проращивания семян производственного сбора.

Заключение

Методика феногеографических исследований популяционно-хорологической структуры сосны обыкновенной с использованием в качестве маркера среднего числа семядолей состоит в следующем. Выбирается район исследований, включающий значительную часть ареала вида, например, всю европейскую часть России. На карту района исследований через 50 км одна от другой наносятся взаимно перпендикулярные широтные и меридиональные трансекты. В районах пересечения их в урожайные годы на лесосеках со 100 срубленных деревьев собирается по 10 шишек. Шишки высушиваются в термостате и из них извлекаются семена. Одновременно с этим в лесосеменных станциях, находящихся в районе исследований, берётся по 1 тыс. семян сосны от каждого имеющегося среднего образца.

Все выборки семян опытной и производственной заготовки проращиваются при одинаковом температурном режиме до полного расхождения семядолей. У каждого проростка данной партии семян подсчитывается количество семядолей. В каждой выборке определяется количество трёх-, четырёх-, пяти-, шести-, семи-, восьми-, девятисемядольных проростков, а также среднее число семядолей. Средние значения числа семядолей опытных выборок наносятся на географическую карту. При этом в пределах определённых, как правило, очень больших географических районов значения признака будут относительно однородными и специфичными. Между данными районами проводится предварительная граница, которая в дальнейшем будет уточняться с помощью средних значений числа семядолей в выборках семян производственной заготовки. По каждому выделенному району определяются пределы изменчивости среднего числа семядолей опытных выборок. В результате наших

предыдущих исследований на Востоке Европейской части России выделены 4 крупных пространственно смежных географических района, в которых среднее значение признака изменяется в пределах 5,77-5,88; 5,52-5,66; 5,04-5,17; 5,27-5,40 [12]. Разница выборочных средних D в них соответственно составляет 0,11; 0,14; 0,13; 0,13, т. е. она почти полностью соответствует вычисленному нами предельному значению этого показателя, равному 0,12. Это подтверждает правильность наших расчётов.

После этого на географическую карту района исследований наносятся средние значения числа семядолей выборок семян производственной заготовки и проводится их анализ. В результате этого на географической карте оставляют только те выборки, средние значения которых находятся в пределах изменчивости средних опытных выборок данного выделенного географического района. Средние выборки, которые не соответствуют этому требованию, с карты удаляются. Таким образом, на географической карте появляется множество значений среднего числа семядолей, что позволяет уточнить и достаточно точно провести границы между крупными хорологическими подразделениями сосны обыкновенной, характеризующимися относительно однородными и специфичными значениями признака. На заключительном этапе исследований проводится статистическая оценка значимости различий между выделенными подразделениями вида.

Результаты апробации данной методики на Северо-Востоке Русской равнины показали, что она может успешно применяться при изучении популяционно-хорологической структуры сосны обыкновенной [13].

Литература

1. Вульф Е.В. Историческая география растений. М.- Л.: Изд-во АН СССР, 1944. 546 с.
2. Лаврова М.А. Основные этапы истории четвертичного периода севера европейской части СССР // Материалы по четвертичному периоду СССР. М.: АН СССР, 1952. Вып. 3. С. 123–129.
3. Хотинский Н.А. Голоцен Северной Евразии. М.: Наука, 1977. 200 с.

4. Горчаковский П.Л. История развития растительности Урала. Свердловск: Свердловское кн. изд-во, 1953. 144 с.

5. Горчаковский П.Л. Основные проблемы исторической фитогеографии Урала // Труды Ин-та экологии растений и животных УФАН СССР. Свердловск, 1969. Вып. 66. 286 с.

6. Кац Н.Я. Оледниковых убежищах и расселении широколиственных пород на Восточно-Европейской равнине в послевалдайское время // Бюл. МОИП. Отд. биол. 1952. Т. 57. Вып. 6. С. 52–63.

