



# Теоретическая и прикладная ЭКОЛОГИЯ

№ 2, 2011

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

**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

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

Подписные индексы 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 «МК-Periodica» in your country or to JSC «МК-Periodica» directly. Address: Russia, 129110, Moscow, 39, Gilyarovskiy St., JSC «МК-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, 4, оф. 3  
Тел./факс (8332) 32-28-39. E-mail: okrat@okrat.ru  
Оригинал-макет, дизайн – Татьяна Коршунова, Ирина Макарова  
Фото на обложке – Александр Широких  
Перевод – Ирина Кондакова  
Выпускающий редактор Мария Зелаева  
Директор издательства «О-Краткое» Евгений Дрогов

Подписано в печать 20.06.2011. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Печать офс. Бумага офс. Усл.п.л. 12,5. Тираж 1150 экз. Заказ № 2178.

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** – д.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 «Росатома», председатель Российского экологического конгресса  
**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  
**Н.А. Киреева** – д.б.н., профессор Башкирского государственного университета  
**В.З. Латыпова** – д.х.н., член-корреспондент Академии наук Республики Татарстан, профессор Казанского государственного университета им. В.И. Ульянова-Ленина  
**Ли Юй** – профессор, директор Института микологии Цзилиньского аграрного университета, иностранный член Россельхозакадемии (КНР)  
**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 «Росатома», директор экологического центра ИИЕТ РАН  
**А.Ф. Радченко** – руководитель Аппарата ФГУ Общественная палата (вице-президент ООП «Экосфера»)  
**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** – зам. председателя Комитета Государственной Думы по природным ресурсам, природопользованию и экологии  
**В. П. Шапорев** – д.т.н., профессор Национального технического университета «Харьковский промышленный институт»  
**В.Т. Юнгблуд** – д.и.н., профессор, ректор Вятского государственного гуманитарного университета  
**О.В. Яковенко** – к.ф.н., заместитель начальника отдела экологии Правительства 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

- Л. О. Карпачевский, Т. А. Зубкова* Экологическая роль информации в почве ..... 4
- Е. А. Жегалло, В. К. Орлеанский, К. Р. Напольская, А. И. Курапова* Биологические проблемы первых колонизаторов планеты Земля ..... 15

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. МОДЕЛИ И ПРОГНОЗЫ

- А. В. Садов, О. Б. Наполов* Роль и значение природно-ресурсного потенциала при разработке эколого-сбалансированного развития региона ..... 21
- В. А. Оборин, Е. В. Пименов, А. Г. Ивонин* Модификация метода гемосканирования и перспективы его применения при изучении механизмов адгезии бактерий на эритроцитах ..... 28

## МОНИТОРИНГ АНТРОПОГЕННО НАРУШЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

- Е. С. Трояновская, О. В. Абросимова, Е. И. Тихомирова* Оценка состояния почв городских территорий методом комплексного биотестирования ..... 32

## ХИМИЯ ПРИРОДНЫХ СРЕД И ОБЪЕКТОВ

- И. Г. Захожий, И. В. Далькэ, А. Н. Низовцев, Т. К. Головки* Биоаккумуляция и физиологические реакции растений на техногенное загрязнение среды ртутью ..... 37
- О. А. Михайлов, С. В. Загирова, М. Н. Мигловец, Ю. Шнайдер, М. Гажович, Л. Кутцбах* Оценка потоков диоксида углерода в растительных сообществах мезо-олиготрофного болота средней тайги ..... 44

## ЭКОТОКСИКОЛОГИЯ

- Ю. Г. ШUTOва* Эколого-генетический анализ негативного воздействия сложных углеводов в модельных экспериментах ..... 52

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ РИСК и ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

- М. М. Шац* Изменение климата и его роль в надёжности инженерных объектов в криолитозоне ..... 57

## АГРОЭКОЛОГИЯ

- Л. В. Кондакова* Специфика альгофлоры в ризосфере ячменя и сорных растений ..... 65

## ПОПУЛЯЦИОННАЯ ЭКОЛОГИЯ

- И. Г. Широких, О. В. Рябова, А. А. Широких* Регуляция актиномицетом симбиотических отношений клубеньковых бактерий с клевером луговым ..... 70
- А. А. Кудрин, Е. М. Лаптева, М. М. Долгин* Комплекс почвенных нематод в пойменных лесах долины р. Печора ..... 75
- Э. А. Снегин, А. А. Сычев* Оценка жизнеспособности популяций особо охраняемого вида *Helicopsis striata* Müller (Mollusca, Gastropoda, Pulmonata) в условиях юга Среднерусской возвышенности ..... 83

## СОЦИАЛЬНАЯ ЭКОЛОГИЯ

- В. Ю. Оханкина* Экотоксиканты и аутоиммунные заболевания человека ..... 93

## ХРОНИКА

- Научно-практическая конференция «Молодые учёные в решении актуальных проблем науки» (г. Владикавказ) ..... 102

## БИБЛИОГРАФИЯ

- Индукцированный мутагенез и использование его в селекции растений ..... 103

# CONTENTS

## THEORETICAL PROBLEMS of ECOLOGY

- L. O. Karpatchevskiy, T. A. Zubkova* Ecological role of information in soil..... 4
- E. A. Zhegallo, V. K. Orleansky, K. R. Napolskaya, A. I. Kurapova* Biological problems of the first colonizers of the Earth ..... 15

## METHODOLOGY And METHODS of RESEARCH. MODELS And FORECASTS

- A. V. Sadov, O. B. Napolov* Role and meaning of natural resources at working out ecologically balanced development of the region ..... 21
- V. A. Oborin, E. V. Pimenov, A. G. Ivonin* Updating the method of haemoscanning and prospect of its application at studying bacteria adhesion mechanisms on erythrocytes ..... 28

## MONITORING of ANTHROPOGENICALLY DAMAGED TERRITORIES

- E. S. Trojanovskaya, O. V. Abrosimova, E. I. Tikhomirova* Testing of soils in urban areas with the help of bioassay method ..... 32

## CHEMISTRY of NATURAL ENVIRONMENT And OBJECTS

- I. G. Zakhozhiy, I. V. Dalke, A. N. Nizovtsev, T. K. Golovko* Bioaccumulation and physical reactions of plants on industrial pollution of the environment with mercury ..... 37
- O. A. Mikhaylov, S. V. Zagirova, M. N. Miglovec, J. Schneider, M. Gažovič, L. Kutzbach* The estimation of carbon dioxide fluxes in vegetative communities of mezo-oligotrophic peatland in middle taiga ..... 44

## ECOTOXICOLOGY

- J. G. Shutova* The ecological-genetic analysis of negative influence of composite hydrocarbons in modeling experiments .... 52

## ECOLOGICAL RISK And ECOLOGICAL SAFETY

- M. M. Schatz* Climate change and its role in reliability of engineering objects in permafrostzone ..... 57

## AGRICULTURAL ECOLOGY

- L. V. Kondakova* Algoflora specifics in barley rhizosphere and in weeds ..... 65

## ECOLOGY of POPULATIONS

- I. G. Shirokikh, O. V. Ryabova, A. A. Shirokikh* Actinomycete regulation of symbiotic relationship of rhizobium with red clover ..... 70
- A. A. Kudrin, E. M. Lapteva, M. M. Dolgin* Complex of soil nematodes in floodplain forest valleys of the Pechora River ..... 75
- E. A. Snegin, A. A. Sichov* Estimation of vitality of populations of especially protected species *Helicopsis striata* Müller (Mollusca, Gastropoda, Pulmonata) in conditions of the south of Mid-Russia Upland..... 83

## SOCIAL ECOLOGY

- V. Yu. Okhapkina* Ecotoxicants and human autoimmune diseases ..... 93

## CHRONICLE

- Scientific-practical conference «Young scientists in solving scientific problems» ..... 102

## BIBLIOGRAPHY

- Induced mutagenesis and its application in plant breeding ..... 103

## Экологическая роль информации в почве

© 2011. Л. О. Карпачевский, д.б.н., в.н.с., Т. А. Зубкова, д.б.н., в.н.с.,  
 Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
 e-mail: nshevyakova@yandex.ru, dusy.taz@mail.ru

Почва рассматривается как система, управление которой происходит в результате информации, поступающей из почвенного раствора на твёрдую фазу почвы, почвенную матрицу, которая уже направляет соответствующие вещества в раствор. Выделяются два вида почвенной информации: внутрпочвенная, регулирующая состояние почвы, и информация, заключающаяся в почвенных свойствах, адресованная человеку, растениям, ландшафту. Анализ почвенных свойств помогает расчленить их на палингенетические, ценогенетические и литогенетические.

Soil is looked upon as a system that is managed by means of information coming from soil solution to the solid soil, soil matrix, from where certain substances get into soil. There are two types of soil information: inner soil information that regulates the soil state and the information of soil properties aiming at man, plants, landscape. Soil analysis helps to differentiate them into palingenetic, caenogenetic and lithogenetic.

**Ключевые слова:** информация в биосфере и в почве, управление почвой, твёрдофазные носители информации в почве, почвенная матрица, гранулометрический состав, новообразования, обменные катионы

**Key words:** Information on the biosphere and soil, soil management, solid-state media in the soil, soil matrix, grain composition, tumors, exchangeable cations

Существование любой системы обусловлено, наряду с другими факторами, управлением этой системой. Управление определяется той информацией, которая поступает к различным компонентам системы и вызывает соответствующее действие и поведение этого компонента.

Информацию определяют как обмен сведениями между людьми, человеком и автоматом, автоматом и автоматом, обмен сигналами в животном мире и между растениями, передачу признаков от клетки к клетке, от организма к организму. Информация – объективное содержание связи между взаимодействующими материальными объектами, проявляющееся в изменении состояний этих объектов. Информация – главный компонент в управлении системами, в том числе и экосистемами. Как установили В. В. Докучаев, Г. Ф. Морозов, В. Н. Сукачев, Г. Иенни, в экосистеме эдификатором её, следовательно, «управленцем», можно считать растение. Растение определяет структуру экосистемы и почвы, взаимодействие других компонентов. Оно привлекает консументов, находится в симбиозе с определёнными грибами и т. п.

Но если рассматривать почву как подсистему в экосистеме, то в ней также должен быть свой «управляющий» механизм. Наиболее чёт-

ко поставил вопрос об «управлении» почвой, как системой А. И. Морозов [1], хотя его гипотеза вызывает у многих возражение. Он считает, что почва – это грибной полис, где грибы управляют почвой как единой системой. Они регулируют рост растений, состояние воды в почве, вырабатывают токсические вещества, влияющие на состав биоты в почве и пр. Они способствуют формированию пулов микроорганизмов, питательных веществ, их перемещению в разные точки почвенных горизонтов. Но в такой трактовке грибы скорее выступают в роли «управляющих» всей экосистемой, а не только собственно почвой.

Любая система требует, чтобы в ней по каналам связи обращалась информация, которая включает или выключает разные процессы и механизмы. Следует сразу уточнить, что многие авторы (Я. А. Пачепский, Ф. И. Козловский, И. П. Айдаров, А. С. Фрид и др. [цит. по 1, 2]) рассматривают возможности управления почвой человеком, а не рассматривают «самоуправление» почвы своими функциями, в том числе экологическими [2 – 4].

Почва – биокосное тело, в формировании которого ведущую роль играют организмы. В то же время почва – это система горизонтов, система взаимодействия разных фаз (твёрдой,

жидкой, газообразной). Почва также система экологических функций. Если почва – система, то что-то управляет её функциями. Поскольку почва – подсистема в биокосной экосистеме, то частично такое управление связано с воздействием растений, бактерий, грибов. Но вполне возможно, что за разные функции почвы отвечают разные компоненты, которые посылают информацию для включения соответствующих механизмов (процессов). Считается, что наличие биологической информации и есть то «нечто», что отличает живые объекты от неживых и определяет «биологическую специфику» [2]. «Включение» разных ферментов происходит после получения геномом сигнала о необходимости данного фермента. Появляется белок, построенный «по плану», который предусматривает целесообразное использование объекта. Сам «план» (то есть информация о структуре) создаётся в процессе эволюции биосферы, сохраняется в геноме и передаётся потомству.

В неживой природе также существуют процессы запоминания и передачи информации от более простой к более сложной форме, информации с точным «планом» последующих действий. Примером могут быть кристаллы. Формирование крупного кристалла с вполне определённой формой, огранкой и есть запоминание электронной структуры исходного кристалла-зародыша и передача этой информации в пространстве и времени, что и приводит к образованию его макроформы. Это означает, что не только в клетках организмов, но и в абиотической среде осуществляются процессы репликации, трансляции, создания симметрии. В процессе «эволюции» кристалла, т. е. его роста, часть признаков теряется, некоторые могут иметь несколько вариантов в зависимости от условий внешней среды. Так, обычно существует несколько цветовых модификаций минералов.

Процессы передачи информации можно наблюдать и в почве. Почва – это тонкий экзогенный слой планеты Земли, который существует тысячелетия, возобновляется и является местом обитания всего живого на суше. Геологическая порода в зависимости от факторов почвообразования, получая от них «определённую информацию», формирует почвы. Варьирование количественных показателей факторов почвообразования приводит к варьированию свойств почв на данной территории. Разная информация, поступающая от факторов, приводит к формированию разных почв. Так, в разных климатических условиях

на сиаллитных осадочных породах образуются подзолистые, дерново-подзолистые, серые, бурые лесные, каштановые почвы, чернозёмы, серозёмы. Однако на сиаллитных породах не появляются ферраллитные почвы.

Почва сохраняет признаки, которые говорят о предыдущих этапах её развития, роли почвы в эволюции биосферы, свойствах окружающей среды (климат, растительность, геологические породы, рельеф, влияние человека).

Теоретически следует выделить следующие типы информации, хранящейся в почве. Информация для человека – «сигналы» об уровне плодородия почвы для тех или иных культур, информация о наиболее рациональном использовании почвы. Информация для ландшафта – способность почвы управлять сохранением и восстановлением зонального ландшафта [5]. Информация для самой почвы – сохранение и восстановление свойств почвы в процессе функционирования экосистемы, управление почвой как системой.

### Запоминание информации

Чтобы информация влияла на функционирование системы, она должна где-то храниться в пределах системы. Практически информация есть запомненный выбор одного варианта из нескольких возможных и равноправных. Слово «запомненный» относится к фиксации информации. Выбор может и не запоминаться, т. е. тут же забываться. Такой выбор называется микроинформацией [5]. В почвоведении существует аналогичное понятие «почва–момент». Запомненный выбор, в отличие от незапомненного, называется макроинформацией, аналогия в почвоведении «почва–память» [4]. Во всех информационных процессах используется запоминаемая информация. Поэтому информацию можно представить так: запоминаемый выбор одного варианта из нескольких возможных и равноправных (но не равновероятных).

Измерить информацию позволяет формула К. Шеннона:

$$I = -P(i) \log_2 P(i),$$

где I – количество информации; P – вероятность; i – состояния явления.

Обычно используют условную вероятность (частоту), т. к. истинную вероятность на практике в природных экосистемах невозможно определить. В этих случаях используют условную вероятность для выбранной исследовате-

лем системы частоты появления того или иного значения данного свойства. Поскольку вероятность разных состояний признака различается как для одной почвы, так и для разных почв, то общая информация от данного свойства почвы оценивается по сумме информации, содержащейся в отдельных проявлениях признака:  $I = -\sum P(i) \log_2 P(i)$ .

Запоминание какой-либо информации в почве может осуществляться только твёрдой фазой почвы. Другие фазовые состояния почвенного вещества (газ, жидкость) слишком динамичны, в них существует «молекулярный хаос», и они не могут сохранять информацию продолжительное время. Следовательно, в почвенной экосистеме носителем информации может быть только твёрдое вещество, а микроинформации (в смысле незапоминания) – также и газообразное и жидкое вещество.

Свойством запоминания могут обладать только системы, состоящие из многих атомов. Запомнить что-либо, располагая одним атомом, невозможно, поскольку отдельный атом может находиться лишь в одном устойчивом состоянии. То же относится и к простейшим молекулам. Наименьшая по своим размерам самая простая система, которая может запомнить один вариант из двух возможных, – это молекула, которая может находиться в двух различных состояниях, например, изомерных. В организмах – это хиральные (спиральные) молекулы, которые существуют в двух формах: правой (D) и левой (L). В почве наиболее информативно состояние молекул, связанное со степенью их подвижности, в частности, их адсорбция. Так, молекулы воды могут находиться в адсорбированном, парообразном, жидком состоянии или же в кристаллической структуре, и свойства воды в этих состояниях различные. Адсорбционная вода, по сравнению с жидкой, меняет свои диэлектрические свойства. Величина максимальной гигроскопической влаги характеризует удельную поверхность почвы, размеры почвенной матрицы. Количество жидкой воды, точнее, её потенциал, информирует о её доступности растениям и микроорганизмам.

Важно отметить, что память – момент посылает информацию запомненной памяти (твёрдой фазе). Так, многие почвенные процессы начинаются с реакции твёрдой фазы на концентрацию разных веществ в жидкой фазе. Концентрация веществ в почвенном растворе определяется их растворимостью. Но отношение концентраций элемента в твёрдой и жидкой фазах представляет собой усреднённую ве-

личину отношений разных соединений, включающих данный элемент. Значение этого отношения даёт важную информацию исследователю. Но само повышение или понижение содержания элемента в растворе передаёт информацию твёрдой фазе и изменяет содержание в ней данного элемента. Очевидно, изменение концентрации веществ в почвенном растворе – один из элементов управления почвой как системой. Это управление осуществляется твёрдой фазой почвы, а именно её матрицей, её кластерами, и, ещё более конкретно, активными центрами.

Таким образом, для почвы информация – условная величина, которая может пониматься как пропускная способность канала связи, как «информационная ёмкость» или «информационная тара», которые характеризуются количеством обменных мест в почвенном поглощающем комплексе (его ёмкостью) или его селективностью по отношению к катионам и т. д. Количество информации, содержащейся в твёрдой фазе почвы, можно оценить по спектру активных центров с разной энергией удерживающих аммиак (молекула-тест на кислотные центры), по обменным катионам, по гранулометрическому составу.

Согласно К. Шеннону, считается, что чем больше вероятность данного сообщения, тем меньше неопределённость относительно действительного появления и, следовательно, тем меньше информации оно несёт. Если вероятность появления сообщения – единица, т. е. его появление достоверно, то неопределённости нет, и считается, что сообщение не несёт информации. Когда появление всех рангов равновероятно, например, 0,1 для 10-и вариантов, то средняя мера количества информации максимальна (3,32 бита), и максимальна неопределённость этой системы (табл. 1).

В природных экосистемах, например, в почвах, чаще встречаются разновеероятностные сообщения. Так, разные по активности центры минеральной матрицы в разных почвах появляются с разной частотой. В дерново-

**Таблица 1**  
Зависимость количества информации от ранжирования свойств системы

Число рангов	Вероятность	$\sum P_i \log P_i$ , бит
1	1,00	0
2	0,50	1,00
3	0,33	1,60
4	0,25	2,00
5	0,20	2,32
10	0,10	3,32

Таблица 2

Средняя мера количества информации по активным центрам почвенной минеральной матрицы

Почва, номер разреза	Горизонт	Ранги активных центров по силе					H (биты)
		Очень слабые	Слабые	Средней силы	Сильные	Очень сильные	
Чернозём обыкн., р. 2	A1	0,168	0,472	0,428	0,312	0,216	1,60
	BC	0,472	0,504	0,530	0,332	0,185	2,02
Чернозём слитой, р. 27	A1	0,382	0,532	0,525	0,269	0	1,71
	B	0,312	0,528	0,529	0,422	0,066	1,86
	BC	0,522	0,494	0,53	0,367	0	1,91
Чернозём типичный	A1	0,464	0,528	0,528	0,35	0	1,87
	B	0,449	0,492	0,531	0,359	0,117	1,95
	BC	0,444	0,537	0,531	0,347	0	1,86
Дерново-подзол., р. 3М	A1	0	0,444	0,515	0,367	0	1,33
	A1E	0	0,382	0,47	0,510	0,167	1,53
	B1	0	0,522	0,536	0,515	0,190	1,76
	C	0,473	0,524	0,526	0,422	0	1,94
Дерново-подзол., р. 10М	A1	0	0,515	0,489	0,464	0	1,47
Дерново-подз., р. 15М	A1	0	0,515	0,53	0,510	0,243	1,80
	E	0,243	0,524	0,528	0,464	0,152	1,91
Дерново-глеевая	A1	0,152	0,515	0,495	0,411	0,152	1,72
Пирогенная (Камчатка)	A1	0	0,445	0,505	0,500	0,269	1,72
Бурая лесная 1	A1	0	0,488	0,515	0,519	0,112	1,63
Бурая лесная 2	A1	0	0,524	0,512	0,445	0,152	1,63

подзолистых нет «очень слабых» центров [6]. Для 5-и разновеероятных событий (5 рангов активных центров по силе), создаваемых почвенной минеральной матрицей, рассчитали количество информации (табл. 2). В почвах гумидной зоны выше вероятность и степень определённости в появлении сильных и средних по силе центров и отсутствии очень слабых центров, поэтому количество информации меньше. В чернозёмах выше неопределённость в появлении центров разной силы, поскольку там встречаются активные центры слабой и средней силы почти с равной вероятностью. Поэтому количество информации в чернозёмной почвенной матрице больше по сравнению с матрицей дерново-подзолистых почв, где ярко выражен один максимум.