7. Сукачев В.Н. История растительности СССР во время плейстоцена // Растительность СССР. М.- Л.: АН СССР, 1938. Т. 1. С. 183–234.

8. Нейштадт М.И. История лесов и палеогеография СССР в голоцене. М.: АН СССР, 1957. 404 с.

9. Лавренко Е.М. Лесные реликтовые (третичные) центры между Карпатами и Алтаем // Журн. Русск. бот. общества. 1930. Т. 15. № 4. С. 351–363.

10. Видякин А.И. Миграция в голоцене и популяционная структура *Pinus sylvestris* L. на востоке европейской части России // Жизнь популяций в гетерогенной среде. Ч. 2. Йошкар-Ола. 1998. С. 4–12.

11. Видякин А.И. Фены лесных древесных растений: выделение, масштабирование и использование в популяционных исследованиях (на примере *Pinus sylvestris* L.) // Экология. 2001. № 3. С. 197–202.

12. Видякин А.И. Популяционная структура сосны обыкновенной на востоке европейской части России: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Екатеринбург: ИЭРиЖ УрО РАН. 2004. 48 с.

13. Видякин А.И. Фенетика, популяционная структура и сохранение генетического фонда сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Хвойные бореальной зоны. 2007. XXIV. № 2-3. С. 159–166.

14. Указания по лесному семеноводству в Российской Федерации: утв. Федер. службой лес. хозяйства России 11.01.2000. М. 2000.

15. Редько Г.И., Родин А.Р., Трещевский И.В. Лесные культуры: учебник для вузов. М.: Лесная промышленность, 1980. 368 с.

16. ГОСТ 13056.6-97. Семена деревьев и кустарников. Методы определения всхожести.

17. Глотов Н.В., Животовский Л.А., Хованов Н.В., Храмов-Борисов Н.Н. Биометрия. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. 263 с.

18. Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Наука, 1990. 352 с.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №09-04-00177-а).

XVI МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ В ИНТЕРЕСАХ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ»

25–26 июня 2010 г. в Москве состоялась XVI Международная конференция «Образование в интересах устойчивого развития».

Партнёрами конференции выступили Международный Зелёный Крест, Российский экологический конгресс, Социально-экологический союз, Академия МНЭПУ, Швейцарский Зелёный крест, Норвежское общество охраны природы.

Конференция прошла при поддержке Посольства Финляндии в России.

В её работе приняли участие почти 200 человек из 38 регионов России, а также Швейцарии, Норвегии, Эстонии, Беларуси, Украины, Молдовы, Азербайджана, Казахстана, Таджикистана, Узбекистана – представители государственных, общественных и научных организаций, природоохранных служб, средств массовой информации, специалисты в области экологического образования, воспитания и просвещения, преподаватели вузов, методисты, учителя и другие заинтересованные лица.

Основными целями конференции явились: выработка предложений по организации введения экологического образования в формате образования для устойчивого развития (ОУР) в систему государственных стандартов; подготовка комплекса мер по эффективному выполнению поручений Госсовета России 27 мая 2010 г.; анализ существующих проблем в образовании для устойчивого развития и влияющих на него факторов; выявление и распространение лучшего опыта в данной сфере.

Ключевыми вопросами, обсуждаемыми на конференции, стали:

- концептуальная модель образования для устойчивого развития;
- смена приоритетов в содержании ОУР и методах обучения;
- источники содержания образования в интересах устойчивого развития;
- интеграция деятельности школ, учреждений дополнительного образования детей (или систем дополнительного образования внутри школы) и неформального образования (общественного экологического движения);
- обучение детей в живой природе;
- экологическая безопасность как приоритет государственной политики.

Участниками конференции был дан обзор деятельности по образованию для устойчивого развития в Центральной Азии, Европейском союзе, Азербайджане и других странах, рассмотрены проблемы экологической безопасности в современном

мире (на примерах химической и биологической безопасности), вопросы просвещения в области устойчивого водопользования и энергоэффективности, а также социальной и медицинской помощи людям (в первую очередь детям), вынужденным проживать в экологически неблагоприятных регионах страны.

Острыми были дискуссии по вопросам терминологии, подходов к обновлению содержания образования, инновационным педагогическим технологиям в обучении.

Большой интерес вызвали сообщения об опыте внедрения идей устойчивого развития в образовании дошкольников, о формах и методах его преподавания в высшей школе, о возможности рассматривать ОУР как надпредметное направление школьного образования, опыте по образованию для устойчивого развития в Санкт-Петербурге и Эстонии.

В ходе конференции проведены 2 пленарных заседания, 5 секций и 3 «круглых стола».

Участники конференции констатировали, что в ряде регионов накоплен уникальный опыт и разработана прекрасная методологическая база по организации экологического образования. Так, например, в Москве, где действует Межведомственный городской совет по экологическому образованию, позволяющий успешно преодолевать межотраслевые разногласия при реализации задачи системного внедрения образования для устойчивого развития. Однако, как отметили участники конференции, ни этот опыт, ни великоленные разработки российских специалистов в регионах, не используются Министерством образования и науки и не внедряются в систему государственных образовательных стандартов. При этом проигнорированы рекомендации парламентских слушаний в Госдуме России «Об участии Российской Федерации в реализации Стратегии ЕЭК ООН для образования в интересах устойчивого развития» (2006), не получил должного внимания направленный в Рособразование (2008 г.) проект «Национальной стратегии образования для устойчивого развития», не исполняется Указ Президента России № 889 от 04.06.2008 в части включения в государственные стандарты образования основ экологических знаний.

Участниками конференции было также отмечено, что Россия до сих пор не присоединилась к Орхусской конвенции (Дания, 1998) «О доступе к экологической информации, участии общественности в принятии решений в области охраны окру-

жающей среды и доступе к правосудию для защиты экологических прав граждан», что не позволяет усилить активность граждан страны в решении вопросов экологической безопасности, проведении экологической модернизации государства.

Обсудив состояние, проблемы и перспективы развития экологического образования в интересах устойчивого развития, роль России в международном сообществе, конференция *приняла решение:*

1. Просить Правительство России

1.1. Принять постановление, включающее экологическое образование для устойчивого развития в число вопросов, за которые отвечает Минобрнауки России, записав п. 5.2.7. Положения о Министерстве (Постановление Правительства России от 15 мая 2010 г. № 337) в следующей редакции: «федеральные государственные образовательные стандарты, в том числе в части подготовки кадров для сферы нанотехнологий, экологического образования для устойчивого развития, федеральные государственные требования к структуре основной профессиональной образовательной программы послевузовского профессионального образования ...» и далее – по тексту.

1.2. Назначить Минобрнауки России ответственным за исполнение указаний и поручений Президента и Правительства России о введении экологического образования для устойчивого развития в систему государственных образовательных стандартов и создании государственной системы непрерывного экологического образования в интересах устойчивого развития.

1.3. Подписать Конвенцию ЕЭК ООН «О доступе к информации, участии общественности в процессе принятия решений и доступе к правосудию по вопросам, касающимся окружающей среды» (Орхус, 1998).

1.4. Поручить Минобрнауки России разработать межведомственную комиссию для разработки комплекса мер по созданию государственной системы непрерывного экологического образования в интересах устойчивого развития, включающего:

- разработку при участии всех заинтересованных ведомств и общественных организаций национальной стратегии образования, просвещения и воспитания в интересах устойчивого развития, а также национального плана реализации Стратегии ЕЭК ООН в интересах устойчивого развития;
- дополнение разрабатываемого законопроекта «Об образовании в Российской Федерации» статьёй (пунктом) об экологическом образовании в интересах устойчивого развития (глава 2. Система образования);