Почвообразующие породы имеют максимальную степень неопределённости (1,95 бит – для дерново-подзолистых почв и 2,02 бит – для чернозёмов выщелоченных слитых). В верхних гумусовых горизонтах значение количества информации по активным центрам минеральной матрицы – минимально. Это означает, что в процессе почвообразования происходит «предпочтительный выбор» (создание и уничтожение) некоторых активных центров, часть центров начинает заметно преобладать, и тем самым уменьшается ко-

личество информации. Изменение минеральной матрицы в процессе почвообразования наиболее сильно идёт в дерново-подзолистых почвах. В чернозёмах количество информации по горизонтам более выровнено, чем в дерново-подзолистых почвах. Все почвы, по сравнению с почвообразующей породой, – более организованная система, более предсказуемая в проявлении свойств минеральной матрицы. Количество информации, источником которой служат обменные катионы, уменьшается в ряду почв: бурая лесная – солонец – дерново-подзолистая – чернозём – краснозём – торфяно-глеевая (табл. 3). Минимум информации содержится в торфяно-глеевой почве, где очень высока насыщенность почв обменным водородом. Максимум информации характерен для бурой лесной почвы, где вероятность появления магния, кальция, водорода и алюминия близки.

Анализ состава гумуса показывает (табл. 4), что наименьшая информация содержится в гумусе бурых лесных и ферраллитных почв. В горизонтах A информации больше, чем в подстилающих этот горизонт слоях всех почв. Наибольшая информация содержится в гумусе типичного чернозёма. В зависимости от типа почв информационная ценность отдельных составляющих гумус групп изменяется. Для

Таблица 3

Содержание обменных катионов (а – мг-экв/100 г почвы, б – % от суммы катионов) в суглинистых почвах и общее количество информации (I, бит)

Почва	Почвенный горизонт	Ca		Mg		H+ Al		Na		I = Σ i
		а	б	а	б	а	б	а	б	
Дерново-подзолистая	A1	3,2	49	1,4	24	2	27	0	0	1,23
Чернозём типичный	A	39	87	6,0	13	0	0	0	0	0,56
Солонец	A	27	53	20	40	0	0	4	7	1,29
Солонец	B	10	18	32	59	0	0	12	22	1,38
Краснозём	A	1,9	10	4,3	24	12	66	0	0	1,23
Бурая лесная	A	9,8	37	7,4	28	9	34	0	0	1,57
Торфяно-глебовая	A0	7	4,7	0,6	0,4	140	95	0	0	0,32

Таблица 4

Количество информации, содержащейся во фракционном составе гумуса почв

Почва	Почвенный горизонт	С фракции ГК		С фракции ФК		Нерастворимый остаток		I = -Σ p <sub>i</sub> log <sub>2</sub> p <sub>i</sub> (бит)
		%	p log <sub>2</sub> p	%	p log <sub>2</sub> p	%	p log <sub>2</sub> p	
Дерново-подзолистая	A0	26	0,50	23	0,49	51	0,49	1,48
	A1	34	0,53	34	0,53	32	0,52	1,58
	E	19	0,46	52	0,49	29	0,52	1,47
Дерново-подзолистые, разные парцеллы	A1	32	0,52	49	0,50	19	0,46	1,48
	A1	21	0,47	43	0,52	36	0,53	1,52
	A1	27	0,51	39	0,53	34	0,53	1,57
	A1	24	0,49	41	0,53	35	0,53	1,55
	A1	32	0,52	44	0,52	24	0,49	1,53
Чернозём типичный	A1	36	0,53	25	0,50	39	0,53	1,56
	Bк	25	0,50	38	0,53	37	0,54	1,57
Чернозём южный	Aпах	33	0,53	15	0,41	52	0,49	1,43
	B	37	0,53	20	0,46	43	0,52	1,51
	C	19	0,46	32	0,52	49	0,50	1,48
Бурая лесная	A	25	0,50	26	0,50	49	0,50	1,50
	B	14	0,40	40	0,53	46	0,51	1,44
Красная ферралитная	A1	18	0,44	37	0,53	45	0,52	1,49
	B1	7	0,27	59	0,45	40	0,53	1,25

подзолистых почв большую ценность представляет информация, содержащаяся в фульвокислотах, для чернозёмов – в гуминовых кислотах. Возможно, что один из механизмов управления почвой для подзолистых почв осуществляется через фульвокислоты, а для чернозёмов – через гуминовые.

### Ценность информации

Ценность информации зависит от цели. Так, например, для агронома ценной информацией может быть состав питательных элементов в почве, доступных для растений, влажность почвы, прогноз погоды. А для выращи-

вания овощей в придорожной и пригородной зоне – ещё и содержание тяжёлых металлов. Для лесовода – уровень грунтовых вод, гранулометрический состав почвы. Для мышей, многих беспозвоночных – мощность и свойства подстилки. Для корней растений и червей – плотность почвы. Так, в почвенные горизонты с плотностью 1,4 г/м<sup>3</sup> и более корни и черви почти не проникают. В этом случае, например, у сосны корни проявляют столь редкий для растений отрицательный геотропизм и идут вбок и вверх, распространяясь в более рыхлом слое.

Чем в большей мере информация помогает достижению цели, тем более ценной она счита-



ется. Если цель достижима несколькими путями, то ценность определяется по уменьшению материальных или временных затрат, благодаря использованию информации. Пока можно оценить важность для человека информации, заключённой в разных признаках почвы. Например, самый быстрый путь дать оценку почвенных свойств – определить цвет почвы и гранулометрический состав в полевых условиях – это буквально 1–5 минут. По временным затратам это самая ценная первичная информация о почве. Обработка информации производится с определённой целью, которая и определяет ценность информации. Но следует сразу отметить, что ценность информации определяется вероятностью события, т. е. снова по формуле К. Шеннона. Мера информации (её количество) и её ценность абсолютная – одно и то же понятие для данного свойства. Но есть вторая ипостась ценности информации: важность данного свойства для почвообразования, функционирования почвы, получения урожая. В этом случае информация приобретает ценность, обусловленную ценностью данного свойства. Например, содержание «валового железа» (всех соединений железа) в почве для растения не имеет существенной ценности. В карбонатных почвах валового железа не меньше, чем в кислых. Однако именно на карбонатных почвах отмечается хлороз растений от недостатка железа в листьях. Следовательно, более ценной для растений и растениевода можно считать информацию о доступных соединениях этого элемента.

*Ценность информации субъективна*, поскольку зависит от субъекта, который определяет цель. Количество информации, имеющей нулевую ценность для потребителя, как правило, не мало по сравнению с количеством информации, имеющей хоть какую-то ценность (положительную или отрицательную). Просто она адресована разным заказчикам и поэтому может быть нулевой или ценной. Так, для почвоведов наиболее ценную информацию содержит классификация почв. В то же время выделение «бурых лесных почв Урала» имеет информационную ценность для почвоведов всей страны, кроме почвоведов Урала. Они и так знают, что изучаемые ими почвы находятся на Урале. Но, как уже отмечалось, существует «естественная информация», управляющая почвообразованием. Она может определить развитие почв в лесной зоне: по болотному, подзолистому или бурозёмному типу.

Таким образом, абсолютная ценность информации определяется её количеством по

формуле К. Шеннона, а субъективная ценность – ценностью признака, явления для потребителя информации.

*Ценность информации эволюционирует*: неценная информация становится ценной, бессмысленная – осмысленной, и наоборот. Невольное отождествление просто информации с ценной или осмысленной приводит к недоразумениям, например, в коллекционировании. Долгое время Красная книга создавалась для исчезающих видов только животных и растений. И совсем недавно, в конце XX века, появилась Красная книга почв. Хотя к этому времени почвы очень сильно изменились, в частности загрязнились, и представляют собой совсем уже другие – антропогенные или техногенные почвы. Таким образом, недооценка почвенной информации или неосознание её ценности привели к потере эталонных образцов почв. При этом ещё в полной мере не определены информационные требования к Красным книгам: фиксировать раритеты, исчезающие участки почв или основные типы почв как естественные модели естественного почвообразования. Возможно совмещение обоих подходов.

### Иерархия информационных уровней

Ценная информация, которой мы пользуемся, принадлежит верхнему структурному уровню. Например, агрегатное состояние, пористость почвы, число горизонтов, границы переходов, характеристики гумуса. А складывается она из всех предыдущих уровней. Информация первого уровня («молекулярный» уровень) – необходимый первичный набор информации, из которого вырастает информация второго уровня – почвенных частиц, третьего – почвенных агрегатов, четвёртого – почвенных морфонов, пятого – почвенных горизонтов, шестого – почвенного профиля и седьмого – почвенного покрова.

Когда почва находится в неустойчивом состоянии, она делает выбор из множества различных вариантов и далее развивается устойчиво вплоть до следующей бифуркации (неустойчивое состояние). Здесь она снова делает выбор. Но уже из другого множества вариантов. Это множество зависит от результата первого выбора. Поэтому информацию, лёгшую в основу выбора, можно считать вторым уровнем информации. Следующий выбор будет уже третьим уровнем информации. Например, в гумидной зоне на сialлитной породе почвообразование может идти по бурозёмному

или подзолистому типу (первый информационный уровень). Если процесс пошёл по подзолистому типу, то дальше происходит выбор между дерново-подзолистыми, подзолистыми, подзолисто-глеевыми и другими подобными почвами. Такие почвенные бифуркации рассмотрены с точки зрения кризисных состояний системы Арманом и др. [7].

**Условная и безусловная информация**

Твёрдая фаза почвы, в которой зафиксирована та или иная информация, является её носителем. Информация может существовать только в зафиксированном состоянии. При этом способы фиксации могут быть условными и безусловными.

Но носителями информации в почве также служат почвенные растворы и почвенная биота, включая корни растений. Они влияют на твёрдую фазу, изменяя характер информации – управления, хранящейся в твёрдой фазе почвы.

Безусловной является информация о реально происходящих событиях. Она не нуждается в участии человека и передаётся из окружающей действительности. Условная информация – это введённое человеком ранжирование объектов, созданная им классификация объектов, в том числе почв, система аналитических методов для характеристики таких свойств почв, как содержание питательных веществ, гранулометрический состав и пр. Например, если мы имеем одно значение свойства (вероятность 1), то количество информации равно 0. При увеличении количества рангов уменьшается вероятность и увеличивается количество информации (табл. 5).

Следовательно, от нашего подхода зависит оценка информации, заключающейся в том

или ином свойстве почв, факторе почвообразования, элементе ландшафта.

Принято думать, что, изучая почвы, мы рецептируем (передаём) безусловную, вполне объективную информацию. Это не всегда так. Часто об одном и том же свойстве мы судим, используя разные методы их определения (например, содержание гумуса, подвижных соединений азота, калия, фосфора и пр.). Неутихающие споры по поводу классификации почв и появление новых классификаций свидетельствуют как раз о генерации условной информации. Спор по поводу почвенных водных констант: можно ли их считать константами в прямом значении этого слова – пример развития условной информации так же, как отнесение данного профиля почвы к тому или иному таксону.

Так, существуют расхождения в отнесении почв к подбурам, к подзолистым, к лессивированным почвам. Часто спорно отнесение, особенно пахотных почв, к чернозёмам или тёмно-серым почвам, к светло-серым или к дерново-подзолистым и т. д.

**Информационные процессы в почвоведении**

Почва – это результат воздействия пяти факторов почвообразования (по В. В. Докучаеву): породы, рельефа, климата, живых организмов и времени. Сейчас ещё добавляется и антропогенный фактор почвообразования. Воздействие каждого из этих факторов запоминается почвой в виде явных или еле заметных признаков. Носитель этой информации – твёрдая фаза почвы. Она включает сами частицы, а также их поверхностный слой – матрицу и почвенный раствор, который зависит от твёрдой фазы почвы, и, кроме того, от влажности почвы, её температуры, подкисления

Таблица 5

Информация о гранулометрическом составе суглинистых почв

Почва	Почвенный горизонт	Размеры фракций, мм						I = -Σplog <sub>2</sub> p
		1-0,05		0,05-0,01		<0,01		
		%	plog <sub>2</sub> p	%	plog <sub>2</sub> p	%	plog <sub>2</sub> p	
Дерново-подзолистая	A1	19	0,45	48	0,51	33	0,53	1,49
	A2(E)	10	0,33	57	0,46	33	0,53	1,32
	B	11	0,35	47	1,09	42	0,52	1,38
Чернозём	A	11	0,35	44	0,52	45	0,52	1,39
	B	10	0,33	38	0,53	52	0,49	1,35
Солонец	A	15	0,41	49	0,5	52	0,53	1,44
	B	9	0,31	32	0,52	36	0,45	1,28

Таблица 6

Приуроченность разных почв к геологическим породам, %

Почвы	Породы			
	кислые	основные	ультраосновные	карбонатные
Подзолистые	85	10	0	5
Бурые лесные	30	30	20	10
Чернозёмы	60	0	0	40
Каштановые	100	0	0	0
Серозёмы	100	0	0	0
Краснозёмы	0	80	20	0

почвы растением и пр. Анализ водопроницаемости дерново-подзолистых суглинистых почв показывает, что для горизонта Е в 25% случаев водопроницаемость ниже 1 мм/мин, а в 75% случаев выше. Для горизонта же В водопроницаемость почв выше 1 в 100% случаев. Поэтому информация от горизонта В по водопроницаемости равна 0, а от гор. Е – 0,81 бит, что позволяет предположить достаточно низкую возможность фронтального переноса ила в этих почвах.

### Почвообразующая порода

Развитие почв в истории Земли началось с геологической породы, которая часто принимается за ноль-момент. Те признаки, которые почва накапливает за время развития её в полноразвитый профиль, и есть отражение условий почвообразования. Однако почва развивалась из геологической породы не всё время, уже первичные почвы могли служить ноль-моментами для развития других почвенных разностей и т. д. Или почвообразование заново начиналось на месте эрозийного сноса предшествующих почв, после пожаров. Иногда гумусовый горизонт образовывался на аэральных наносах, которые состоят не только из минеральных, но и частиц, сорбирующих на себе гумус, принесённых из другого региона. В таких случаях исходная порода – более сложная по сравнению с минеральной породой, обычно рассматриваемой как ноль-момент для почвообразования [8].

Информация об изменении геологической породы в почвообразовании зафиксирована в самих элементарных частицах (факт разделения их по размеру и присутствие среди них биоморф, пыльцы, новообразованных минералов) и в почвенной матрице, т.е. в поверхностном слое частиц. Свойства и функции в почве этих двух составных частей твёрдой фазы настолько различны, что их следует рассматривать отдельно.

Считать, что твёрдая фаза породы определяет все пути развития почвы, было бы неверно. Показано, что при изменении внешних условий развития (без изменения характера твёрдой фазы), т. е. на одной и той же материнской породе, могут развиваться совершенно разные почвы (табл. 6). Отсюда следует, что твёрдая фаза ещё не фиксирует единственный возможный путь развития, но допускает варианты направлений. Свойства твёрдой фазы могут накладывать лимит на многие почвенные процессы.

Размеры удельной поверхности, или степень дисперсности породы, создают границы, в которых могут существовать формы структуры (табл. 7).

Почвенные процессы изменяют твёрдую фазу почвы в сторону увеличения её дисперсности, размеров. Однако исходная удельная поверхность почвы лимитирует и этот процесс. Так, гранулометрический состав горизонтов не может изменяться сильно при почвообразовании, т. е. песок не может перейти в суглинок или, наоборот, глина не может перейти в супесь и т. п. Причина формирования слоёв разного гранулометрического состава, отличающихся на уровне ранга (песок, суглинок, глина), – всегда геологическая, но не почвенная. На этом лимитирующем действии твёрдой фазы почвы построена концепция дерново-подзолистых почв на двучленах. То есть подзолистый горизонт сформировался из другой породы с небольшой по развитости минеральной матрицей, меньшей по сравнению с породой нижележащих горизонтов [6].

Очевидно, дополнительным источником информации, перерабатываемой в процессе развития почв, служат внешние по отношению к твёрдой фазе факторы: климат, растительность, деятельность человека. Важную информацию несёт гранулометрический состав нижних горизонтов почв. Эту информацию можно использовать для оценки степени

Таблица 7

Сопряжённость типов почв и почвенных агрегатов (агрегатной структуры)

Тип почвы	Горизонт	Плитчатая	Столбчатая	Призматическая	Ореховатая	Зернистая	Комковатая	Глыбистая	Пылеватая	Микроагрегаты
Подзол	Е	х	–	–	–	–	х	х	х	–
	В	–	–	х	–	–	–	–	–	х
Дерново-подзолистая	А1	х	–	–	–	х	х	х	х	х
	В	–	–	х	–	–	–	х	х	х
Солодь	АЕ	х	–	х	–	–	х	–	х	–
	В	–	–	х	–	–	–	х	–	х
Солонец	А	х	–	х	–	–	х	х	х	х
	В	–	х	х	–	–	–	х	–	х
Серая лесная	А	–	–	–	х	х	х	–	–	х
	В	–	–	х	х	–	–	–	–	х
Чернозём	А	–	–	–	–	х	х	х	х	х
	В	–	–	х	–	х	х	–	–	х
Каштановая	А	–	–	–	–	х	х	х	х	х
	В	–	–	х	–	–	–	–	х	х
Серозём	А	–	–	–	–	–	х	х	х	х
	В	–	–	х	–	–	х	х	х	х
Краснозём	А	–	–	–	–	–	х	х	–	х
	В	–	–	–	–	–	х	х	х	х
Бурая лесная	А	–	–	–	х	–	х	х	х	х
	В	–	–	х	–	–	х	х	х	х

Примечание: х – присутствие агрегатов данного типа.

неоднородности почв, оценки отдельных фракций, их роли в почвообразовании.

**Растительность, микроорганизмы**

Почвенная биота принимает самое энергичное участие в почвообразовании, в формировании почвенного профиля. Как известно, по предложению Л. Г. Раменского, в почве выделяют литогенные, палингенетические и ценогенетические свойства. Литогенные обязаны своим происхождением почвообразующим породам и хранят информацию о свойствах этих пород. Ценогенетические свойства отражают влияние современной экосистемы. К ним можно отнести флуктуации в содержании гумуса, в значениях рН, плотности почв и пр. Ценогенетическими свойствами можно считать содержание в верхних горизонтах почвы пыльцы, фитолитов и пр. Однако со временем, особенно при сукцессиях экосистем, ценогенетические свойства становятся палингенетическими. Они уже не соответствуют современной экосистеме, современной почве и сохраняют информацию о развивавшихся ранее в данном ландшафте экосистемах, в настоящее время уже исчезнувших. Как уже отмечалось выше, многие свойства почвы анало-

гичны «филогенетическим свойствам», являясь памятью об эволюции почвы от геологической породы до данной почвы. Пыльца растений может сохраняться долгое время в почве. По палинологическому спектру можно диагностировать растительность, в условиях которой развивалась почва много лет назад. Биоморфный анализ – исследование микроскопических частиц биогенной природы, которые обладают высокой сохранностью в почве. Благодаря этому их возможно уверенно диагностировать. Биоморфы – фитолиты, пыльца, спикулы, растительный детрит и др. – формируют биоморфную память почв.

Биоморфы относятся к почвенным включениям, представляющим собой сохранившиеся остатки животных организмов и растений. Они не влияют на функционирование почвы, но их можно считать палингенетическими свойствами почв и само их наличие резко увеличивает информативность гранулометрического состава почв.

Особо следует остановиться на «зоогенных» почвах. Ещё Ч. Дарвин доказал, что верхний слой садовых почв за 10 лет целиком пропускается через кишечник дождевых червей. Данные А. П. Травлеева и Н. А. Беловой [9] показывают, что существуют байрач-

ные почвы (чернозёмы), занятые дубравами, которые в слое 0–4 см и иногда глубже сложены копролитами. Все указанные признаки помогают почвоведу выявить историю развития почв и в то же время показывают, что в почве существует дублирование передачи информации от компонентов почвы к явлению. Так, формирование гумуса почвы сопряжено с гранулометрическим составом почвы (минеральная матрица), климатом (осадки и температура), фитомассой, её переработкой почвенными беспозвоночными и микроорганизмами. Именно множество каналов передачи информации создаёт неопределённость в оценке процессов формирования гумуса.

### Рельеф

На основании результатов профильного распределения биогенного кремнезёма было обнаружено, что подстилающая порода, на которой впоследствии сформировалась бурая лесная почва Шипова леса, находилась в водоёме. В ней присутствовало большое количество спикул губок и радиолярий. А серая лесная почва, расположенная в этом же лесу, развивалась на тех же по гранулометрическому и валовому составу отложениях, но которые не проходили стадию избыточного увлажнения. Таким образом, эти почвы более 2000 лет назад формировались на разных элементах рельефа: бурые лесные – в понижениях, в местах бывших водоёмов, а серые лесные – на водораздельных или склоновых участках. Постепенно рельеф сгладился, и бурые почвы оказались на дренированной выровненной поверхности. В данном примере информационным признаком явились твёрдые частицы биогенного кремнезёма.

### Антропогенное воздействие

Сельскохозяйственная обработка почвы, в частности многовековая вспашка, отразилась в почвенном профиле. В настоящее время многие такие участки заселены лесом и узнать, проходили ли эти почвы стадию пашни, позволяют такие признаки, как чёткая граница при переходе горизонта А в Е или В. Так, наличие гор. АЕ с достаточно ровными верхней и нижней границами в почвах хвойных лесов свидетельствует о том, что территория проходила стадию распашки, сельскохозяйственного использования. Безусловно, в пользу распашки почв свидетельствуют разные антропогенные включения (кирпичная крошка, обломки изделий и пр.).

Однако основной информационный носитель в почве – это твёрдые почвенные частицы. Влияние факторов может быть однонаправленным или разнонаправленным. Последнее означает, что один фактор стирает результат влияния другого фактора, поэтому информация может быть стёрта или оказаться недолгой. Можно сказать, что от факторов в почву может поступать противоречивая информация. Так, растения подкисляют почву, а осадки могут её подщелачивать. Некоторые растения (саксаул) подщелачивают почву. В зоне южной тайги, где распространены подзолистые, дерново-подзолистые и кислые бурые лесные почвы, могут вдруг появиться серые лесные почвы (например, почвы Владимирского Ополя). Здесь фактор «порода» по своему влиянию сильнее, чем фактор «климат».

### Эффект запаздывания некоторых почвенных свойств как механизм памяти в почвах

Явление гистерезиса в почве характерно для ряда почвенных свойств, в том числе для содержания в почве воды. Это пример запаздывания или необратимости почвенных процессов. Если сравним гистерезисную петлю (ширина и высота) сорбционного потенциала воды от относительного давления пара над чистыми минералами с гистерезисной петлёй почвенного минерального горизонта, то можно заметить, что в минералах гистерезис почти незаметен или около нуля. А в почве он очень заметен [10]. Вероятно, гистерезисные явления в адсорбционных процессах свидетельствуют о многих стадиях почвообразования, включая изменение её структурной составляющей. Но эти факты ждут расшифровки.

### Информация управления в почвах

Всё сказанное выше характеризует информацию, на основании которой человек дешифрирует историю почв, их плодородие, специфичность и пр. Но вопрос об управлении почвой как системой остаётся открытым. Когда корни растений потребляют питательные вещества из почвенного раствора, сдвиг в концентрации веществ приводит к тому, что в работу включается твёрдая фаза почвы, её матрица, и восстанавливает концентрацию данного вещества в растворе. При определённом уровне потребления все доступные запасы данного вещества расходуются, и данная

экологическая функция перестаёт работать. Следовательно, получая сигналы от раствора, от почвенного воздуха, твёрдая фаза в ответ регулирует состав этих почвенных компонентов. При этом состав почвенного воздуха регулируют микроорганизмы, педофауна, корни. Количество воды в почве определяют растения, рельеф, климат, а также почвенная матрица, определяющая влагоёмкость почв. Твёрдая фаза имеет набор соединений разных элементов, которые можно ранжировать по растворимости в воде и других растворителях. Следовательно, содержание каждого элемента можно аппроксимировать формулой Шеннона, оценив его по количеству информации, связанной с этим элементом. Информация об элементах, содержащаяся в твёрдой фазе, управляет их доступностью, восполнением их дефицита в растворе. Разнокачественность почвенных кластеров – основа управления почвой. Как уже говорилось выше, одним из главных источников «управляющей» информации может быть почвенная матрица с набором разных кластеров (активных центров). О них можно судить по составу обменных катионов. Анализ информации, поступающей в почву от обменных катионов (матрицы, активных центров), показывает, что наиболее активны в «управлении» почвой (её функционированием, её свойствами) – обменные катионы в дерново-подзолистой почве и солонце (табл. 3, 4). От них в сумме поступает заметно больше информации, чем от обменных катионов чернозёма и краснозёма, где состав обменных катионов менее разнообразен.

### Выводы

1. В биосфере есть информация двух родов. Первая – характеризует развитие естественных биоценологических процессов, в том числе формирование почв. Вторая – необходима для человека, позволяет ему разработать стратегию использования почв (и ландшафтов) для разных целей.

2. Ландшафт содержит информацию, управляющую формированием почв того или иного типа, в том числе образованием несколь-

ких взаимозаменяемых типов почв в одной природной зоне.

3. В эволюционных процессах почва накапливает информацию об окружающей среде (климат, порода, рельеф, растительность, биота, антропогенная деятельность) и запоминает её в твёрдофазных носителях, представленных твёрдыми частицами и структурами. Целесообразно рассматривать почвенную матрицу как ёмкий носитель этой информации.

4. Большую информацию о развитии почв, сукцессиях, смене условий могут дать новообразования (ортштейны, белоглазка), включения (биоморфы), палингенетические свойства почв.

5. Информация, закодированная в твёрдой фазе почв, позволяет почвам восстанавливаться после разных нарушений, реставрируя зональный почвенный профиль, управлять функционированием почвы.

### Литература

1. Морозов А.И. О природе почв // Информационные проблемы изучения биосферы. М.: Наука, 1988. С. 201–230.
2. Соколов И.А., Таргульян В.О. Взаимодействие почвы и среды: почва–память и почва–момент // Изучение и освоение природной среды. М.: Наука, 1976. С. 150–164.
3. Рожков В.А. Почвенная информатика. М.: Агропромиздат, 1989. 222 с.
4. Таргульян В.О., Горячкин С.В. Память почв. М.: URSS, 2008. 692 с.
5. Чернавский Д.С. Синергетика и информация: Динамическая теория информации. М.: Наука, 2001. 244 с.
6. Зубкова Т.А., Карпачевский Л.О. Матричная организация почв. М.: Русаки, 2001. 296 с.
7. Арманд А.Д., Люри Д.И., Жерихин В.В., Раутиан А.С., Кайданова О.В., Козлова Е.В., Стрелецкий В.Н., Буданов В.Г. Анатомия кризисов. М.: Наука, 2000. 238 с.
8. Карпачевский Л.О. Экологическое почвоведение. М.: ГЕОС, 2005. 336 с.
9. Белова Н.А., Травлеев А.П. Естественные леса и степные почвы. Днепропетровск. 1999. 344 с.
10. Зубкова Т.А., Манучаров А.С., Черноморченко Н.И., Шваров А.П., Костарев И.А. Гидросорбционный гистерезис в почвах, минералах и породах // Почвоведение. 2005. № 9. С. 1122–1129.

## Биологические проблемы первых колонизаторов планеты Земля

© 2011. Е. А. Жегалло<sup>1</sup>, к.г.-м.н., с.н.с., В. К. Орлеанский<sup>2</sup>, к.б.н., с.н.с.,  
К. Р. Напольская<sup>3</sup>, аспирант, А. И. Курапова<sup>3</sup>, аспирант,

<sup>1</sup> Палеонтологический институт имени А. А. Борисяка РАН,

<sup>2</sup> Институт микробиологии имени С. И. Виноградского РАН,

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
e-mail: zenova38@mail.ru, orleanor@mail.ru, ezheg@paleo.ru

Рассмотрены вопросы жизни первых колонизаторов планеты Земля (бактерий и цианобактерий), а также вопросы формирования между ними определённых «социальных» отношений, реализуемых как через биохимические вещества-сигналы, так и посредством электромагнитного излучения.

Microorganisms (bacteria and cyanobacteria) are the first colonizers of our planet. They have characteristic properties and features which the Nature used at the stages of biological evolution of the organic world. Bacteria and cyanobacteria have always been living in biocenoses which have social relations. These social relations are the beginning of social relations of the vegetative and animal worlds. Bacteria can use chemical and electromagnetic signals for information.

Ключевые слова: биокolonизация Земли, бактерии и цианобактерии,  
факторы выживания, взаимоотношения

Key words: Earth biocolonization, bacteria and cyanobacteria,  
survival factors, relationship

Ранний этап эволюции Земли всегда привлекал внимание различных специалистов. К настоящему времени показана ведущая роль бактериальных сообществ в образовании первичной биосферы Земли, послужившей основой для дальнейшего развития жизни на нашей планете [1]. В данной работе сделана попытка рассмотреть с точки зрения микробиологии особенности, «находки» и «разработки» Природы, которые сформировались у первых живых колонизаторов нашей планеты в период развития бактериального мира. Авторы полагают, что описываемые особенности затем, в процессе эволюции, стали важными элементами жизни более высокоорганизованных представителей растительного и животного мира.

Принято считать, что Космос существует по единым законам физики, химии и, надо надеяться, по единым законам биологии, хотя прямых данных о внеземной жизни пока нет. Тем не менее астрономы утверждают, что во Вселенной по условиям существования, присутствию биологической жизни может быть около одного миллиарда звёзд похожих на нашу планету. Для образования биологической клеточной жизни обязательно необходим определённый предварительный период времени и специфические геохимические условия, в которых формировались предбиологические структуры, которые сейчас принято называть «мир РНК» [2]. Конечным этапом этого процесса является

образование **морфологически оформленной бактериальной клетки**. В процессе движения материи от простого к сложному это наиболее важное и основополагающее событие. Предполагается, что на планете Земля образование бактериальных клеток завершилось 3,5–3,3 млрд. лет назад [3].

Многими исследователями принимается версия панспермии (заноса живых зародышей из космоса), которая в настоящее время стала доминирующей. Описываемое явление могло происходить и ранее в неохватных просторах Вселенной при формировании в тот период и в тех точках бактериального населения. Авторы считают, что это, как и другие рассматриваемые далее процессы, не является разовым актом, и допускают, что этот процесс многократно происходил в разных пространственных точках с различными вариантами геохимических условий, что привело к биоразнообразию бактерий как по морфологическому, так и по физиологическому параметрам.

Морфология бактериальных клеток более-менее однородна: шаровидные образования или палочки, которые в систематическом отношении разделяются или по физиологическим, или по генетическим параметрам. Имеется набор бросающихся в глаза форм: вибрионы, спирохеты, нитчатые формы и соответственно различные колонильные и плёнчатые образования. Оформление бактериальной

клетки в целостный, морфологически обособленный организм в соответствии с геохимическими условиями места образования обусловил важнейший фактор биологической жизни микроорганизмов, а именно способ общения организма с окружающей средой. Это предопределило **тот или иной способ питания**: литотрофный (хемотрофный), фототрофный (фотосинтез), гетеротрофный (потребление готового органического вещества). Потребность в питании обуславливает **строго определённую экологическую нишу существования**. При этом каждый организм формирует свой **способ закрепления на пищевом участке**. Допуская, что условия в те далёкие времена могли быть аналогичными существующим сейчас, можно предположить, что в проточной среде необходимо было наличие слизи или стебельковых выростов (прообразов корней высших растений) для прикрепления к субстрату. Для того чтобы постоянно быть в толще водной питательной среды, образуются своеобразные газовые вакуоли – прообраз газовых пузырей у рыб. Бентосные организмы приспособились к жизни на дне водоёмов и формируют биоплёнки, в слизи которых устанавливались свои особые взаимоотношения друг с другом. Образовывались пищевые цепочки, в которых одни организмы в биоценозе – автотрофы – образовывали органику, другие – гетеротрофы – потребляли выделяемые готовые продукты.

Природные условия имеют тенденцию к изменению. В связи с этим каждый организм должен обладать **механизмом и диапазоном устойчивости** к колебаниям температуры, солёности, химического состава среды, pH и т. д. В условиях влияния особо неблагоприятных факторов, таких, как пересыхание водоёмов, низкие температуры, отсутствие питательных веществ, микроорганизмы могут впадать в покоящееся состояние – **анабиоз**, позволяющий сохраняться относительно долгое время. В последующей эволюции у растений и ряда животных также наблюдаются в жизненных циклах стадии длительного покоя и даже «впадание в спячку».

Принято считать, что из всех функций микроорганизмов одной из важнейших для обеспечения жизни на Земле является участие в круговороте элементов питания. Микроорганизмы формируют **малый биологический круговорот веществ**, обеспечивая переработку образовавшейся органики. В противном случае биологическая жизнь перестала бы существовать из-за горы трупов тех или иных организмов и отсутствия питательных веществ, которые

задействованы в малом биологическом круговороте. Исходя из этого, можно сделать заключение, что уже в ранний период биологической жизни нашей планеты сложилась закономерность, при которой любой отмирающий организм есть **субстрат-почва** для последующей новой жизни. Гетеротрофы, потребляющие в окружающей среде сложные органические вещества, приспособились **вырабатывать определённые ферменты**, которые разрушают эти вещества, переводя их в доступное состояние.

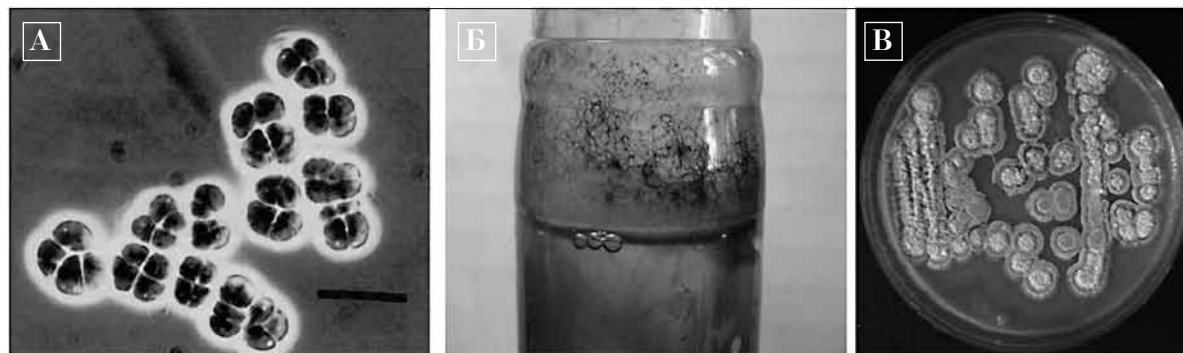
Необходимость постоянного поддержания жизненных функций заставила микроорганизмы образовывать специальные хеморецепторы, указывающие направление, двигаясь в котором, можно «поживиться». Развивалось явление, называемое **хемотаксис** – движение к питательному субстрату. Это также относится и к **фототаксису** – движению к свету (у фототрофных организмов).

**Движение и поиск пищи** в процессе биологической эволюции стали основополагающими факторами становления животного мира. В процессе бактериального развития движение развилось на основе реактивного выделения слизи. Осцилляторные цианобактерии, кроме того, освоили своеобразный способ спиралеобразного движения – ввинчивания в окружающую водную среду. Но, с нашей точки зрения, наиболее прогрессивный метод – это движение с помощью биологических моторов – жгутиков [4]. В дальнейшем этот способ на основе механических колебательных движений наиболее ярко реализовался у рыб и змей.

В период развития на Земле бактериальной флоры произошло ещё одно «революционное» и также основополагающее событие, а именно **выход жизни из воды в газовое пространство и далее на сушу**. Можно с определённой уверенностью сказать, что этот шаг бактерий заставила сделать сама Природа, в результате периодического или постоянного подсыхания тех водоёмов, где обитали бактерии и цианобактерии. Организмы должны были или выжить, или погибнуть. Каждый вид решал суровую проблему выживания по-своему. Наиболее типичным способом для микроорганизмов оказался способ «одевания в слизистую оболочку», что сейчас хорошо иллюстрируют бактерии, растущие на твёрдых агаровых средах и образующие слизистые колонии. Именно слизь предохраняет организмы от быстрого высыхания (рис. 1 А).

Цианобактерии также оделись в слизистые чехлы и в настоящее время уже свободно осваивают воздушные пространства. Работая с культурами цианобактерий, мы постоянно наблюдаем





**Рис. 1.** Выход микроорганизмов в газовое пространство:  
 А – Архебактерия *Methanosarcina* (фазовый контраст, масштаб 10 мкм).  
 Б – Рост нитчатых цианобактерий по стенкам сосуда над питательной средой.  
 В – Колонии актиномицетов на агаре

даем, как осцилляториевые растут по стенкам лабораторной посуды над поверхностью водной среды (рис. 1 Б). В природных условиях представители рода *Nostoc* образуют на почве хорошо выраженные слизистые колонии. Другие могут образовывать пучкообразные колонии, особенно в сырых местах.

Наиболее эффективно, с нашей точки зрения, эту проблему решили мицелиальные актинобактерии (актиномицеты), у которых приспособлением к выходу на сушу явилась дифференциация мицелия на первичный (субстратный) и вторичный (воздушный), способный проникать через границу раздела фаз (водной и воздушной) с выходом и ростом в воздушной среде (рис. 1 В). С образованием спороносного воздушного мицелия актиномицеты получили возможность более эффективно заселять новые территории благодаря распространению с воздушными потоками. Наши эксперименты показали, что некоторые актиномицеты не только приспособились к жизни в воздушной среде, но и могут уже развиваться при экстремально низкой влажности. Например, споры *Streptomyces odorifer* прорастают и мицелий увеличивается в длину даже при экстремально низкой активности воды  $a_w$ -0,50. При показателе  $a_w$ -0,86, когда у растений наступает увядание, у актиномицетов происходит ветвление мицелия, а при  $a_w$ -0,98 – проходит полный цикл развития от споры, развития мицелия до образования спор новой генерации [5].

Таким образом, выход на сушу дал начало новому явлению, которое сейчас называется **ксерофилией**, то есть возможности жизни растений при очень низких значениях влажности. Разделение актиномицетов на субстратный и воздушный мицелий лежит в основе другого явления – **геотаксиса**, которое в процессе биологической эволюции сейчас наиболее ярко проявля-

ется у растений и заключается в том, что корни стремятся вниз, в почву, а плодоносящая часть растёт вверх и формируется в воздушной среде.

Одним из определяющих факторов биологической жизни следует считать особенности **воспроизводства** себе подобного организма. Это удивительное явление природы каждый биологический вид решает по-своему. Наиболее распространённый способ размножения бактерий – деление клетки пополам с образованием поперечной перегородки. Имеются и более «многодетные» виды, когда содержимое клетки делится на несколько частей. Образовавшиеся новые клетки отделяются друг от друга и живут автономно, но могут образовывать колонии, таблички. Ряд организмов формирует при размножении цепочки клеток или нити той или иной длины, которые также распадаются на отрезки (гормогонии у осцилляториевых). Образовавшиеся части продолжают свой рост, увеличивая длину нити снова. В процессе развития бактериального мира методы воспроизводства усложнялись от вегетативного способа до формирования эндоспор или экзоспор из части клетки. У цианобактерий постоянно отмечаются хорошо выраженные споры из одной клетки или наблюдается слияние нескольких клеток в одну спору, окутанную общей оболочкой. Этот метод слияния нескольких клеток впоследствии приобретает важное биологическое значение для воспроизводства более высокоорганизованных организмов.

Каждому индивидуальному организму Природа выделила **свой срок существования**, в пределах общепопуляционного срока жизни данного вида. Для высших организмов этот срок заканчивается обязательной смертью, тогда как для микроорганизмов этот срок не является строго определённым. В условиях обилия пищи бактерии могут жить и размножаться

неопределённо долго. Так, вода в некоторых водохранилищах порой достигала сметанообразного состояния от обилия цианобактерий (явление, известное как «цветение воды»). Микробиологи показали, что с ростом и ухудшением условий питания, в связи с фактором значительного увеличения количества организмов в определённом объёме начинают вырабатываться вещества, сдерживающие рост и переводящие бактериальные клетки в покоящееся состояние (старение клеток) с переходом в анабиоз. Имеются данные, что в соответствующих условиях «спящее состояние» может исчисляться (с сохранением жизнеспособности) тысячами и миллионами лет [6]. Тем не менее отмершие микробные клетки отмечаются как в лабораторных, так и в природных условиях постоянно.

Данные, полученные биологами, показывают, что там, где бактериальных клеток становится более 2-3, между ними начинают складываться те или иные отношения. В этот момент Природа вводит в жизнь новое специфическое явление, а именно формируется **популяционно-социальный фактор**. Социальные отношения складываются как на уровне клеток одного организма (социальный фактор первого порядка), так и на уровне биоценоза (социума) различных видов (социальный фактор второго порядка).

*Социальный фактор первого порядка.* Изучая биологию нитчатых микроорганизмов (в частности цианобактерий), мы отмечаем такое явление, как разнообразие по форме кле-

ток нити. Например, у представителей рода *Anabaena* формируются специальные клетки – гетероцисты с их способностью к азотфиксации (рис. 2 А). У представителей рода *Gloeotrichia* на одной нити формируются специальные зоны споруляции, зона активного деления клеток и зона роста клеток (рис. 2 Б). У цианобактерий *Mastigocladus* наблюдаются клетки, которые ветвятся (рис. 2 В). У актиномицетов формируются два типа мицелия. Отсюда следует вывод, что в одном организме проявляется дифференциация клеток и отдельные клетки начинают выполнять различные специфические функции. Авторы считают, что при дальнейшей эволюции жизни такая **функциональная (и морфологическая. – Ред.) дифференциация клеток** одного организма приводит к появлению различных органов с различными функциями (у животных – печень, сердце и т. д., у растений – стебель, лист и т. д.).