- предусмотрение в Федеральной целевой программе «Развитие образования» направления «Формирование системы экологического образования, просвещения и воспитания в интересах устойчивого развития»;

- создание в инвариантном компоненте базисного образовательного плана общеобразовательных учреждений с 1 по 11 класс образовательной области «Экология, устойчивое развитие и безопасность жизни», с обязательным обобщающим мировоззренческим (надпредметным) курсом в 9 и 10 (11) классах;

- введение в федеральный компонент базисного учебного плана общеобразовательной школы предмета «Экология и устойчивое развитие», интегрирующего все составляющие образования, имеющие значение для реализации концепции устойчивого развития; разработку с привлечением учёных и специалистов образовательного стандарта этой учебной дисциплины;

- проведение инвентаризации инициатив (в том числе общественных) в области образования для устойчивого развития и подготовки аналитического доклада о состоянии этого направления деятельности в субъектах Федерации;

- разработку и реализацию системы дополнительных образовательных программ, элективных курсов на базе учреждений дополнительного образования и общеобразовательных школ;

- организацию ежегодных смотров-конкурсов образовательных учреждений, внедряющих инновационные образовательные программы в области экологии, здоровья и безопасности жизни в интересах устойчивого развития;

- формирование программы поддержки научных исследований и разработок, а также их своевременного распространения среди всех участников процесса на местном, региональном и глобальном уровне для использования на различных ступенях системы образования;

- создание всероссийского банка данных, включающего образцы учебных программ, учебников, учебно-методических пособий, справочников, журналов, опыт проведения теоретических и практических занятий, в том числе в летних лагерях, дворцах молодёжи и других образовательных учреждениях;

- сохранение экологии в перечне предметов Всероссийской олимпиады школьников, принимая во внимание не только её большое социальное значение, но и роль олимпиады как фактора модернизации образования в интересах устойчивого развития;

- разработку системы поощрений педагогов за достижения в области экологического образования в интересах устойчивого развития.

2. Обратиться к органам управления образованием субъектов Федерации о необходимости:

- организовать федеральные экспериментальные площадки по реализации системы непрерывного экологического образования в интересах устойчивого развития;

- создать инновационные экологообразовательные центры для обучения всех возрастных групп населения основам экологической грамотности, практическим действиям в повседневной жизни.

3. Предложить Общественному совету ЦФО (в сотрудничестве с заинтересованными организациями) на основе концепции экологического

образования для устойчивого развития разработать комплексную программу непрерывного экологического образования в интересах устойчивого развития в России до 2020 г.

4. Направить настоящее решение в Администрацию Президента, Правительство, Госдуму, Минобрнауки и другие высшие органы государственной власти России, а также в общественные экологические организации.

*Т. Я. Ашихмина,
д.т.н., профессор,
лаборатория биомониторинга
Института биологии Коми НЦ УрО РАН
и ВятГГУ*

ТРИ ЖИЗНИ ВЕЛИКОГО МИКРОБИОЛОГА: Документальная повесть о Сергее Николаевиче Виноградском (М.: Книжный дом «Либроком», 2009. 240 с.)

Хотелось бы начать рецензию на данную книгу с дословного цитирования предисловия, написанного редактором издания Н.Н. Колотиловой: «Перед читателем неординарная книга с необычной судьбой. Повесть о жизни гениального микробиолога Сергея Николаевича Виноградского, написанная на основе его автобиографической «Летописи нашей жизни» крупнейшим современным микробиологом, учёным-естествоиспытателем Г.А. Заварзиным. Книга в книге. Обе предельно откровенные, исповедальные. Речь идёт не только о внутреннем личностном мире Виноградского и его выдающихся достижениях – открытии хемосинтеза, формулировке принципов элективности и выделении важнейших функциональных групп микроорганизмов, развитии микробиологии почвы и, наконец, формировании принципов микробной экологии, – но и об истории русской науки, школах в естествознании, месте российских естествоиспытателей в развитии мировой культуры».

Книга имеет долгую и трудную судьбу. Рукопись С.Н. Виноградского только в начале 1960-х годов из Франции, где полжизни провёл Сергей Николаевич, попала в СССР. Но в Академии наук воспоминания прочли, отложили, не издали, затем надёжно и надолго потеряли. Прошло ещё около 20 лет, и в 1985 году Георгий Александрович Заварзин пишет книгу «Три жизни великого микробиолога». Но, волею обстоятельств, она не была тогда опубликована. И, наконец, в 2009 году издание со-

стоялось и стало для читателя тем подарком судьбы, каким бывает встреча с хорошей книгой. Дополнительную ценность придают книге комментарии, сделанные редактором издания, микробиологом, историком науки Натальей Николаевной Колотиловой, которая провела тщательнейшую дополнительную работу в российских и парижских архивах.

Классический труд С.Н. Виноградского «Микробиология почвы» до сих пор служит настольной книгой современных микробиологов. Практически вся современная почвенная микробиология выросла из работ и идей Виноградского.

Совершенно справедливую оценку деятельности учёного даёт Г.А. Заварзин: «Сергей Николаевич Виноградский – личность совершенно исключительная в истории нашего естествознания по тому длительному и всё возрастающему влиянию, которое он продолжает оказывать на развитие общей микробиологии и сопредельных с нею наук на протяжении вот уже более столетия. Рядом с ним можно поставить лишь В.И. Вернадского...»

Если быть очень кратким и потому приблизительно, он представил природу как химическую систему, в которой узловые реакции осуществляют высокоспециализированные микробы... В 1940-х годах итогом своей работы он счёл экологию микроорганизмов как самостоятельную научную дисциплину. Сергей Николаевич много работал за рубежом и, сознавая его влияние на мировую науку, его пытаются представить «человеком

мира», без родины. Судя по запискам, это миф. Виноградский – порождение России конца XIX века и не может быть понят вне её».

В книге три части: «Жизнь первая» с главами «Поиски призвания», «Открытие хемосинтеза», «Служба», «Кризис»; «Жизнь вторая» с главами «Сельский хозяин», «Что делать?» и «Жизнь третья» с главой «Основатель экологической микробиологии». Заключает книгу эпилог «Гений естествознания».

Этапы жизни Виноградского удивительны и поучительны. Он родился 1 сентября 1856 г. в Киеве в семье банкира, который поднялся на самую вершину благосостояния и по современным понятиям являлся олигархом. Мать была из гетманского рода Скоропадских и, родив нескольких детей, оставалась светской красавицей. В течение 7 лет Сергей учился в гимназии, о которой до старости с отвращением вспоминал. Ничего в душе от преподавателей не осталось. Преподавание было основано на классической филологии, внушившей на всю жизнь глубокое отвращение.

После гимназии Виноградский отправляется в Петербург учиться музыке в консерватории. Однако, скоро приходит к выводу, что жить одной музыкой, когда голова бездействует, для него невозможно. Поэтому С.Н. поступает в Петербургский университет и выбирает специальность ботаника. Ученические годы С.Н. кончились, когда ему было около 30 лет, со сдачей магистерских экзаменов по ботанике и химии.

Следующий этап деятельности Виноградского связан с Германией. В Страсбургском университете происходит поворот интересов в сторону микробиологии. Его аспирантская работа о серобактериях стала настоящим прорывом в науке и привела к величайшему открытию в науке XIX века – новому автотрофному способу жизни, получившему название хемосинтез.

В конце 1888 г. начался швейцарский (цюрихский) период исследований С.Н. В Цюрих Виноградский приехал уже с готовой идеей нитрификации. Знаменитая статья 1890 г. – 2-е сообщение о нитрифицирующих организмах – заканчивается утверждением: «Но уже теперь можно установить новый факт, имеющий первостепенное значение для физиологии: *органическое вещество на земном шаре образуется при жизнедеятельности живых существ не только в процессе фотосинтеза, но и в процессе хемосинтеза*».