*Социальный фактор второго порядка.* Работая с бактериями и цианобактериями в свете своих чисто профессиональных задач, анализируя свои и литературные данные, авторы пришли к заключению, что микроорганизмы обладают такими типами взаимоотношений, которые воспроизводятся и на более высоких уровнях организации живой материи, а также, с определённой степенью условности, – в общественных отношениях человечества. Нами в микробном мире отмечены следующие взаимоотношения: **конкуренция, антагонизм, паразитизм**. Эти типы «недружественного поведения» возникли

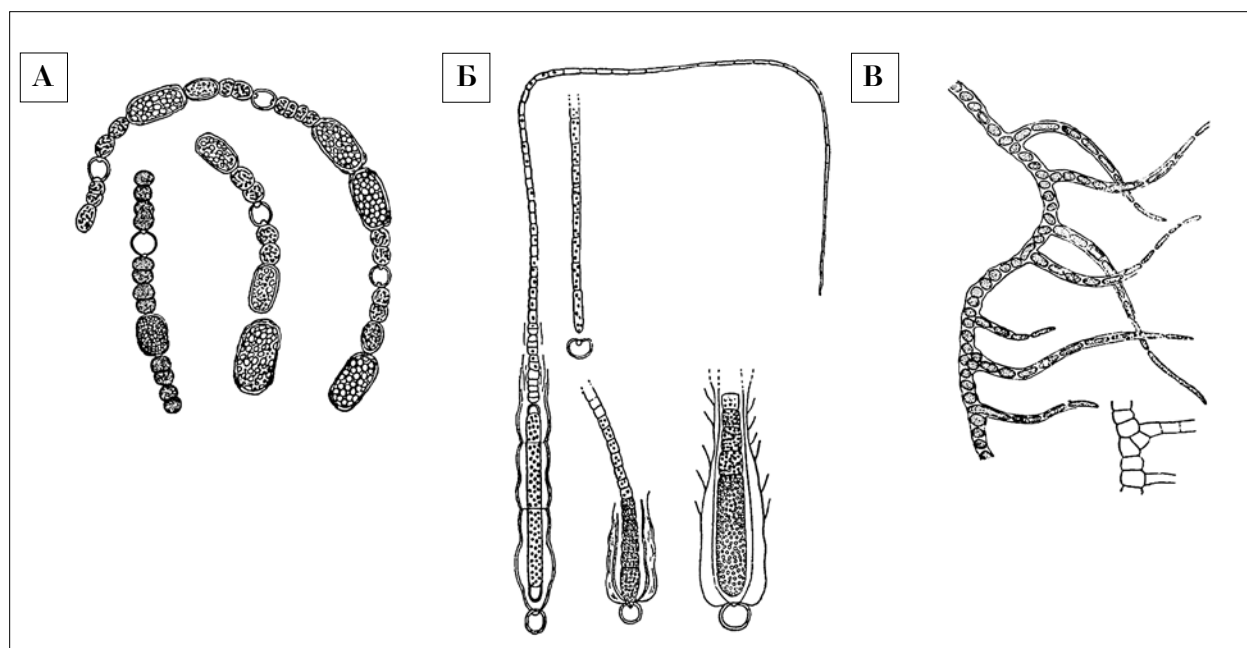


Рис. 2. Клеточная дифференциация у цианобактерий: А – Гетероцисты и споры у рода *Anabaena*. Б – Различные участки трихома рода *Gloeotrichia* (зона споруляции, зона роста). В – Ветвление нитей у рода *Mastigocladus*

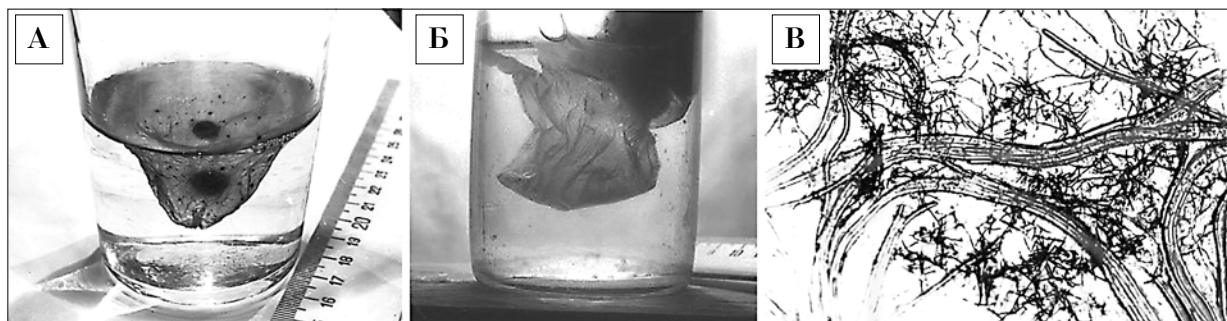


Рис. 3. Особенности поведения цианобактерий:

А – Образование ловчих сетей культурой рода *Oscillatoria*, по Горюновой С. В. [8].  
 Б – Сжатие ловчей сети. В – Совместный рост актиномицетов и цианобактерий (ассоциация)

и обусловлены охраной своей жизненной территории, борьбой за ресурсы и пространство. Примером таких отношений являются антибиотики, отпугивающие или угнетающие рост организмов-конкурентов.

**Нейтрализм, мутуализм** (обоюдная польза). Эти типы взаимоотношений представляют различные переходы отношений совместного существования – от равнодушия до «взаимной любви» (применительно к человеческим понятиям и терминам). Так, в биоценозах часто устанавливается устойчивая пищевая цепочка, когда одни организмы потребляют выделения других.

**Коллективизм.** Результаты полевых и лабораторных экспериментов с цианобактериями дают авторам право утверждать, что цианобактерии, в частности представители р. *Oscillatoria*, живут по законам стаи, формируя при этом различные структуры: ловчие мешки, своеобразные ряды, жгуты и т. д. [7].

Цианобактерии – автотрофы, но они охотно используют органику бактерий. Использование бактериальной органики и даже создание специальных для этого структур – явление, которое С. В. Горюнова [8] отнесла к начальному проявлению бактериального хищничества у цианобактерий (рис. 3 А, Б). Вводимая нами в культуру осцилляториевых взвесь актиномицетов также была оплетена нитями цианобактерий, но в этом случае возможен другой вид взаимоотношений – создание ассоциации [9] (рис. 3 В).

Коллективизм не может существовать без соответствующего информационного поля, создаваемого и воспринимаемого всеми членами социума. «Приказы и распоряжения» в микробном мире могут издаваться, передаваться, и восприниматься как биохимическим, так и биофизическим путями.

По биохимической передаче информации, путём выделения тех или иных химиче-

ских веществ, существует обширная литература. Биофизическая передача информации изучена пока слабо, но уже показана возможность межклеточного, дистанционного взаимодействия (ДВ) микроорганизмов (через стекло, жель, пенопласт и т. д.). Изучен широкий спектр микроорганизмов, относящихся к различным таксономическим группам: бактерии, актиномицеты, водоросли. В экспериментах по выявлению ДВ присутствовали две культуры, культура-излучатель (источник сигнала) и культура-детектор (по воздействию на которую судили о наличии и свойствах ДВ). Возможность механических контактов и обмена химическими сигналами отсутствовала. Показано, что под влиянием ДВ от культуры-излучателя актиномицеты накапливали на 70–110% больше биомассы по сравнению с контрольным вариантом, а водоросли накапливали биомассы на 150% больше. Кроме того, эксперименты показали, что ДВ является средством как внутривидовой, так и межвидовой коммуникации [10, 11]. Механизм передачи информации посредством электромагнитных волн изучен пока недостаточно, но это уже показано как на растениях, так и на животных [12]. В связи с этим интересно отметить, что человечество начало использовать электромагнитные волны как источник информации всего сто лет назад, бактерии же пользуются этим способом с начала колонизации Земли – миллиарды лет. За последнее десятилетие изучение специфики этих био-волн (для человека на уровне передачи мыслей на расстоянии) приобретает уже государственное значение. Имеются сообщения в средствах массовой информации, что военное ведомство США разрабатывает программу управления воинскими подразделениями путём мысленных приказов оператора военного штаба. В России уже создана аппаратура по управлению водителями транспортного средства путём отдачи мысленных приказов [13].

Таким образом, анализируя имеющийся материал, можно заключить, что социальные отношения в сообществах высокоорганизованных живых систем (грибов, растений, животных), а также и человечества были заложены Природой уже в самом начале колонизации планеты Земля – в первичных биоценозах бактериальных и циано-бактериальных сообществ. Можно заключить, что основные типы отношений эволюционировали, но их основа осталась неизменной на протяжении всей эволюции от прокариотных сообществ до отношений между представителями *Homo sapiens* (выживание сильнейшего, нейтраллизм, антагонизм, коллективизм и др.), усложнялись и эволюционировали лишь формы проявления взаимодействий. Образно можно считать, что бактериальная флора есть «оплодотворённые природой яйцеклетки», из которых развился растительный и животный мир.

### Выводы

Обобщая вышесказанное, авторы считают, что на начальном этапе бактериального развития на планете Земля, первых её колонизаторов, Природа наделила эти организмы следующими основными особенностями:

1. Наличие чётко оформленной морфологической структуры, простой по внешнему виду, но очень сложной по внутреннему строению и деятельности.

2. Постоянный обмен веществ с окружающей средой.

3. Необходимость воспроизводства себе подобного организма.

4. Каждый биологический организм имеет свой жизненный цикл и своё время жизни. Бактериальная клетка, впавшая в анабиоз, может сохранять жизнеспособность неопределённо долго.

5. Микроорганизмы (бактерии и циано-бактерии), являясь отдельными самостоятельными организмами, тем не менее живут в сообществе, где формируют свои разнообразные популяционно-социальные взаимоотношения, используя человеческие понятия и термины, от равнодушия до «взаимной любви», от «ненависти» до пищевой цепочки и т. д.

6. Природа в процессе бактериального этапа вложила в эти организмы ряд своих «находок» и «разработок», которые она в дальнейшем будет использовать на последующих стадиях биологической эволюции. Авторы считают, что Природа на стадии бактериального развития биомира расставила «столбы-указатели развития биологической жизни», которые затем превращались в «рабочую программу».

### Литература

1. Розанов А.Ю., Заварзин Г.А. Бактериальная палеонтология // Вестник Российской академии наук. 1997. Т. 67. № 3. С. 241–245.
2. Спирин А.С. Когда, где и в каких условиях мог возникнуть и эволюционировать мир РНК? // Палеонтологический журнал. 2007. № 5. С. 19.
3. Весталл Ф., Велш М. Раннеархейские ископаемые бактерии // Бактериальная палеонтология. М.: Изд-во ПИН РАН, 2002. С. 84–90.
4. Ермилова Е.В., Залуцкая Ж.М., Лапина Т.В. Подвижность и поведение микроорганизмов. Т. 1. Прокариоты. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2004. С. 192.
5. Звягинцев Д.Г., Зенова Г.М., Судницин И.И., Грачева Т.А., Напольская К.Р., Белоусова М.А. Динамика прорастания спор и роста мицелия стрептомицетов в условиях низкой влажности // Микробиология. 2009. Т. 78. № 4. С. 491–495.
6. Воробьева Е.А., Соина В.С., Звягинцев Д.Г., Гиличинский Д.А. Жизнеспособные экосистемы криосферы // Бактериальная палеонтология М.: Изд-во ПИН РАН, 2002. С. 155–168.
7. Орлеанский В.К., Сумин Д.Л., Сумина Е.Л. Биопле синезелёных водорослей (рабочая гипотеза) // Фундаментальные аспекты биологии в решении актуальных экологических проблем. Астрахань: Изд-во КИЦ Полиграф-Ком, 2008. С. 190–193.
8. Горюнова С.В. Явление хищничества у синезелёных водорослей // Микробиология. 1955. Т. 24. № 3. С. 271–274.
9. Зенова Г.М., Омарова Е.О., Курапова А.И., Орлеанский В.К., Шадрин Н.В. Модельные ассоциации *Cyanoprokaryota* и актиномицетов // Альгология. 2010. Т. 20. № 3. С. 312–318.
10. Николаев Ю.А., Плакунов В.К., Филиппова С.Н., Сургучева Н.А., Эль-Регистан Г.И. Взаимодействия микроорганизмов, опосредованные физическими полями // Электромагнитные излучения в биологии «БИО-ЭМИ-2005». Калуга. 2005. С. 213–218.
11. Николаев Ю.А., Орлеанский В.К., Казаков А.Е. Коммуникация в сообществах микроорганизмов – основа общественных отношений высокоорганизованных форм жизни // Бюллетень Московского общества «Испытателей природы». Отдел Биологический. 2009. Т. 114. Вып. 2. Приложение 1. С. 70–73.
12. Будаговский А.В. Дистанционное межклеточное взаимодействие. М.: Изд-во НПЦ «Техника», 2004. С. 194.
13. Белоцерковский Г. Силой мысли // Газета «Поиск». 9.04.2010. № 15 (1080).

*Работа выполнена при финансовой поддержке Программы Президиума РАН «Происхождение биосферы и эволюция геобиологических систем», гранта РФФИ 10-04-01475, 11-04-92202-Монг\_а.*

## Роль и значение природно-ресурсного потенциала при разработке эколого-сбалансированного развития региона

© 2011. А. В. Садов<sup>1</sup>, д. г.-м.н., профессор, О. Б. Наполов<sup>2</sup>, к.т.н., с.н.с.,

<sup>1</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии,

<sup>2</sup> ООО «Газпром-ВНИИГАЗ»,

e-mail: onapolov@list.ru

Даётся характеристика природно-ресурсного потенциала регионов РФ. Приводятся результаты оценки размещения природно-ресурсного потенциала на территории РФ и характеристика различий между регионами РФ по уровню запасов природно-ресурсного потенциала. На основе разработанных авторами количественных и качественных показателей приводится типизация территории по уровню эколого-экономического баланса (на примере Центрального ФО РФ). Приведён прогноз изменения уровня эколого-экономического баланса на территории ЦФО.

The characteristic of the total resource potential of the regions of the Russian Federation is given in the article. The results of placing the resource potential on the territory of the RF as well as the difference between the RF regions in the level of resource potential are shown. The authors have worked out qualitative and quantitative indexes, on the basis of these indexes they classify the territories according to the level of ecological-economic balance (by the example of the Central FD of the RF). The prognosis of change of the ecological-economic balance on the territory of the CFD is given.

Ключевые слова: природно-ресурсный потенциал, эколого-сбалансированное развитие

Key words: natural resource potential, a comparative estimation

В процессе формирования устойчивого развития территории важнейшую роль играют механизмы обеспечения эколого-сбалансированного развития, составными элементами которого являются суммарные запасы природно-ресурсного потенциала и эколого-экономический баланс территории.

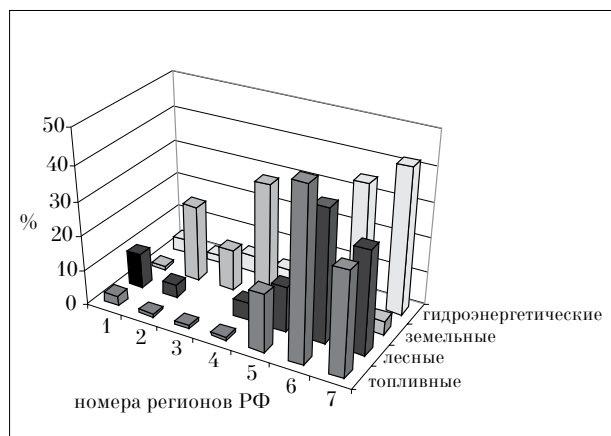
Российская Федерация обладает мощным и разнообразным природно-ресурсным потенциалом, способным обеспечить необходимые объёмы собственного потребления и экспорта. Россия находится на первом месте в мире по запасам большинства природных ресурсов,

в том числе по запасам природного газа, угля, железных руд, ряда цветных и редких металлов, а также по запасам земельных, водных и лесных ресурсов.

Отличительной особенностью территории РФ является её большая протяжённость как с севера на юг, так и с запада на восток, физико-географическая и климатическая зональность, большое разнообразие природных ландшафтов и неравномерное размещение природно-ресурсного потенциала [4].

Большая часть природно-ресурсного потенциала размещена на востоке РФ: Западная и Восточная Сибирь, Дальний Восток; меньшая в западных регионах РФ: Европейский Север, Центральный, Уральский и Южный регионы (рис. 1). Наибольшими запасами топливных, лесных и гидроэнергетических ресурсов обладают Западная, Восточная Сибирь и Дальний Восток; земельными ресурсами – Центральная Россия, Урал и Поволжье. Меньшими запасами топливных, лесных и гидроэнергетических ресурсов обладают Европейский Север, Центральная Россия, Юг России, Урал и Поволжье; земельными ресурсами – Европейский Север и Дальний Восток.

Природно-ресурсный потенциал территории определяется совокупностью всех видов природных ресурсов, которые в настоящее время известны и использование которых в обозримом будущем возможно по техническим критериям. Состав, величина потенци-



**Рис. 1.** Размещение природно-ресурсного потенциала по различным регионам РФ: 1 – Европейский Север; 2 – Центральная Россия; 3 – Юг России; 4 – Урал и Поволжье; 5 – Западная Сибирь; 6 – Восточная Сибирь; 7 – Дальний Восток

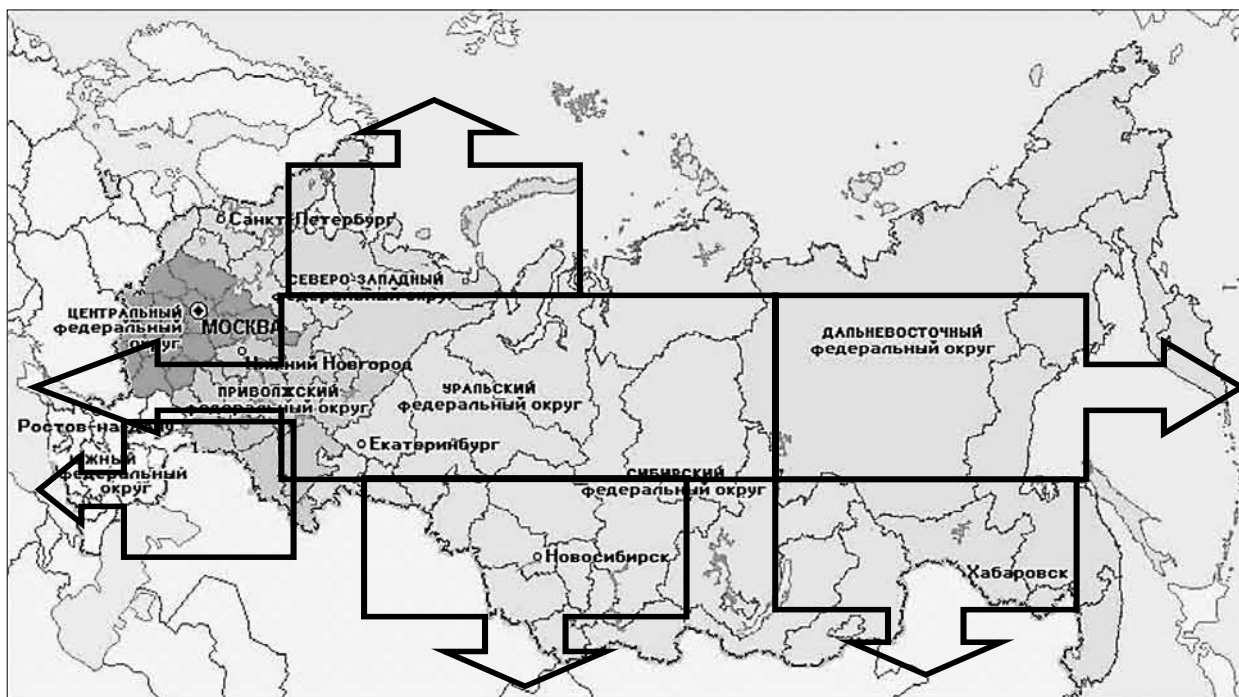


Рис. 2. Материально-энергетические потоки перемещения природно-ресурсных запасов регионов РФ

ала, значимость отдельных видов природных ресурсов со временем меняются, поэтому их оценка всегда исторически относительна. При освоении больших источников природных ресурсов возникают крупные промышленные центры, формируются хозяйственные комплексы и экономические районы, идёт привлечение инвестиционно-финансовых и людских ресурсов. Природно-ресурсный потенциал территории оказывает влияние на его рыночную специализацию и место в территориальном разделении труда. Размещение, условия добычи и характер использования природных ресурсов влияют на содержание и темпы территориального, регионального и федерального уровней развития региона.

Современная региональная и межрегиональная экономическая специализация регионов РФ зависит от суммарных запасов природно-ресурсного потенциала, поскольку именно на этой основе происходит развитие производительных сил и интенсификация социально-экономических и производственных процессов. К примеру, регионы с избыточным природно-ресурсным потенциалом из числа нефтегазодобывающих регионов (Тюменская область, Ханты-Мансийский АО, Ямало-Ненецкий АО, Красноярский край) чрезвычайно интенсивно эксплуатируют собственные природные ресурсы для удовлетворения растущих потребностей других регионов, а часть денежных ресурсов направляют на внутреннее развитие. Кроме того, эти реги-

оны слишком зависят от текущих ценовых котировок на энергоресурсы и в большей степени вовлечены в межхозяйственные экономические связи с другими региональными субъектами, чем регионы с бедным и истощённым ресурсным потенциалом. Напротив, регионы с бедными и истощившимися природными ресурсами чрезвычайно зависимы от ввозимых ресурсов (Юг России). Сложившиеся межхозяйственные экономические связи между отдельными регионами влияют на направления движения материально-энергетических потоков природно-ресурсных запасов (рис. 2).

В настоящее время различные регионы РФ разделяются по величине суммарных запасов природно-ресурсного потенциала по пяти категориям:

- сверхдостаточный;
- достаточный;
- относительно достаточный;
- малодостаточный;
- недостаточный.

К регионам со сверхдостаточным потенциалом относятся Республика Саха (Якутия), Красноярский край, Ямало-Ненецкий АО. К регионам с достаточным ресурсным потенциалом относятся Ханты-Мансийский АО, Иркутская, Кемеровская области и Пермский край. К регионам с относительно достаточным ресурсным потенциалом относятся Свердловская, Читинская и Белгородская области. К регионам с малодостаточным и недостаточным ресурсным потенциалом относятся остальные регионы РФ.