По словам Заварзина, работами о хемосинтезе закончилась эпоха жизни С.Н. Виноградского в качестве учёного-любителя, подвизающегося по чужим лабораториям с целью составить себе имя, чтобы получить твёрдое место в жизни. Для науки это тоже стало эпохой. Толстая, напоминающая диссертацию, работа о серобактериях и несколько коротких статей

о нитрификаторах создали и мировое имя в микробиологии, и новое направление, которое продолжает разрабатываться и сейчас, более столетия спустя.

К переезду в Россию закончился период становления Виноградского как признанного учёного. Хочется снова дословно цитировать Заварзина о необыкновенной судьбе С.Н. Виноградского.

«Конец XIX века – это высочайший взлёт русской культуры, когда Россия становится властителем дум не только в эмоциональной, но и быстро развивающейся научной области. Вряд ли есть эпоха, которая была бы ярче освещена гениями русской литературы.

Молодой русский капитализм выдвигал на вершину людей незаурядных, только такие и могли выбиться не за счёт связей и родственного клана, а своими силами. Отец С.Н. Виноградского – банкир, капиталист, землевладелец-помещик – достиг богатства не за счёт захудалой ветви Скоропадских, а своими силами. Это требовало как постоянного условия непрестанного труда, упорства, ясности мысли, заботы о репутации как правила отбора в среде конкурентов. Это поколение сильных, выбившихся в первые ряды людей, передавало свои черты и потомству – со всей игрой генетического случая. С.Н. Виноградский недаром писал: «Я уверен, что именно от отца я унаследовал весь свой умственный и нравственный склад, свои способности и темперамент. Скажем даже, все свои способности и недостатки...».

Можно удивляться, что молодой обеспеченный человек (С.Н.), женившись ещё будучи студентом, получал как рантье 6000 руб., а в 45 лет, с мировой известностью, мог рассчитывать на 5000 руб. как ординарный профессор. Чтобы получить образование и первоначальную профессиональную подготовку, нужны были средства, достаточные, чтобы обеспечить 10–15 лет становления...

Быть студентом (стажёром, учеником) в 33 года с семьёй, с тремя детьми – как тут не подивиться вере в самого себя, а ещё больше вере в него и преданности жены. Почему эти люди, для которых, по нашим современным понятиям была лишь одна проблема – проблема свободного времени – ни минуты этого свободного времени не имели. Работали до истощения, до нервного срыва, беззаветно. Гордый человек шёл на унижения из-за места в скверной лаборатории».

В одной из лекций «О роли микробов в общем круговороте жизни» С.Н. Виноградский пишет в заключении: «... микробы являются главными агентами вызванного жизнью и необходимого для правильной смены жизней круговорота веществ; они являются живыми носителями бесчисленно разнообразных реактивов; и нам ясно, что только основные качества живых существ – способности размножения, распространения, приспособления и наследственнос-

ти – обеспечивают этим процессам должную пластичность, самопроизвольность и неизбежность.

В такой связи явлений вся живая материя восстаёт перед нами, как один огромный организм, заимствующий свои элементы из резервуара неорганической природы, целесообразно управляющий всеми процессами своего прогрессивного и регрессивного метаморфоза и, наконец, отдающий снова всё заимствованное назад мёртвой природе» (1897). Вопросы, которые здесь поставлены Виноградским, дают совершенно ясную постановку задачи того, что теперь называется экологией. Заключительный вывод Виноградского о системе живой природы как «огромном организме» предвосхищает учение о биосфере Вернадского.

Вся книга – удивительное, талантливое сочетание воспоминаний самого Виноградского и раздумий о судьбах учёных, науки, о былом и настоящем времени современного крупнейшего микробиолога Заварзина. Энциклопедизм знаний обоих, необычайно острое восприятие мира – практически на каждой странице.

Трагедия, которая прошла через судьбы многих русских людей, не обошла и Виноградского. В 1920 г. он оказался за границей. Для русского человека оторваться от родины, стать беженцем, изгоем – судьба ужасная. Задача перед ним стала – найти твёрдую почву для существования, приближаясь к 70-летнему возрасту и растеряв практически всё. Но Виноградского искали и нашли те, кому был нужен лидер в почвенной микробиологии. Его «жизнь третья» продолжилась в Париже, в Пастеровском институте (1923–1952). И если в молодые годы материально обеспеченный Виноградский боролся за признание, то, начиная работать в Пастеровском институте, признание было необходимо ему для материального обеспечения себя и зависящих от него людей, и огромный (20-летний) творческий период, приходящийся на старость.

До сих пор диссертации по почвенной микробиологии начинаются пересказом или прямым цитированием работ Виноградского и воспринимаются как вполне современные обсуждаемые и оспариваемые суждения, несмотря на то, что техника работы ушла далеко вперёд.

Удивителен факт публикации во Франции труда всей его жизни «Микробиология почвы», который он завершил в 1945 г., но не мог опубликовать из-за отсутствия денег. В Академии наук СССР было подготовлено письмо, направленное в ЦК компартии, в котором просили перевести С.Н. Виноградскому в Париж 100 тыс. франков в счёт его гонорара за труд «Микробиология почвы», насчитывающий 1200 страниц машинописного текста. На высшем уровне страны вопрос был решён сразу же. С помощью советских дотаций издание книги было осуществлено в

1949 г. Русское издание книги Виноградского вышло в 1952 г., незадолго до его смерти.

Эпилог своей книги Г.А. Заварзин назвал «Гений естествознания». Анализ научной деятельности Виноградского показывает, что его открытия стали началом, из которого многими поколениями учёных было выращено современное понимание биосферы – независимого от нас мира, в котором мы появились и который превратили в свою среду обитания. Картина мира как единой динамической системы, где микробы служат катализаторами специфических реакций, была создана Виноградским за три десятка лет до «Биосферы» Вернадского.

Кого можно назвать гением? – спрашивает Заварзин. И сам даёт ответ – человека, кардинально изменившего взгляд на природу вещей. Время и история в наибольшей мере выявляют значение события. Нужно несколько поколений, чтобы его осознать. Виноградский был гениальным экспериментатором. Он дал универсальный метод дедуктивного исследования в области химического воздействия микроорганизмов на окружающий мир. Он понимал роль микробов в природе как специфических катализаторов геохимических циклов. Он слишком опережал своё время. Но миропонимание Виноградского, опосредованное через его экспериментальные работы, проникло в естествознание XX века как системный подход к биогеохимическим процессам.

Разделом под названием «Основы экологической микробиологии» заключил в 1945 г. почти 90-летний Виноградский свою книгу «Микробиология почвы».

Виноградский, бесспорно, принадлежит к числу русских учёных, оказавших наибольшее влияние на мировую науку. Русская школа общей и почвенной микробиологии ведёт происхождение из взглядов и идей Виноградского.

Книга «Три жизни великого микробиолога», написанная Г.А. Заварзиным и подготовленная к печати Н.Н. Колотиловой, – впервые показывает С.Н. Виноградского не только как великого учёного, но и как человека с необыкновенной, яркой, интересной судьбой, чья жизнь продолжалась почти век. И этот век вообрал в себя самые трагические моменты человеческой истории. Но и в эти моменты не ослабевал научный поиск, который приводил к великим открытиям.

Есть затасканный термин для самых интересных и востребованных книг – бестселлер. На мой взгляд, эта книга является одним из самых лучших научных, публицистических бестселлеров последних лет.

*Л.И. Домрачева, д.б.н., профессор,
каф. ботаники, физиологии растений
и микробиологии им. Э. А. Штиной
Вятской ГСХА*