Наличие природно-ресурсного потенциала является необходимым (но не достаточным) условием развития экономики региона. В социально-экономическом аспекте развития природные ресурсы вступают во взаимодействие с производственными, трудовыми и инвестиционно-финансовыми ресурсными составляющими потенциала региона.

Для проведения типизации территории по уровню эколого-экономического баланса авторами предложена система количественных и качественных показателей, позволяющая выполнить эколого-экономическую оценку природно-ресурсного потенциала территории, которые подразделены на группы: природно-ресурсные, санитарно-гигиенические, экологические, эколого-экономические, социально-демографические. Типизация территории проведена авторами на примере Центрального ФО РФ. Приведём эти показатели [4].

*Природно-ресурсные показатели* указывают на объём ресурсного потенциала, его способности к восстановлению для обеспечения жизнедеятельности человека, растительности и животного мира. К ним относятся: первичная биопродуктивность естественных ландшафтов (прирост фитомассы), производительность коренных лесов (прирост древесины), продуктивность естественных кормовых угодий (лугов, пастбищ), естественное плодородие почв (урожайность зерновых), естественная водообеспеченность территории (модуль стока рек). Кроме этого, к природно-ресурсным показателям относятся климатические показатели (атмосферное давление, температура и влажность воздуха, атмосферные осадки, радиационный баланс и др.).

*Санитарно-гигиенические показатели* характеризуют уровень загрязнения природной среды и степень её опасности для здоровья человека. Они включают: индексы загрязнения воздушной среды, поверхностных и подземных вод, почвенного покрова, суммарный индекс загрязнения природной среды.

*Экологические показатели* свидетельствуют о состоянии естественных систем и их способности к процессу обмена вещества и энергии. К ним относят: структуру хозяйствования территории, годовой объём производства по отраслям, индексы техногенной нагрузки на водные и воздушные ресурсы, индекс экологической нагрузки на территорию, антропогенную нарушенность территории, устойчивость природных экосистем.

*Социально-демографические показатели* указывают на остроту социально-демографических факторов, включающих в себя: плотность населения, коэффициент рождаемости населения на 1000 чел., смертность населения на 1000 чел., индекс демографического напряжения, индекс благоприятности природно-климатических условий жизни населения.

В зависимости от значений этих количественных и качественных показателей оцениваются суммарные запасы природно-ресурсного потенциала территории. При этой оценке учитываются различные данные: Росстата РФ, Государственные доклады о состоянии окружающей среды, информационно-статистические, аналитические, картографические источники, данные дистанционного анализа [2 – 5].

Учёт и оценка этих показателей позволили авторам выделить на территории Центрального федерального округа регионы с различными типами экологической ситуации: благоприятной, условно благоприятной, удовлетворительной, напряжённой, критической обстановок, катастрофической. При выделении этих ситуаций была использована матрица оценки экологических ситуаций на основе обобщения различной информационно-статистической, аналитической информации и экспертной оценки, проведённой авторами работы (табл. 1).

На основе выполненной оценки экологической ситуации авторами была проведена типизация территории Центрального федерального округа РФ по экологической ситуации (табл. 2).

Полученные авторами значения экологической ситуации сопоставлены с уровнем эколого-экономического баланса территории (табл. 3).

При сравнении этих показателей можно сделать вывод, что на территории Центрального федерального округа Российской Федерации выделяется несколько групп территорий, показанных на карте-схеме районирования территории ЦФО по уровню эколого-экономического баланса (рис. 3).

Районирование позволило авторам выделить в Центральном ФО РФ территории с различным уровнем эколого-экономического баланса:

- 1) с сильно нарушенным эколого-экономическим балансом – Московская, Рязанская и Тульская области;
- 2) с нарушенным эколого-экономическим балансом – Ярославская, Брянская, Ка-

Таблица 1

Матрица выделения различных типов экологических ситуаций на территории Центрального Федерального округа РФ

Показатели оценки экологических ситуаций	Типы экологических ситуаций				напряжённая	критическая
	благоприятная	условно благоприятная	удовлетворительная	напряжённая		
<b>Природно-ресурсы</b>						
Первичная биопродуктивность, т/га/год	> 30,0	11,1–30,0	6,1–11,0	2,6–6,0	< 2,6	
Производительность коренных лесов, м <sup>3</sup> /га/год	> 6,0	4,1–6,0	2,1–4,0	1,1–2,0	< 1,1	
Продуктивность естественных кормовых угодий, т/га/год	> 36,9	25,1–36,9	20,1–25,0	11,1–20,0	< 11,1	
Естественное плодородие почв, ц/га	> 17,5	13,5–17,5	9,8–13,4	6,5–9,7	< 6,5	
Естественная водообеспеченность территории, л/сек/км	> 20,0	8,1–20,0	4,1–8,0	0,6–4,0	< 0,6	
<b>Санитарно-гигиенические</b>						
Индекс загрязнения атмосферы, ед.	< 1,11	1,11–1,29	1,3–1,49	1,5–1,69	> 1,7	
Индекс загрязнения воды, ед.	< 1,04	1,04–1,10	1,11–1,16	1,17–1,3	> 1,31	
Индекс загрязнения почв, ед.	< 1,06	1,06–1,15	1,16–1,25	1,26–1,4	> 1,41	
Суммарный индекс загрязнения природной среды, ед.	< 1,1	1,10–1,29	1,3–1,49	1,31–1,49	> 1,5	
<b>Экологические</b>						
Индекс техногенной нагрузки на воздушные ресурсы, ед.	< 1,1	1,1–2,0	2,1–3,4	3,5–6,4	> 6,4	
Индекс техногенной нагрузки на водные ресурсы, ед.	< 1,6	1,6–3,4	3,5–4,5	4,6–6,5	> 6,5	
Индекс экологической нагрузки на территорию, ед.	< 0,01	0,01–0,03	0,031–0,049	0,05–0,3	> 0,3	
Антропогенная нарушенность территории, %	< 3,1	3,1–6,0	6,1–8,0	8,1–18,0	> 18,0	
Устойчивость природных экосистем, ед.	> 0,4	0,4–0,59	0,2–,39	0,06–0,19	< 0,06	
<b>Социально-демографические</b>						
Плотность населения, чел./км <sup>2</sup>	< 10,1	10,1–35,0	35,1–65,0	65,1–85,0	> 85,0	
Рождаемость населения, балл на 1000 чел./год	> 24,9	15,0–24,9	10,0–14,9	5,0–9,9	< 5,0	
Смертность населения, балл на 1000 чел./год	< 6,1	6,1–9,0	9,1–11,0	11,1–18,0	> 18,0	
Индекс демографического напряжения, балл	< 0,007	0,007–0,011	0,012–,019	0,02–0,024	> 0,024	
Индекс благоприятности природно-климатических условий жизни населения, балл	> 3,4	3,1–3,4	2,7–3,0	2,2–2,6	< 2,2	



Таблица 2

Типизация территории Центрального федерального округа РФ по экологической ситуации

Название региона ЦФО РФ	Показатели природно-ресурсного потенциала (группы)				Общая оценка экологической ситуации
	природно-ресурсная	санитарно-гигиеническая	экологическая	социально-демографическая	
Московская обл.	н	к	к	н	к
Ярославская обл.	н	н	к	н	н
Костромская обл.	н	у	к	н	н
Ивановская обл.	н	у	н	н	н
Владимирская обл.	н	н	н	н	н
Рязанская обл.	н	к	к	н	к
Тульская обл.	н	к	к	н	к
Орловская обл.	н	н	к	у	н
Брянская обл.	н	к	н	н	н
Калужская обл.	н	к	н	н	н
Смоленская обл.	н	к	н	н	н
Тверская обл.	н	к	н	н	н
Курская обл.	н	к	н	у	н
Белгородская обл.	н	н	н	у	н
Воронежская обл.	н	к	н	н	н
Липецкая обл.	н	н	н	у	н
Тамбовская обл.	н	н	н	н	н
Средняя по ЦФО	н	к	н	н	н

Примечание: н – напряжённая экологическая ситуация, к – критическая экологическая ситуация, у – удовлетворительная экологическая ситуация.

Таблица 3

Корреляция значений эколого-экономической оценки и уровней эколого-экономического баланса территории

№ п/п	Значения эколого-экономической оценки	Уровень эколого-экономического баланса
1	благоприятная	не нарушенный
2	условно благоприятная	практически не нарушенный
3	удовлетворительная	слабо нарушенный
4	напряжённая	средне нарушенный
5	критическая	сильно нарушенный
6	катастрофическая	чрезвычайно нарушенный

лужская, Смоленская, Тверская, Курская и Воронежская области;

3) со средне нарушенным эколого-экономическим балансом – Костромская, Владимирская, Орловская, Тамбовская области;

4) со слабо нарушенным эколого-экономическим балансом – Ивановская, Белгородская, Липецкая области.

Выполненная оценка показывает, что в Центральном федеральном округе РФ в настоящее время наблюдается напряжённая экологическая ситуация, связанная с истощением запасов природных ресурсов, сильными и средними величинами антропоген-

ной нагрузки на окружающую среду, неблагоприятными социально-демографическими показателями.

По мнению авторов, прогноз изменения уровня эколого-экономического баланса на территории ЦФО РФ связан с объёмом инвестиций и уровнем антропогенных нагрузок на окружающую среду [6 – 8]. Прогноз основан на статистических данных динамики региональных индикаторов социально-экономического развития (валового регионально продукта и инвестиций) экономики ЦФО РФ (рис. 4, 5).

Анализ динамики региональных индикаторов социально-экономического развития ЦФО РФ показывает, что в период с 2000-го

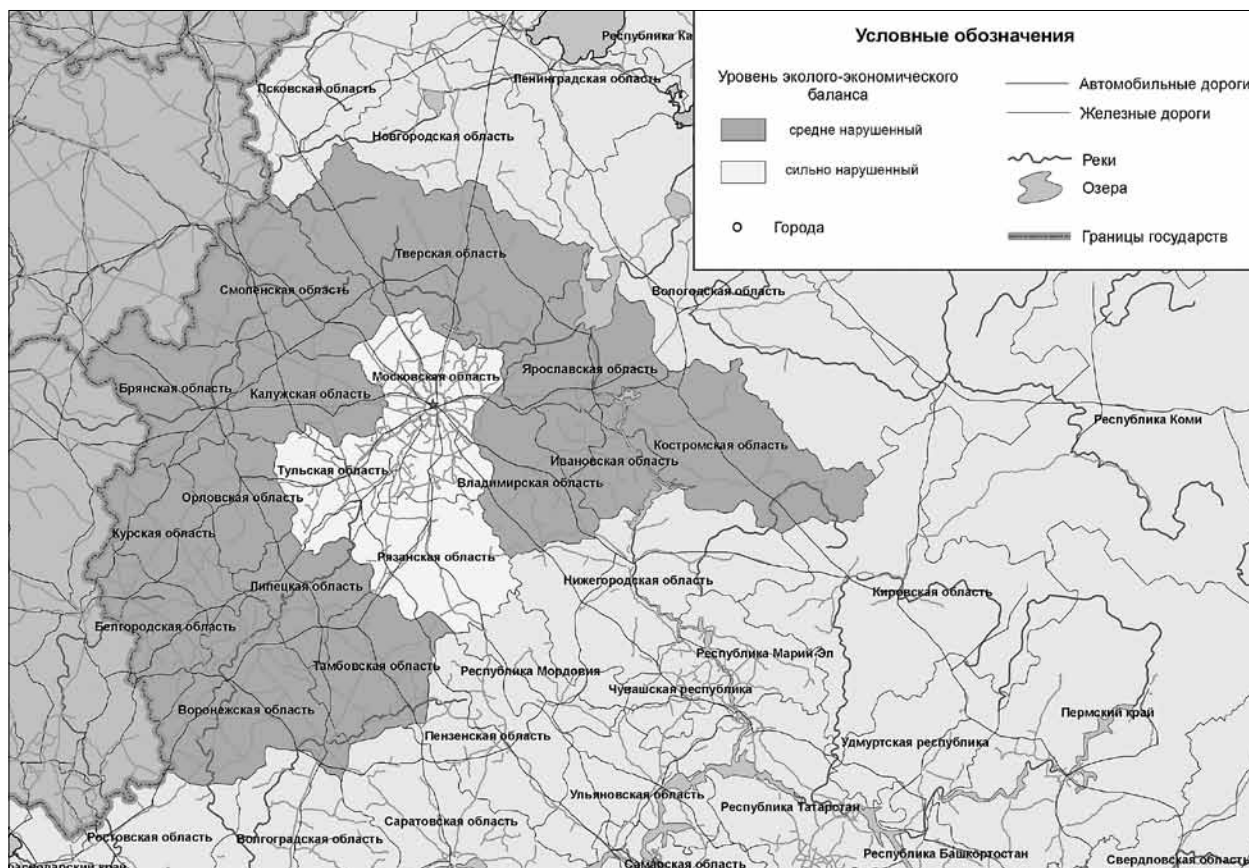


Рис. 3. Карта-схема районирования территории ЦФО по уровню эколого-экономического баланса

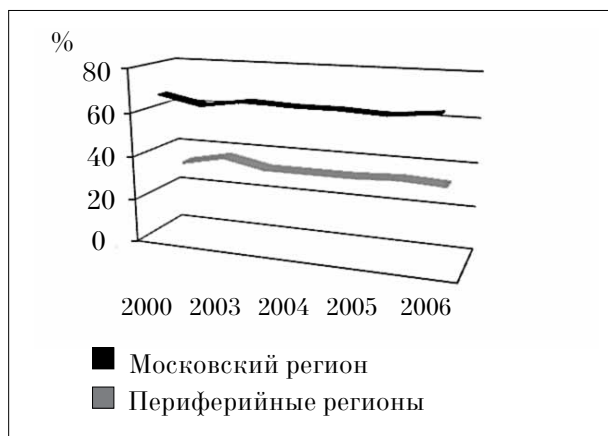


Рис. 4. Динамика изменения валового регионального продукта центральных и периферийных регионов ЦФО РФ за 2000–2006 гг.

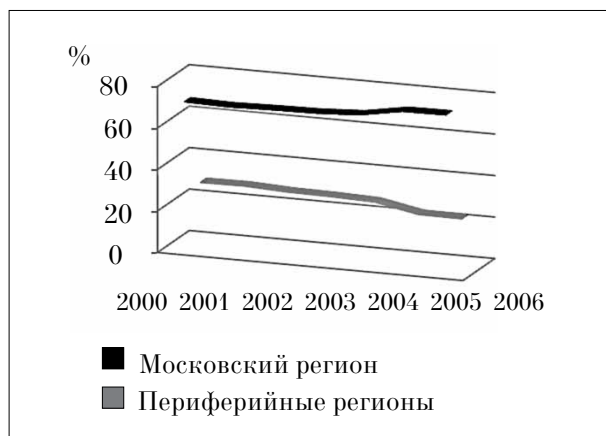


Рис. 5. Динамика изменения инвестиций центральных и периферийных регионов ЦФО РФ за 2000–2006 гг.

по 2006 г. произошло некоторое увеличение валового регионального продукта (ВРП) и инвестиций для Москвы и Московской области и некоторое снижение этих индикаторов для периферийных территорий (Липецкая, Воронежская обл. и др.).

Как видно из рисунков 4 и 5, чем дальше от Москвы и Московской области, тем ниже индикаторы социально-экономического развития.

Исходя из прогноза региональных индикаторов социально-экономического развития и возрастания техногенных нагрузок на территории ЦФО РФ, можно полагать, что основные изменения уровня эколого-экономического баланса будут наблюдаться на периферийных районах ЦФО (Липецкая обл., Белгородская обл., Воронежская обл.). В этих районах произойдет изменение некоторых показателей с уровня «средне изменённый» до уровня «силь-

но изменённый». Напротив, в приближённых к г. Москве областях (Московская, Тверская, Рязанская, Тульская) изменения уровня эколого-экономического баланса не прогнозируются.

Можно сделать вывод, что с течением времени в центральных регионах ЦФО РФ будут только нарастать проблемы, связанные с эколого-сбалансированным развитием. Большая концентрация людских, финансовых, промышленных ресурсов будет только препятствовать решению этой проблемы.

Для частичного решения этой проблемы необходима комплексная федеральная программа по постепенной децентрализации центрального столичного региона с управленческим механизмом. Данный управленческий механизм должен включать:

- 1) комплексный анализ эколого-экономической ситуации в регионе;
- 2) выбор приоритетов развития, разработку и утверждение территориальной экологической политики с учётом региональных особенностей;
- 3) разработку территориальной долгосрочной стратегической программы эколого-экономического сбалансированного развития;
- 4) формирование системы функций управления эколого-экономическим развитием в регионе;

5) формирование организационной структуры и органов управления эколого-экономическим сбалансированным развитием.

### Литература

1. Гаранькин Н.В., Наполов О.Б., Садов О.Б. Московская область: природные ресурсы, их потенциал / Под ред. Н.В. Гаранькина. М.: НИИ-Природа, 2004. 300 с.
2. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2008 году». М.: Изд-во Минприроды РФ, 2009. 488 с.
3. Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2008 году». М.: НИИ-Природа, 2009. 446 с.
4. Государственный доклад «О состоянии здоровья населения Российской Федерации в 2006 г.». М.: Изд-е Минздравсоцразвития РФ, 2009. 435 с.
5. Регионы России. Основные характеристики субъектов Российской Федерации. 2008 // Статистический сборник. М.: Росстат, 2008. 668 с.
6. Теслин В.Г., Лебедева О.В. К вопросу об асимметрии инвестиционных процессов // Вестник московского экономического института. 2007. № 2. С. 122–130.
7. Рюмина Е.В., Аникина А.М. Анализ влияния фактора природных ресурсов на уровень экономического развития регионов России // Проблемы прогнозирования. 2007. № 5. С. 106–125.
8. Крутько В.Н., Синельников С.Г., Хомяков П.М. Экономическая оценка природных ресурсов на основе модели динамики экосистем. М.: ВНИИСИ, 1985. 46 с.

УДК 612.111.32

## Модификация метода гемосканирования и перспективы его применения при изучении механизмов адгезии бактерий на эритроцитах

© 2011. В. А. Оборин<sup>1</sup>, к.м.н., доцент,  
Е. В. Пименов<sup>2</sup>, чл.-корр. РАН, д.м.н., г.н.с., А. Г. Ивонин<sup>2</sup>, к.б.н., н.с.,

<sup>1</sup>Вятский государственный университет,

<sup>2</sup>Лаборатория сравнительной кардиологии Коми НЦ УрО РАН,  
e-mail: vaoborin50@mail.ru

В статье приведены результаты исследований по модификации метода гемосканирования для визуализации процесса прикрепления микробных клеток к эритроцитам. Модифицированный метод прост в исполнении и достаточно информативен, для его проведения требуется минимальное количество образцов исследуемой крови. Предлагаемый метод может применяться при комплексном изучении механизмов адгезии бактерий на клетках макроорганизма.

This article results researches on updating of a method of haemoscanning. The modified method is simple performed by and is informative enough, for its carrying out the minimum quantity of samples of investigated blood is required. The offered method can be applied to visualization into process of an attachment of microbic cells to erythrocytes at complex studying into mechanisms of adhesion of bacteria on cells of macroorganism.

Ключевые слова: гемосканирование, адгезия, бактерии, эритроциты

Key words: adhesion, bacteria, haemoscanning, erythrocytes

Адгезия представляет собой универсальный многостадийный и многокомпонентный процесс, обеспечивающий колонизацию бактериями любых плотных субстратов, включая ткани человека и млекопитающих [1 – 3]. При воздействии неблагоприятных факторов окружающей среды на бактерии и на макроорганизм происходят изменения в характере адгезии микробных клеток к слизистым оболочкам и покровным тканям хозяина. Следовательно, по показателям адгезии бактерий к эукариотическим клеткам можно судить об экологическом состоянии среды обитания макро- и микроорганизмов. Поэтому в настоящее время большое внимание исследователей уделяется изучению механизмов прикрепления микробных клеток к клеткам макроорганизма как *in vitro*, так и *in vivo* [4 – 7]. Ввиду идентичности гликофорина эритроцитов и гликокаликса эпителиоцитов при изучении адгезивных свойств бактерий наиболее часто используются методы, в которых в качестве субстрата адгезии применяются эритроциты [8 – 11]. Авторами статьи разработан фотокolorиметрический метод определения бактериофиксирующей активности эритроцитов, хорошо зарекомендовавший себя при изучении адгезии микробных штаммов различного происхождения на эритроцитах млекопитающих [12, 13].

В то же время для визуализации процесса взаимодействия эритроцитов с бактериями необходимо было использовать микроскопию.

Анализ литературы свидетельствует о том, что в последние годы в клинической и лабораторной практике используются методы, основанные на современных технологиях, которые дают возможность в сжатые сроки устанавливать неблагоприятное воздействие различных факторов на организм. Одним из таких методов является гемосканирование – метод исследования крови, позволяющий оценивать функциональное состояние и структуру форменных и патологических элементов крови, а также её плазмы [14].

При гемосканировании капля капиллярной крови исследуется под большим увеличением светового микроскопа (1000-1500 раз). При этом изображение передаётся через видеокамеру на монитор и может сохраняться на электронных носителях. Данных об использовании гемосканирования для изучения механизмов адгезии бактерий на эритроцитах в доступной нам литературе не обнаружено.

Цель настоящей работы состояла в модификации метода гемосканирования для визуализации процесса адгезии бактерий на поверхности эритроцитов.

**Материалы и методы исследований**

В работе использовали вакцинный штамм *Yersinia pestis* EV НИИЭГ, полученный из ФГУ «48 ЦНИИ Минобороны РФ», пробиотический штамм *Lactobacillus casei* DN-114001, предоставленный ОАО «Агровет», а также музейный штамм *Staphylococcus epidermidis* из коллекции кафедры морфологии и микробиологии Вятской ГСХА.

Культивирование штамма *Y. pestis* осуществляли на агаризованном гидролизате рыбной муки (ГРМ-агаре pH 7,2) при температуре  $(28 \pm 1)^\circ\text{C}$  в течение 24 часов. Музейный штамм *S. epidermidis* выращивали на ГРМ-агаре (pH 7,2) при температуре  $37 \pm 1^\circ\text{C}$  в течение 24 часов. Для культивирования клеток *L. casei* DN-114001 применяли среду Мозера-Рогоза-Шарпа (MRS), выращивание осуществляли в анаэробных условиях при температуре  $37 \pm 1^\circ\text{C}$  в течение 24 часов. Выращенные микробные культуры суспензировали в стерильном 0,9% растворе хлорида натрия (pH 7,2).

Для получения суспензии эритроцитов использовали венозную кровь человека 0(I) Rh+ группы крови. В качестве антикоагулянта применяли 3,8% раствор цитрата натрия (1:10). Не позднее 24 ч после взятия крови эритроциты трижды отмывали десятикратным объёмом 0,9% раствора хлорида натрия путём центрифугирования при 1000 об./мин в течение 5 мин и ресуспензировали в этом же растворе.

Микроскопию объектов проводили, пользуясь световым микроскопом «Миктрон-400М» (ООО «Петролазер», г. С.-Петербург), оснащённым цифровой видеокамерой.

Для витального (прижизненного) окрашивания микробных клеток в суспензию бактерий добавляли малоядовитые красители (метиленовый синий, нейтральный красный, конго красный) в соотношении 1:1000. После этого микробную суспензию инкубировали при  $37 \pm 1^\circ\text{C}$  в течение 30 минут.

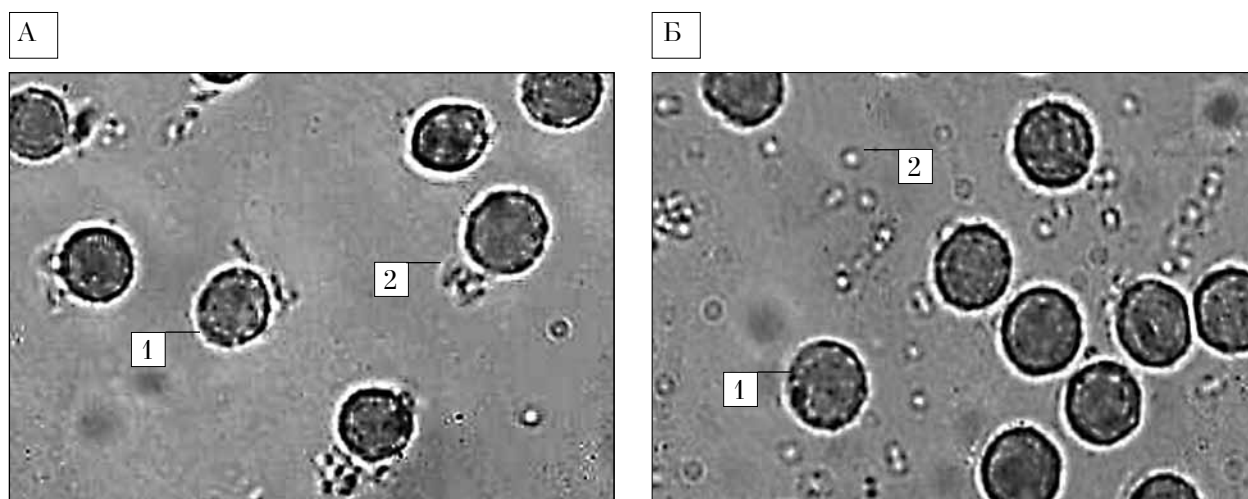
При оценке адгезии фотоколориметрическим методом [12] вычисляли показатель адгезии (ПА). Статистическую обработку полученных результатов проводили при помощи компьютерной программы «Biostat» версии 4.03.

**Результаты и их обсуждение**

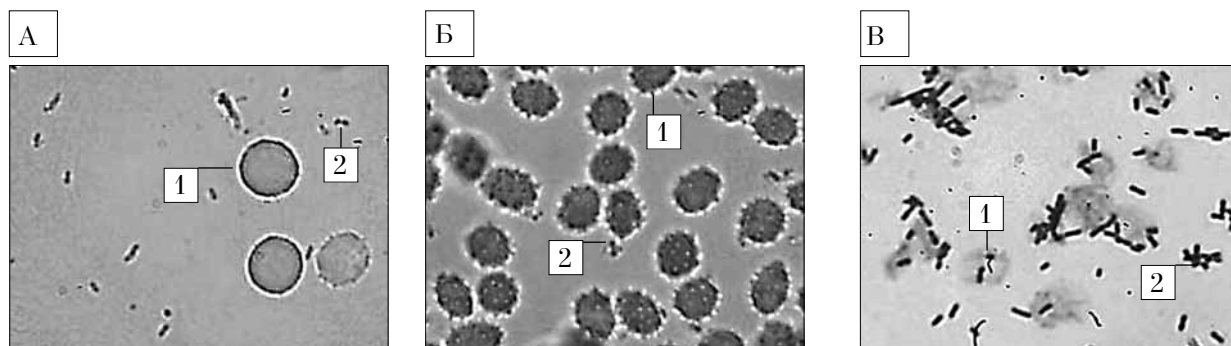
Предлагаемая нами модификация метода гемосканирования заключалась в том, что в каплю крови или суспензию эритроцитов человека вносили исследуемую микробную культуру и готовили микроскопический препарат «раздавленная капля», который изучали под световым микроскопом (ув.  $\times 1000$ ), оценивая адгезию бактерий к красным кровяным клеткам.

При проведении экспериментов на предметном стекле смешивали по 1 капле суспензии эритроцитов в концентрации  $0,1 \times 10^{12}$  клеток/л и суспензии бактерий в концентрации  $1,0 \times 10^{12}$  клеток/л. Препараты накрывали покровным стеклом, выдерживали при температуре  $37 \pm 1^\circ\text{C}$  в течение 30 мин и подвергали световой микроскопии.

В поле зрения наблюдали бактерии *Y. pestis*, прикрепившиеся к эритроцитам (рис. 1 А). В то же время клетки *S. epidermidis* (рис. 1 Б) находились в межэритроцитарном пространстве и не фиксировались на поверхности эритроцитов.



**Рис. 1.** Микроскопическая картина при гемосканировании суспензии, содержащей эритроциты человека с клетками *Y. pestis* EV НИИЭГ (А) и *S. epidermidis* (Б).  $\times 1000$ .  
1 – эритроциты; 2 – микробные клетки



**Рис. 2.** Микроскопическая картина при гемосканировании суспензии, содержащей эритроциты человека и окрашенные метиленовым синим бактерии *Y. pestis* EV НИИЭГ (А), *S. epidermidis* (Б) и *L. casei* DN-114001 (В).  $\times 1000$ . 1 – эритроциты; 2 – микробные клетки

Для лучшей визуализации процесса связывания эритроцитами бактерий последние предварительно окрашивали. При выборе красителя соблюдали два условия: во-первых, чтобы микробы хорошо были видны при микроскопировании, а во-вторых, чтобы испытуемый краситель не влиял на процесс прикрепления бактерий к эритроцитам. Из трёх испытанных красителей (метиленовый синий, нейтраль-рот, конго красный) наилучшие показатели в данном отношении проявил метиленовый синий. Микробные клетки *Y. pestis*, *S. epidermidis* и *L. casei*, обработанные данным красителем, были чётко видны в ходе микроскопирования (рис. 2). Бактерии *Y. pestis* и *L. casei* проявляли выраженную способность прикрепляться к эритроцитам человека.

Данные световой микроскопии были подтверждены нами при оценке адгезии с помощью фотоколориметрического метода (табл.). Для культур *Y. pestis* EV НИИЭГ и *L. casei* DN-114001 были характерны достаточно высокие значения ПА. В то же время музейный штамм *S. epidermidis* практически не проявил адгезивной активности.

С помощью модифицированного метода гемосканирования удалось выявить ряд закономерностей взаимодействия эритроцитов с изучаемыми штаммами бактерий. Клетки *S. epidermidis* практически не фиксировались к эритроцитам, в то же время бактерии *Y. pestis* и *L. casei* обладали высокой адгезивной актив-

ностью в отношении эритроцитов. Кроме того, при микроскопии проб с бактериями *Y. pestis* было обнаружено, что, как только микробная клетка фиксируется на эритроците, она становится неподвижной. Если фиксированной микробной клетки касается другая бактерия, она прикрепляется к ней и также теряет подвижность. В результате данного процесса на некоторых эритроцитах формировались конгломераты из 5-10 бактерий.

Преимущество модифицированного метода гемосканирования перед другими методами оценки адгезии микроорганизмов бактериальной природы на модели эритроцитов заключается в том, что для его использования необходимы минимальные объёмы крови, которые можно получить из капилляра пальца человека или из хвостовой вены экспериментальных животных. В отличие от традиционных методик исследования адгезивного процесса [8], при использовании которых готовятся фиксированные микропрепараты, метод гемосканирования позволяет оценивать взаимодействие эритроцитов с микробными клетками «в живую», а результаты исследований сохраняются на электронных носителях и анализируются в дальнейшей работе. Модифицированный метод гемосканирования использовали для визуализации процесса фиксации бактерий на эритроцитах после оценки их взаимодействия с помощью фотоколориметрии, а также в ходе скрининговых исследований адгезии микроорганизмов бактериальной природы, находящихся как в вегетативном, так и в споровом состоянии, к эритроцитам млекопитающих [13].

**Таблица**

Результаты оценки уровня адгезии бактерий на эритроцитах человека фотоколориметрическим методом ( $M \pm m$ ;  $n=5$ )

Микробная культура	Показатель адгезии, %
<i>Y. pestis</i> EV НИИЭГ	77,41 $\pm$ 5,29
<i>L. casei</i> DN-114001	55,25 $\pm$ 4,17
<i>S. epidermidis</i>	2,61 $\pm$ 1,46

### Заключение

Таким образом, для визуализации процесса адгезии бактерий на эритроцитах нами осуществлена модификация метода гемоска-

нирования, которая заключается в следующем. В каплю крови или суспензию эритроцитов вносят изучаемые микробные клетки, после инкубации проб при  $(37 \pm 1)^\circ\text{C}$  в течение 30 мин готовят микропрепарат «раздавленная капля» и осуществляют его микроскопию в иммерсионной системе микроскопа (ув.  $\times 1000$ ), оценивая уровень адгезии бактерий к красным кровяным клеткам. Для лучшей визуализации процесса адгезии применяют витальную окраску микробных клеток метиленовым синим. Метод прост в исполнении, не требует больших объемов крови и может использоваться как самостоятельно, так и наряду с другими методами в комплексном исследовании механизмов адгезии бактерий на эритроцитах. При этом возможность оценки взаимодействия микроорганизмов с эритроцитами, находящимися непосредственно в крови, приближает условия эксперимента к условиям *in vivo*.

### Литература

1. Donlan R.M., Costerton J.W. Biofilms: survival mechanisms of clinically relevant microorganisms // Clin. Microbiol. Rev. 2002. V. 15. № 2. P. 167–193.
2. Богданова Е.А., Несвижский Ю.В., Воробьев А.А. Адгезивные свойства лактобактерий и эшерихий в различных отделах желудочно-кишечного тракта человека в норме и патологии // Вестник РАМН. 2006. № 1. С. 35–38.
3. Сидоренко С.В. Инфекционный процесс как «диалог» между хозяином и паразитом // Клинический микробиологический химиотерапевтический журнал. 2001. Т. 3. № 4. С. 301–315.
4. Колякина А.В. Лектиновые рецепторы холерных вибрионов: Автореф. дис. ... канд. мед. наук. Ставрополь. 2009. 18 с.
5. Телесманич Н.Р., Ломов Ю.М., Бардых И.Х., Винокур Н.И. Адгезивные и некоторые другие свойства *Vibrio cholerae* TSP<sup>+</sup> СТХ<sup>-</sup>, изолированных на объектах внешней среды Ростовской области в 2002 году // Журнал микробиологии. 2004. № 6. С. 3–6.
6. Saldana Z., Erdem A.L., Schüller S., Okeke I.N., Lucas M., Sivananthan A., Phillips A.D., Kaper J.B., Puentepelto J.L., Giron J.A. The *Escherichia coli* common pilus and the bundle-forming pilus act in concert during the formation of localized adherence by Enteropathogenic *E. coli* // J. Bact. 2009. V. 191. № 11. P. 3451–3461.
7. Ананьева Н.В., Ганина В.И., Ленченко Е.М., Ванина Н.Н. Оценка методов исследования взаимодействия бактерий с клетками животных // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2007. № 3. С. 53–55.
8. Брилис В.И., Брилене Т.А., Ленцнер Х.П., Ленцнер А.А. Методика изучения адгезивного процесса микроорганизмов // Лабораторное дело. 1986. № 4. С. 210–212.
9. Гизатулина С.С., Биргер М.О., Кулинич Л.И., Фиш Н.Г., Мазитова О.П., Бирюкова Н.В. Способ оценки состояния микрофлоры кишечника человека по количеству адгезивно-активных колоний и типу адгезинов // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунологии. 1991. № 4. С. 21–23.
10. Зайцева Е.А., Сомов Г.П. Влияние температуры на адгезивные свойства листерий // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунологии. 2006. № 3. С. 20–23.
11. Смолина Т.П., Черных С.В., Горшкова Р.П. Снижение адгезии микроорганизмов на клетках уроэпителия с помощью полисахарида, выделенного из морских протеобактерий *Pseudoalteromonas nigrifaciens* // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунологии. 2006. № 3. С. 58–61.
12. Романов В.Е., Ивонин А.Г., Бондаренко А.Л., Оборин В.А., Нехорошкина Е.Л. Способ определения бактериофиксирующей активности эритроцитов. Патент РФ на изобретение № 2360969; опубл. 10.07.2009. Бюл. № 11.
13. Оборин В.А. Бактериофиксирующая активность эритроцитов. Киров: Вятская ГСХА, 2010. 194 с.
14. Грейндж К. Темнопольный микроскоп и его возможности в клинической практике / [http://vitash.narod.ru/gemoscan\\_greindg1.htm](http://vitash.narod.ru/gemoscan_greindg1.htm)

*Работа выполнена в рамках программы Президиума РАН «Фундаментальные науки – медицине» на 2011 год. Авторы выражают благодарность Президиуму РАН за возможность проведения данных исследований.*

**Оценка состояния почв городских территорий  
методом комплексного биотестирования**

© 2011. Е. С. Трояновская, аспирант, О. В. Абросимова, к.б.н., доцент,  
Е. И. Тихомирова, д.б.н., зав. кафедрой,  
Саратовский государственный технический университет,  
e-mail: ecology@sstu.ru

В работе обосновано применение комплексного биотестирования для оценки состояния почв промышленного города на примере г. Саратова. Проведена оценка токсичности проб почв и почвенных вытяжек с использованием разных биотест-объектов: *Chlorella vulgaris*, *Lemna minor*, *Daphnia magna*, *Raphanus sativus*. Дан сравнительный анализ чувствительности и информативности разных методов биотестирования. Применение комплекса биотест-объектов с разной степенью чувствительности к экотоксикантам позволяет наиболее полно оценить степень техногенной нагрузки на городские почвы и охарактеризовать экологическую ситуацию.

Using the complex bioassay for testing of soils in industrial city (Saratov) was founded in the present work. The toxicity of soil samples and soil extracts was evaluated with the help of various bioassay-objects: *Chlorella vulgaris*, *Lemna minor*, *Daphnia magna*, *Raphanus sativus*. Comparative analysis of sensitivity and informativity was conducted for different methods of bioassay. Using the complex of bioassay-objects with different sensitivity to ecotoxicants allows the fullest assessing of the degree of technogenic burden on soils in urban areas and the fullest characterizing of ecological situation.

Ключевые слова: городские почвы, биотестирование, токсичность

Key words: bioassay, soil, toxicity

Состояние почв городских территорий в настоящее время приобретает катастрофический характер. Процессы урбанизации, включающие строительство различных предприятий, увеличение протяжённости и площади автомагистралей и железных дорог, прогрессивное нарастание количества автотранспорта, применение противогололёдных реагентов, действие атмосферных осадков и сточных вод, осаждение химических веществ – компонентов загрязнения атмосферного воздуха промышленных территорий – приводит ко всё более возрастающей антропогенной нагрузке на почвенный покров. Естественный почвенный покров на большей части урбанизированных территорий практически уничтожен и сохранился лишь островками в городских лесопарках. Почвы городских территорий характеризуются неоднородностью и смешением горизонтов и являются по сути урбанозёмами. В пределах г. Саратова распространены две основные группы почв: реликты природных почв и городские почвы. В черте города на реликтовых участках распространены шесть типов природных почв: серые лесные, чернозёмы обыкновенные, чернозёмы южные, пойменные аллювиальные, лугово-чернозёмные и лугово-каштановые,

солонцы. Локальная дифференциация урбаноландшафтных зон города приводит к формированию пятнистости природных почв, так в балках и оврагах 10% площади занимают пойменные аллювиальные почвы. Все эти почвы характеризуются относительно слабым промывным режимом и способностью к накоплению загрязняющих веществ.

Городские почвы являются депонирующей средой практически для всех поллютантов, поэтому данные, полученные при их комплексном экологическом и геохимическом мониторинге, являются высокоинформативными. Для характеристики антропогенного загрязнения почвенного покрова наряду с химико-аналитическими исследованиями всё большее применение находят методы биотестирования, основанные на оценке состояния тест-организмов, подвергающихся воздействию загрязнённой среды [1]. Биотестирование не даёт информации о природе поллютанта, зато с большой степенью достоверности позволяет определить степень интегральной токсичности всех экотоксикантов, содержащихся в объекте исследования [2].

В связи с этим представлялась актуальной разработка методов комплексного биотести-



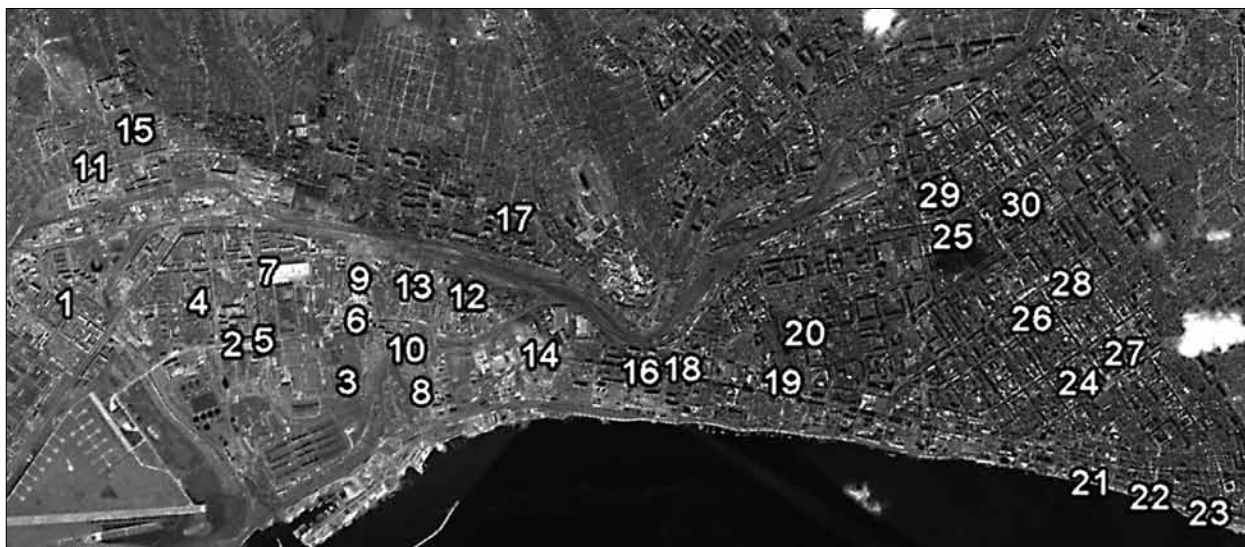


Рис. 1. Точки отбора почвенных проб на территории г. Саратова

вания транспортно-селитебных ландшафтов города с использованием различных по чувствительности биотест-объектов.

В данной работе проведена комплексная оценка токсичности почвенного покрова техногенных зон г. Саратова с помощью биотест-объектов: *Chlorella vulgaris*, *Lemna minor*, *Daphnia magna*, *Raphanus sativus*.

Объектом исследования являлись городские почвы и почвы фоновой территории. Отбор проб проводили в июне 2010 г. в наиболее напряжённых участках городской территории: вдоль железнодорожного полотна, на пересечении главных автомагистралей, поблизости от промышленных предприятий, а также в селитебных районах старой и новой застройки. Для исследования были отобраны пробы почв в 31 точке со строгой картографической привязкой к местности (рис. 1). В качестве контроля использовали пробы почвы лесопарковой территории дома отдыха «Ударник», находящегося в 3 км от г. Саратова.

Для проведения биотестирования готовили водные вытяжки почвы по общепринятой методике [3]. Оценку токсичности почвенных вытяжек проводили по стандартным методикам [1, 4 – 7]. Для получения сопоставимых результатов по итогам тестирования рассчитывали индекс токсичности почв (водной вытяжки) точек пробоотбора сначала для каждой тест-функции по формуле:

$$\text{ИТФ} = (\text{ТФ}_o / \text{ТФ}_k),$$

где  $\text{ТФ}_o$  – значение регистрируемого тест-отклика в опыте,  $\text{ТФ}_k$  – в контроле.

Затем рассчитывали среднее значение индекса токсичности почв (водной вытяжки почв) для каждого пункта по формуле:

$$\text{ИТФ}_{\text{cp}} = (\text{ИТФ}_1 + \text{ИТФ}_2 + \text{ИТФ}_3 + \dots) / n,$$

где  $\text{ИТФ}_n$  – индекс токсичности, рассчитанный для каждой тест-функции,  $n$  – количество тест-откликов, задействованных в эксперименте для конкретной точки пробоотбора [8].

Для сравнительной оценки чувствительности и информативности использования разных биотест-объектов проводили статистическую обработку данных по общепринятой методике [9].

Проведение оценки токсичности водных вытяжек почв на биотест-объекте *C. vulgaris* было самым быстрым и позволило получить результаты через 22 часа. Эта методика основана на регистрации различий в оптической плотности тест-культуры водоросли, выращенной на среде, не содержащей токсических веществ (контроль), и в тестируемых пробах. В результате проведённых исследований гипертоксичными оказались пробы, отобранные в Заводском районе г. Саратова вблизи Саратовского авиационного завода (САЗ) и 4-го жилучастка. Токсичными оказались пробы вблизи автомагистралей Фрунзенского района. В пешеходных зонах центральных улиц и жилых массивов г. Саратова пробы почвы были нетоксичными.

Проведение исследований с использованием биотест-объекта *L. minor* было наиболее информативным, поскольку ряска малая обладает высокой чувствительностью к воз-

действию различных экотоксикантов. Этот тест-объект позволяет проводить оценку токсичности на органном уровне (фиксация морфологических отклонений у листочков) и на организменном уровне (регистрация реализации репродуктивного потенциала). Практически во всех исследуемых пробах были отмечены морфологические отклонения у тест-объекта: хлорозы, изменение окраски. Острое токсическое действие выявлено в 70% проб, где была отмечена 100% гибель *L. minor*. Слаботоксичными оказались пробы, взятые на центральных улицах г. Саратова и улицах жилого массива в Заводском районе. По оценке репродуктивного потенциала *L. minor* все исследуемые пробы почвы оказались гипертоксичными.

При использовании биотест-объекта *D. magna* для оценки токсичности проб городских почв учитывали такие показатели, как выживаемость, плодовитость, двигательная и фильтрационная активность рачков (табл.). Полученные результаты по показателям выживаемости *D. magna* в почвенных вытяжках позволили выявить острое токсическое действие проб, отобранных в районе железной дороги, вблизи промышленных зон САЗ, завода «Биокон» и на территории Набережной Космонавтов г. Саратова. Остальные пробы почв были менее токсичны; нетоксичными оказались пробы, взятые в точках на улице Сакко и Ванцетти в центре г. Саратова.

Достоверное снижение двигательной активности у тест-объекта было выявлено толь-

ко в пробах, собранных вблизи железной дороги, по ул. Пономарёва, ул. Кавказской в Заводском районе и ул. Слонова в центре города. При установлении хронической токсичности почвенных вытяжек размножение тест-объекта зафиксировано в пробах, отобранных с территории городского парка, детского парка, площади перед цирком и Театральной площади.

Метод биотестирования, основанный на показателях изменения флуоресценции хлорофилла микроводорослей, которыми питаются дафнии, по данным ряда авторов, является высокочувствительным [1]. Оценка токсичности воды основана на изменении скорости поглощения пищи рачками в опытных и контрольных пробах. Применение этого метода в наших экспериментах не позволило выявить токсичность почвенных вытяжек, приготовленных из проб почвы с точек на Театральной площади, детского парка, по ул. Крымской и ул. Миллеровской в Заводском районе города. Остальные пробы по результатам данной методики были токсичными и снижали активность питания дафний.

Использование для оценки токсичности почв и почвенных вытяжек фитотест-объекта *R. sativus* оказалось наименее информативным. При учёте результатов всхожести редиса отмечено лишь незначительное подавление роста в почвенных вытяжках проб, отобранных вблизи автомагистралей. Полученные данные не позволили судить о токсичности всех исследуемых проб почвы.

Таблица

Определение токсичности водных вытяжек почв с помощью тест-объекта *D. magna*

Номер пробы	Индекс оцениваемого фактора			Номер пробы	Индекс оцениваемого фактора		
	острая токсичность	движение	питание		острая токсичность	движение	питание
1	0,60	0,70	1,00	17	0,90	1,00	1,25
2	1,00	1,00	1,25	18	0,60	1,00	1,50
3	0,60	1,00	1,50	19	0,40	0,90	1,25
4	1,00	0,90	2,00	20	1,00	1,00	1,00
5	0,30	0,70	0,25	21	0,60	0,90	0,75
6	1,00	1,00	0,25	22	0,70	0,90	1,25
7	0,40	1,00	1,25	23	0,80	1,00	1,25
8	0,30	0,95	1,25	24	0,40	0,85	0,50
9	0,40	1,00	1,75	25	1,00	1,00	0,50
10	1,00	1,00	1,00	26	0,10	0,75	0,75
11	0,50	1,00	1,00	27	0,90	1,00	1,75
12	0,90	0,90	1,50	28	0,90	1,00	0,25
13	0,80	1,00	1,00	29	0,90	1,00	1,25
14	0,20	0,65	1,25	30	0,40	0,60	1,00
15	0,40	0,80	1,50	31	0,90	1,00	1,00
16	0,80	1,00	2,00	контроль	1,00	1,00	1,00

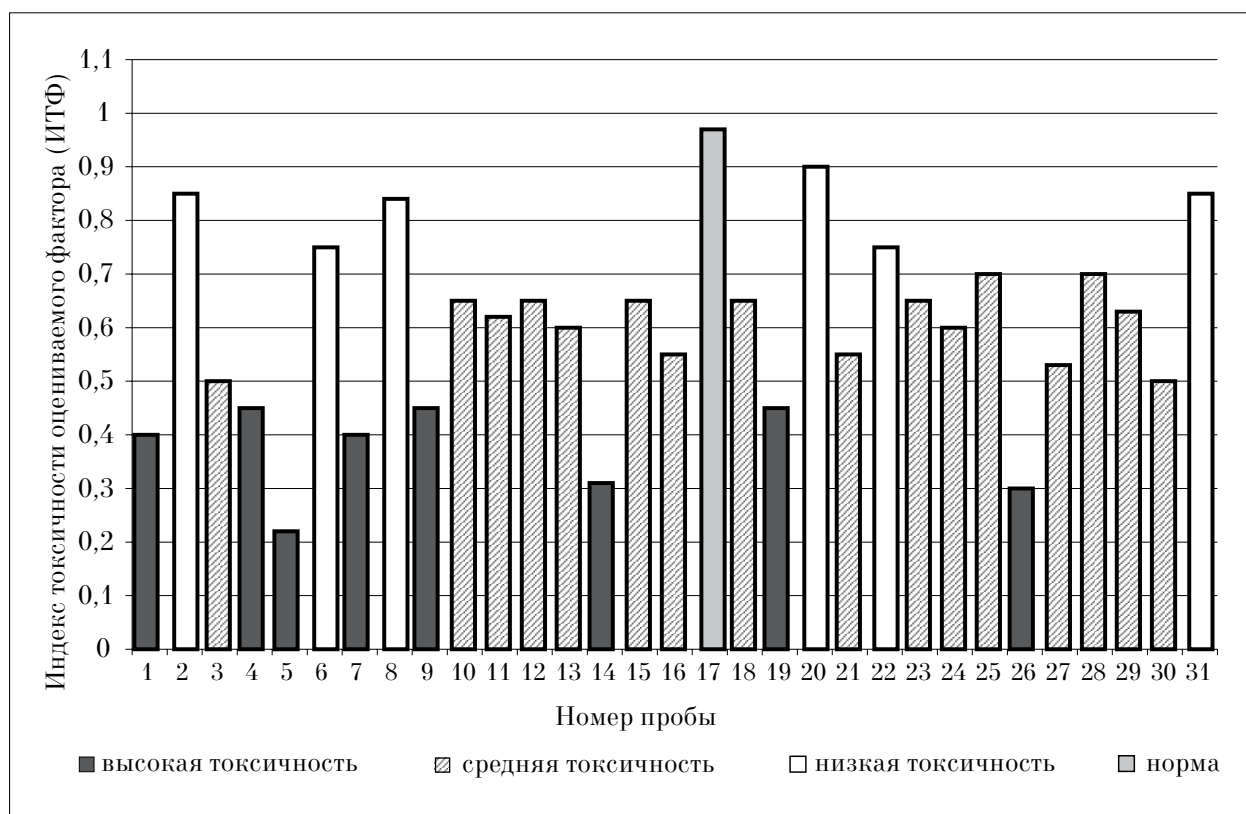


Рис. 2. Распределение исследуемых проб по классам токсичности

Примечание: ИТФ=0 (сверхвысокая токсичность); ИТФ<0,50 (высокая токсичность); ИТФ=0,50–0,70 (средняя токсичность); ИТФ=0,71–0,90 (низкая токсичность); ИТФ=0,91–1,10 (норма); ИТФ>1,10 (стимуляция).

Для получения сопоставимых между собой результатов, полученных с помощью разных методических подходов, нами был рассчитан индекс токсичности почв на основе всех зарегистрированных тест-реакций (рис. 2) [8].

Сравнительный анализ полученных результатов показал, что к участкам с явной выраженной токсичностью (ИТФ<0,50) относятся пробы почв, отобранные вблизи САЗ и на 4-ом жилучастке, вдоль автомагистралей Фрунзенского и Заводского районов (по ул. Сакко и Ванцетти, ул. Чернышевской и ул. Новоастраханское шоссе). К участкам с низкой токсичностью почв (ИТФ=0,71–0,90) были отнесены пробы, отобранные на газонах Набережной Космонавтов и в районе городского парка, на пересечении улицы Пензенской и проспекта Энтузиастов, улиц Кутякова и Горького. Пробы, отобранные у памятника «Защитникам саратовского неба» на улице Чернышевского, характеризовались по шкале токсичности (ИТФ=0,91) в пределах нормы и были по значению близки к контролю.

Таким образом, применение комплекса биотест-объектов с разной степенью чувствительности к экотоксикантам позволило наиболее полно охарактеризовать степень ток-

сичности почвы г. Саратова и оценить уровень техногенной нагрузки.

Учитывая интегративный характер определенной токсичности, полученные результаты можно использовать для оценки и прогноза экологической ситуации в целом. Мониторинг территорий г. Саратова с токсичной почвой позволит охарактеризовать тенденции и скорость распространения экотоксикантов, установить эффективность проводимых экологических мероприятий и выработать стратегию реабилитации городских территорий.

## Литература

1. Биологический контроль окружающей среды: биоиндикация и биотестирование: учеб. пособие / Под ред. О.П. Мелеховой и Е.И. Сарапульцевой. М.: «Академия», 2008. 288 с.
2. Виноходов Д. О., Пожаров А. В. Методологические особенности токсикологических тестов с инфузориями // Известия СПбГЭ-ТУ «ЛЭТИ». Серия «Биотехнические системы в медицине и экологии». 2006. Вып. 3. С. 60–67.
3. Жмур Н.С., Орлова Т.Л. Методика определения токсичности вод, водных вытяжек из почв, осадков сточ-

ных вод и отходов по изменению уровня флуоресценции хлорофилла и численности клеток водоросли / Федеральный реестр. ФР.1.39.2001.00284. Москва: «Акварос», 2001. 44 с.

4. Григорьев Ю.С. Методика определения токсичности проб поверхностных пресных, грунтовых, питьевых, сточных вод, водных вытяжек из почвы, осадков сточных вод и отходов по изменению оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer). Красноярск: КрасГУ, 2004. 19 с.

5. Григорьев Ю.С. Методика определения токсичности водных вытяжек из почв, осадков, сточных вод и отходов, питьевой, сточной и природной воды по смерт-

ности тест-объекта *Daphnia magna* Straus. Красноярск: КрасГУ, 2006. 46 с.

6. ГОСТ 12038-84 Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести.

7. ГОСТ 12039-82 Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения жизнеспособности.

8. Кабиров Р.Р., Сагитова А.Р., Суханова Н.В. Разработка и использование многокомпонентной тест-системы для оценки токсичности почвенного покрова городской территории // Экология. 1997. № 6. С. 408–411.

9. Зайцев Т.Н. Математический анализ биологических данных. М.: Наука, 1991. 268 с.

## Биоаккумуляция и физиологические реакции растений на техногенное загрязнение среды ртутью

© 2011. И. Г. Захожий, к.б.н., н.с., И. В. Далькэ, к.б.н., н.с.,  
А. Н. Низовцев, вед. инженер, Т. К. Головки, д.б.н., зав. лабораторией,  
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,  
e-mail: zakhozhiy@ib.komisc.ru

Исследовали биоаккумуляцию и влияние ртути (Hg) на процессы жизнедеятельности растений, произрастающих на импактной территории национального парка «Югыд-Ва» (Республика Коми). При содержании Hg в почве, равном 3–7 ПДК, её концентрация в органах растений была в десятки раз выше, чем у растений с фоновой территории. Корни растений содержали существенно больше Hg, чем надземные органы. Загрязнение почвы ртутью вызывало 2–3-кратное подавление ассимилирующей способности листьев, приводило к нарушению соотношения фотосинтеза и дыхания.

Bioaccumulation and the effect of mercury (Hg) on physiological activity of plants grown in polluted sites of the national park «Yugyd-Va» (Komi Republic) were investigated. At soil content of Hg over 3–7 OEL, Hg concentration in plant organs was essentially higher than in plants from background site. Plant roots accumulated 10–20 times more Hg than aboveground parts. Soil Hg pollution inhibited CO<sub>2</sub> assimilation in leaves and destroyed balance between photosynthesis and respiration.

**Ключевые слова:** тяжёлые металлы, ртуть, природные экосистемы, растения, биоаккумуляция, физиологические реакции

**Key words:** heavy metal, mercury, native ecosystems, plants, bioaccumulation, physiological responses

Ртуть относится к группе тяжёлых металлов (ТМ), и по степени токсического действия на биоту ей присвоен первый класс опасности [1]. Уникальность данного металла состоит в том, что при обычной температуре и давлении ртуть находится в жидком состоянии. В атмосфере она чаще всего представлена в элементном состоянии (Hg<sup>0</sup>). В гидросфере преобладает двухвалентный ион (Hg<sup>+2</sup>), в литосфере – сульфид ртути (HgS). В природных водах и почве при участии микроорганизмов ртуть легко переходит в метилртуть [2]. Процессы метилирования возможны и в высших растениях. По сравнению с неорганическими формами метилртуть легче проникает через биомембраны [3]. Попадание ртути даже в низких концентрациях в биологические системы может оказаться токсичным для чувствительных видов.

По современным оценкам на долю антропогенных выбросов приходится 40–70% от поступающего ежегодно в атмосферу количества ртути [4]. Среди антропогенных источников с высокой эмиссией ртути в окружающую среду выделяют предприятия металлургической, химической и электротехнической промышленности, производящие и использу-

ющие ртуть в производственных циклах. Дополняют этот перечень предприятия по переработке промышленных и бытовых отходов. Значительные выбросы ртути имеют место при сжигании ископаемого топлива. Загрязнение среды ртутью происходит и при её использовании для добычи золота и серебра, с которыми ртуть образует амальгаму.

Из-за широкого распространения антропогенного загрязнения ртутью актуальной становится проблема оценки её влияния на функционирование экосистем и в первую очередь на растения как первичные продуценты органического вещества.

В литературе имеются данные о том, что ртуть как высокотоксичный ТМ ингибирует рост, нарушает минеральное питание и другие функции растений [5–8]. Токсическое действие ртути и других ТМ на растительный организм обусловлено способностью взаимодействовать с различными биополимерами и макромолекулами, влиять на их структуру, вытеснять металлы из каталитических центров ферментов. Связывание, деполимеризация и дезактивация макромолекул приводят к нарушению клеточного метаболизма. При сильном загрязнении ТМ вызывают уси-

ление продукции активных форм кислорода, нарушение про/антиоксидантного равновесия и как следствие повреждение клеток и тканей растительного организма. Негативное влияние ТМ на растения может проявляться в нарушении важнейшей функции растений – фотосинтеза [9, 10].

Целью данной работы было изучение биоаккумуляции и влияния ртути на фотосинтетическую активность растений, произрастающих на техногенно загрязнённых участках в национальном парке «Югыд-Ва» (Республика Коми).

### Район, методы и объекты исследования

Район исследований расположен в северной части национального парка «Югыд-Ва» (Приполярный Урал), в подзоне крайне-северной тайги (N 65°20,436' E 60°42,787'). Климат здесь суровый с длительной, холодной зимой и коротким прохладным летом; активный вегетационный период длится примерно 60 дней. Среднегодовая температура воздуха составляет -4,8 °С, средняя температура самого теплого месяца июля немного выше +12 °С. Растительный покров территории довольно пёстрый. До высоты 500 м над уровнем моря распространены леса, выше они сменяются ерниковыми и мохово-лишайниковыми горными тундрами. По данным В. А. Мартыненко и С. В. Дёгтевой [11], локальная флора района насчитывает 371 вид. Основной жизненной формой являются многолетние травы (87%).

В пос. Сана-Вож на территории бывшего обогатительного цеха, где металлическая ртуть применялась для извлечения золота из рудного концентрата, было выделено два загрязнённых участка: участок отжига ртути из амальгамы (участок № 1) и участок, примыкающий к помещению для хранения металлической ртути (участок № 2) [12]. Условно чистый (фоновый участок) был выбран с учётом ландшафта местности и возможного направления миграции талых и грунтовых вод и находился на удалении от загрязнённой территории более чем на 500 м. Участки расположены в лесном поясе на высоте 350–400 м над уровнем моря.

Объектом исследования служили четыре вида растений, встреченных на всех опытных участках: иван-чай узколистый – *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop., щучка дернистая – *Deschampsia cespitosa* (L.) Beauv., купырь лесной – *Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm. и дудник лесной – *Angelica sylvestris* L.

Все работы были проведены в июле 2010 г. в период цветения – начала плодоношения растений. Образцы листьев для определения содержания пигментов отбирали с 5–10 растений в 3–5-кратной биологической повторности. Содержание зелёных и жёлтых пигментов определяли спектрофотометрически на приборе UV-1700 (Shimadzu, Япония) в ацетоновой вытяжке при длинах волн 662, 644 нм (хлорофиллы) и 470 нм (каротиноиды) [13].

Состояние фотосинтетического аппарата (ФСА) характеризовали по показателям индуцированной флуоресценции хлорофилла [14, 15], измеренным с помощью портативного флуориметра РАМ-2100 (Walz, Германия) на средней части функционально зрелых листьев в 10–15-кратной биологической повторности. Непосредственно перед проведением измерений листья отделяли от растений и выдерживали в темноте в течение 30 мин. Темновую адаптацию и последующие измерения проводили при температуре 22–25 °С во влажной среде. После темновой адаптации листьев регистрировали фоновый (F<sub>0</sub>) и максимальный (F<sub>m</sub>) уровни флуоресценции. F<sub>0</sub> измеряли на слабом красном свете, не вызывающем фотохимической реакции. F<sub>m</sub> измеряли после короткого импульса (0,8 с) насыщающего света 8000 мкмоль фотонов/м<sup>2</sup>с. Максимальный квантовый выход фотохимической активности ФС2 (F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>) рассчитывали как (F<sub>m</sub>-F<sub>0</sub>)/F<sub>m</sub>. Для анализа эффектов ртути на фотосинтетический аппарат использовали также показатель F<sub>v</sub>/F<sub>0</sub>, который характеризует размер и число активных фотосинтетических центров в хлоропласте.

Измерения интенсивности СО<sub>2</sub>/Н<sub>2</sub>О-газообмена листьев растений проводили при помощи ИК-газоанализатора LCPro+ (ADC, Великобритания) в 6–10 биологических повторностях. Для получения световой зависимости фотосинтеза отделённые непосредственно перед измерениями от растений листья экспонировали при разной освещённости в диапазоне ФАР от 0 до 2000 мкмоль квантов/м<sup>2</sup>с. Интенсивность дыхания определяли в затемнённой камере. Эффективность использования воды листьями (ЭИВ) находили по соотношению скорости фотосинтеза и транспирации.

Параллельно производили отбор растительных образцов для проведения количественного химического анализа на содержание ртути. Растения (7–10 шт.) разделяли по органам и высушивали до воздушно-сухого состояния при температуре 20–25 °С.

Отбор почвенных образцов осуществляли на глубине корнеобитаемого слоя (0–20 см). Из почвенных проб, высушенных при температуре 25 °С до воздушно-сухого состояния, отделяли крупный галечник и щебень. Для лабораторных исследований оставляли фракцию мелкозёма с диаметром частиц не более 1 мм.

Содержание ртути в растительных и почвенных образцах определяли атомно-абсорбционным методом на спектрометре РА-915+ с приставкой ПИРО-915 (Люмекс, Россия).

В таблицах и на графиках представлены средние арифметические значения и их стандартные ошибки.

### Результаты и их обсуждение

Фоновые уровни ртути в незагрязнённых почвах мира колеблются в широких пределах – от 10 до 800 мкг/кг [16]. Анализ полученных нами данных (табл. 1) показал, что валовое содержание ртути в корнеобитаемом слое почвы фонового участка составляло 100–140 мкг/кг. Эти величины соответствуют средним значениям содержания ртути в органогенном горизонте почв таёжной зоны Республики Коми, сформированных на суглинистых, песчаных и супесчаных породах [17].

На участках № 1 и № 2 содержание Hg в почвенных образцах варьировало в широких пределах – от 1080 до 24000 мкг/кг. Средние значения содержания Hg превышали фоновые на 1-2 порядка. Для нормирования содержания ТМ в почвах установлены их предельно допустимые концентрации (ПДК). Для ртути этот показатель составляет 2,1 мг/кг (почвы) [18]. На исследованных нами загрязнённых участках содержание ртути превышало установленные для почв значения ПДК в среднем в 3-7 раз.

Анализ растительных образцов, отобранных на загрязнённых участках, выявил, что ртуть накапливалась больше в подземной части растений, чем в надземных органах (табл. 2). По содержанию ртути органы растений располагались в следующий убывающий ряд: подземная часть (корни и корневища) > листья >> стебли.

Выявлена положительная зависимость содержания ртути в растении от степени загрязнения среды. С увеличением меркуризации корнеобитаемого слоя почвы концентрация Hg в органах растений возрастала в несколько раз, а в корнях – на 2-3 порядка. Из таблицы 2 видно, что по сравнению с другими видами больше всего ртути накапливали корни *D. cespitosa*. В надземной части (листья, стебли) *D. cespitosa* содержание Hg было в 20-50 раз ниже. Такие же закономерности были характерны и для других видов изученных нами растений. Это свидетельствует о способности подземных органов концентрировать ртуть и ограничивать её поступление в надземную часть. Следует также отметить, что содержание Hg в генеративных органах растений было существенно меньше, чем в специализированных органах фотосинтеза – листьях.

Согласно данным литературы [9], Hg оказывает влияние на фотосинтез растений, нарушая световые и темновые реакции. Попадая в клетки мезофилла листьев, ТМ подавляют синтез фотосинтетических пигментов, усиливают окислительную деградацию пигмент-белковых комплексов и компонентов тилакоидных мембран, нарушают взаимодействие фотосистем, инактивируют ферменты углеродного метаболизма [9, 10].

Изучение пигментного комплекса растений показало, что техногенное загрязнение почвы ртутью не оказывало существенного влияния на содержание хлорофиллов и каротиноидов в листьях *C. angustifolium*, тогда как пигментный комплекс растений *D. cespitosa* был более чувствительным к меркуризации корнеобитаемой среды (табл. 3). Содержание зелёных и жёлтых пигментов в листьях *D. cespitosa* на загрязнённых участках было достоверно ниже ( $p > 0,05$ ), чем у растений с фоновой территории. Соотношение зелёных и жёлтых пигментов при этом изменялось незначительно. По-видимому, эффект ртутного загрязнения на пигментный аппарат растений зависит как от уровня загрязнения среды, так и от генетически детерминированной устойчивости вида к присутствию в среде Hg.

Мы оценивали функциональное состояние ФС 2 фотосинтетического аппарата расте-

Таблица 1  
Валовое содержание ртути в почвах фонового и загрязнённых участков, мкг/кг сухой почвы

Глубина отбора пробы, см	Фоновый участок	Участок № 1	Участок № 2
0-5	140	13950	8920
5-20	100	6810	14760

Таблица 2

Валовое содержание ртути в органах растений, мкг/кг сухой массы

Объект	Фоновый участок	Участок № 1	Участок № 2
<i>Chamaenerion angustifolium</i>			
Листья	10	32	570
Стебли	2	21	110
Подземные органы	13	419	1040
<i>Deschampsia cespitosa</i>			
Листья	10	46	120
Стебли	3	9	12
Соцветия	4	15	17
Корни	5	700	8100
<i>Anthriscus sylvestris</i>			
Листья	46	200	140
Стебли	67	30	81
Соцветия	9	82	20
Подземные органы	110	290	490
<i>Angelica sylvestris</i>			
Листья	11	–	93
Стебли	7	–	160
Корневище	1	–	2000
Корни	9	–	1900

Примечание: «–» – нет данных.

Таблица 3

Содержание фотосинтетических пигментов в листьях растений, произрастающих на фоновой и загрязнённых территориях, мг/г сухой массы

Вариант	Хлорофиллы		Сумма каротиноидов	Хлорофиллы/ каротиноиды
	a+b	a/b		
<i>Chamaenerion angustifolium</i>				
Фоновая территория	4,46 ± 0,57	2,31 ± 0,05	1,09 ± 0,19	4,14 ± 0,26
Участок №1	4,68 ± 0,14	2,47 ± 0,03	1,15 ± 0,06	4,08 ± 0,10
Участок №2	5,21 ± 0,50	3,12 ± 0,57	1,23 ± 0,19	4,29 ± 0,32
<i>Deschampsia cespitosa</i>				
Фоновая территория	6,30 ± 0,09	3,18 ± 0,13	1,30 ± 0,04	4,84 ± 0,19
Участок №1	5,23 ± 0,23	3,40 ± 0,04	1,12 ± 0,06	4,68 ± 0,04
Участок №2	3,93 ± 0,65*	3,09 ± 0,49	0,80 ± 0,15*	4,95 ± 0,48

Примечание: \* – различия достоверны при  $p \geq 0,05$ .

ний на загрязнённых ртутью участках по величине отношения вариабельной флуоресценции хлорофилла к максимальному ( $F_v/F_m$ ) и минимальному значению ( $F_v/F_o$ ) флуоресценции. Величины  $F_v/F_m$  и  $F_v/F_o$ , равные соответственно около 0,8 и 4,0 или несколько выше, указывают на нормальное состояние ФС 2 растений [14, 19].

У исследованных нами видов величина  $F_v/F_m$  варьировала в пределах от 0,76 до 0,83 отн. ед. (рис. 1). Небольшое (на 10%), но достоверное снижение  $F_v/F_m$  обнаружено у листьев растений *C. angustifolium*, произрастающих на более загрязнённом участке № 2. Сходные тенденции были установлены и при анализе показателя  $F_v/F_o$ , характеризующего число и размер активных фотосинтетических

центров ФС 2 хлоропластов. Следовательно, если судить по показателям флуоресценции хлорофилла, можно говорить об отсутствии или незначительном воздействии ртутного загрязнения корнеобитаемой среды на активность ФС 2 изученных видов. По-видимому, возможности антиоксидантной и репарационной систем хлоропластов были достаточны для поддержания целостности и функциональной активности комплексов ФС 2. Несмотря на высокое содержание поллютанта, механизмы внутриклеточной детоксикации поступившей в ткани ртути позволяют фотосинтетическому аппарату растений эффективно осуществлять световые реакции фотосинтеза.

CO<sub>2</sub>-газообмен, отражающий интенсивность фотосинтетического метаболизма угле-



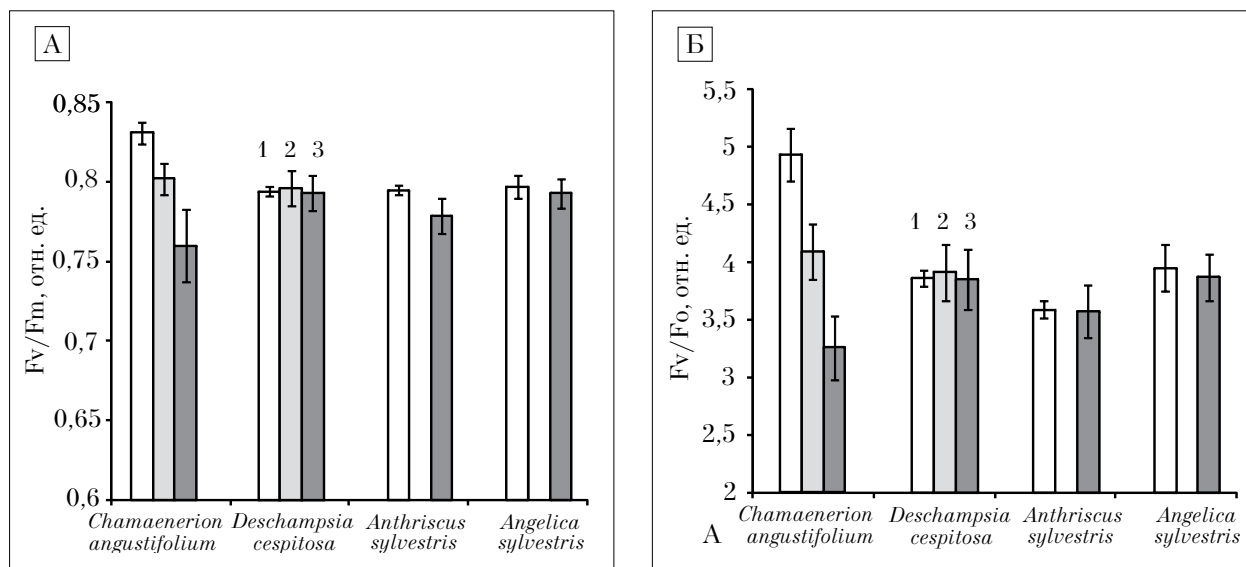


Рис. 1. Показатели функциональной активности фотосинтетического аппарата растений на фоновом (1) и загрязнённых ртутью участках (2, 3): А – Fv/Fm (максимальная эффективность фотохимии ФС 2); Б – Fv/Fo (показатель, характеризующий размер и число активных фотосинтетических центров ФС 2 хлоропластов)

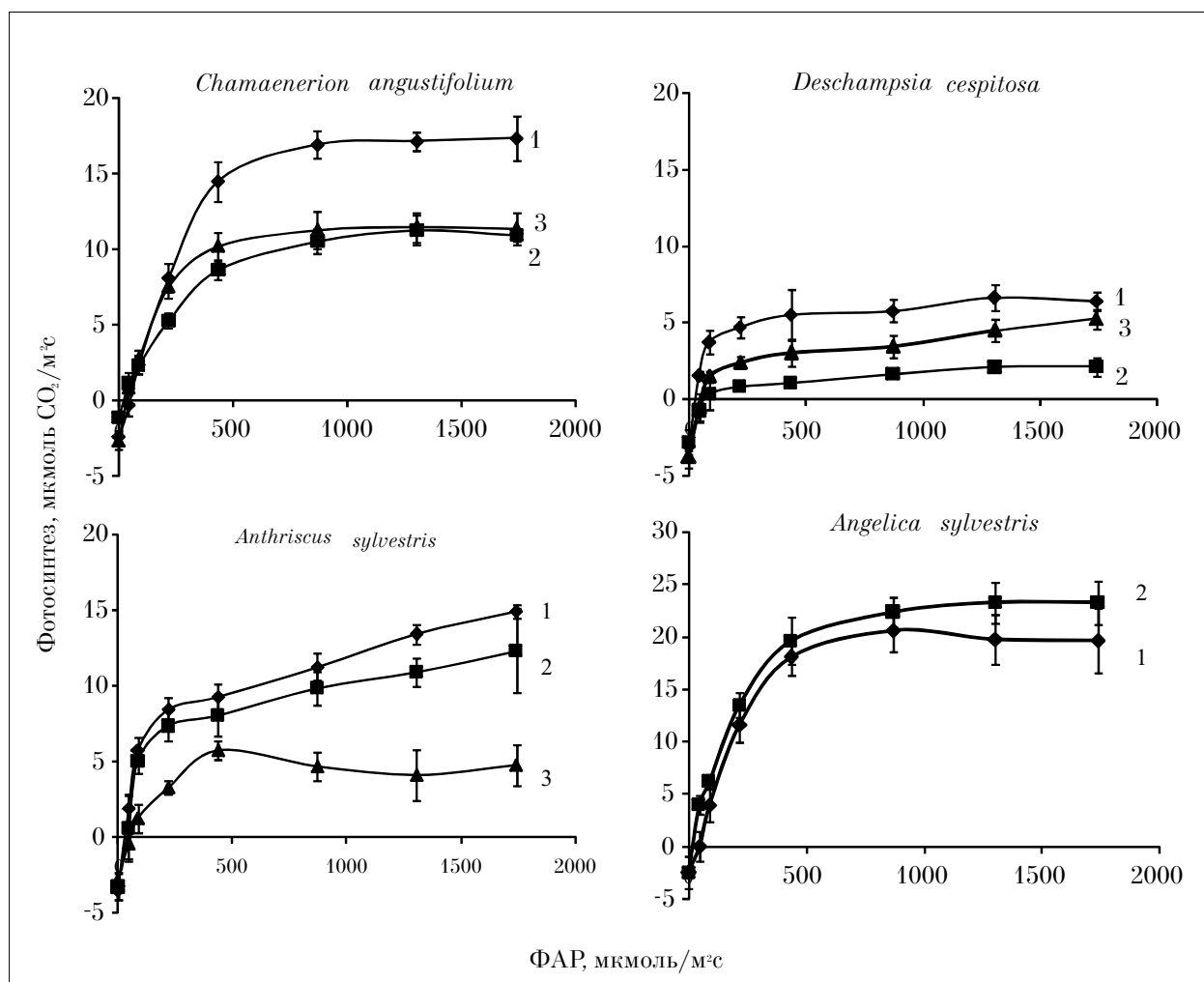


Рис. 2. Зависимость CO<sub>2</sub>-газообмена листьев от освещённости у растений, произрастающих на фоновом (1) и загрязнённых ртутью участках (2, 3)

рода, является одним из наиболее информативных показателей изменения состояния растений под влиянием внешних факторов. Как видно на рисунке 2, исследованные виды отличались по способности ассимилировать CO<sub>2</sub>. Среди растений с фонового участка наибольшей скоростью видимого поглощения CO<sub>2</sub> при насыщающих фотосинтез значениях ФАР характеризовались листья *Angelica sylvestris*. Скорость фотосинтеза листьев *D. cespitosa* была вчетверо ниже. Загрязнение среды ртутью приводило к подавлению ассимилирующей активности листьев у всех видов, за исключением *Angelica sylvestris*.

Реакция дыхания листьев растений на загрязнение была неоднозначной (табл. 4). Так, для *C. angustifolium* отмечено сильное снижение (на 50%) дыхания листьев на участке № 1 и незначительное (на 10%) увеличение его скорости на участке № 2 по сравнению с фоновым участком. Такие же изменения дыхания листьев были характерны для *D. cespitosa*. Для листьев растений *Anthriscus sylvestris* отмечено снижение дыхания на меркуризованных участках. Дыхание листьев *Angelica sylvestris* было одинаковым на всех участках.

На загрязнённых участках у всех видов, за исключением *Angelica sylvestris*, величина

соотношения дыхание/фотосинтез повышалась. Это может быть обусловлено увеличением затрат на репарационные процессы и/или необходимостью поддержания энергопластического баланса у импактных растений [7, 20].

У растений на загрязнённых ртутью участках наблюдалось снижение эффективности использования воды, о чём свидетельствует соотношение фотосинтеза и транспирации (табл. 4). Известно, что ионы ртути в больших концентрациях ингибируют транспорт воды, блокируя работу аквапоринов – белков водных каналов клеточных мембран [21]. В наших опытах снижение транспирации листьев было отмечено у растений *Anthriscus sylvestris*, произрастающих на участке № 2. У других видов скорость транспирации листьев была выше на импактных участках, чем на фоновом участке.

По характеру накопления ТМ выделяют три основные группы растений: эксклюдеры, индикаторы, аккумуляторы [22]. Изученные нами виды растений можно отнести к эксклюдерам (исключателям), так как с повышением содержания ртути в корнеобитаемой среде её концентрация в подземных органах возрастает гораздо сильнее, чем в надземных органах. Об этом свидетельствует снижение соотноше-

Таблица 4

CO<sub>2</sub>-газообмен и транспирация листьев растений на фоновом и загрязнённых ртутью участках

Вариант	Дыхание, мкмоль CO <sub>2</sub> /м <sup>2</sup> с	Фотосинтез, мкмоль CO <sub>2</sub> /м <sup>2</sup> с	Транспирация, ммоль H <sub>2</sub> O/м <sup>2</sup> с	ЭИВ	Дыхание / фотосинтез, %
<i>Chamaenerion angustifolium</i>					
Фоновая территория	2,38±0,40	17,37±1,46	1,11±0,07	16,5±1,7	14
Участок №1	1,09±0,28	11,30±1,01	1,48±0,04	7,6±0,7	10
Участок №2	2,65±0,51	11,50±0,99	2,76±0,11	4,2±0,3	23
<i>Deschampsia cespitosa</i>					
Фоновая территория	3,11±0,26	6,62±0,87	0,97±0,02	6,8±0,9	47
Участок №1	2,81±0,79	2,13±0,62	1,58±0,01	1,4±0,4	132
Участок №2	3,89±1,60	5,23±0,67	1,55±0,08	3,5±0,5	74
<i>Anthriscus sylvestris</i>					
Фоновая территория	3,50±0,52	14,90±1,15	2,61±0,04	5,7±0,5	24
Участок №1	3,28±0,86	12,33±2,79	2,90±0,23	4,3±0,9	27
Участок №2	2,83±0,53	4,75±1,32	1,35±0,18	3,1±1,1	60
<i>Angelica sylvestris</i>					
Фоновая территория	2,43±1,51	20,62±2,00	2,26±0,24	9,5±0,8	12
Участок №1	2,50±0,38	23,23±2,08	3,92±0,29	6,0±0,4	11

Примечание: ЭИВ – эффективность использования воды листьями растений, мкмоль CO<sub>2</sub>/ммоль H<sub>2</sub>O.

ния концентрации ртути в системе побег/корень. Подземная часть исследованных видов растений проявляет выраженную барьерную функцию. Однако корневая система растений неспособна полностью предотвратить поступление ртути в надземные органы, особенно при её высокой концентрации в почве. Токсическое действие поступившей в листья ртути проявлялось в нарушении соотношения фотосинтеза и дыхания – процессов, ответственных за энергетический баланс. Снижение интенсивности ассимиляции CO<sub>2</sub> у растений на загрязнённой территории при сохранении максимальной способности хлоропластов к фотохимии может быть связано с инактивацией ферментов цикла Кальвина, участвующих в восстановлении углерода. По мнению ряда авторов [16, 23, 24], это является одной из основных причин отрицательного влияния ТМ на фотосинтез.

Таким образом, нами выявлены закономерности биоаккумуляции и распределения ртути в органах растений, произрастающих на территории бывшего золотообогатительного цеха на Приполярном Урале. Установлена положительная зависимость между содержанием ртути в растениях и в почве. С увеличением меркуризации корнеобитаемого слоя почвы концентрация Hg в органах растений возрастала в несколько раз, а в корнях – на 2-3 порядка. Техногенное загрязнение почвы ртутью не оказывало существенного влияния на пигментный комплекс и потенциальную фотохимическую активность ФС 2. Однако присутствие ртути в почве в концентрациях 6,8 мг/кг и выше вызывало 2-3-кратное подавление ассимилирующей способности листьев большинства исследованных видов.

В целом полученные данные свидетельствуют об эффективности применения эколого-физиологического подхода для биомониторинга, особенно в случаях отсутствия видимых токсических проявлений действия поллютантов.

### Литература

1. Черных Н.А., Милащенко Н.З., Ладонин В.Ф. Экотоксикологические аспекты загрязнения почв тяжёлыми металлами. Пушино. 2001. 148 с.
2. Трахтенберг И.М., Коршун М.Н. Ртуть и её соединения в окружающей среде (гигиенические и экологические аспекты). Киев: Выща школа, 1990. 232 с.
3. Ртуть: экологические аспекты применения (гигиенические критерии состояния окружающей среды). Женева: ВОЗ, 1992. 127 с.
4. Баргальи Р. Биогеохимия наземных растений. М.: ГЕОС, 2005. 457 с.

5. Patra M., Sharma A. Mercury Toxicity in Plants // Botanical Review. 2000. V. 66. P. 379–422.
6. Скугорева С.Г., Огородникова С.Ю., Головки Т.К., Ашихмина Т.Я. Фитотоксичность фосфорорганических соединений и ртути. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 152 с.
7. Garmash E., Skugoreva S., Golovko T. Plant Responses to Cadmium and Mercury Stress // Handbook of Plant and Crop Stress. 3d Edition / Ed. Pessarakli M. New-York e.a.: Marcel Dekker, Inc., 2010. P. 713–732.
8. Israr M., Sahi S., Datta R., Sarkar D. Bioaccumulation and Physiological Effects of Mercury in *Sesbania drummondii* // Chemosphere. 2006. V. 65. P. 591–598.
9. Krupa Z., Baszynski T. Some Aspects of Heavy Metals Toxicity Towards Photosynthetic Apparatus: Direct and Indirect Effects on Light and Dark Reactions // Acta Physiol. Plant. 1995. V. 17. P. 177–190.
10. Prasad M.N.V., Strzalka K. Impact of Heavy Metal on Photosynthesis // Heavy Metal in Plants from Molecules to Ecosystem / Eds. Prasad M.N.V., Hagemeyer J. Berlin: Springer, 1999. P. 117–139.
11. Мартыненко В.А., Дегтева С.В. Конспект флоры национального парка «Югыд-Ва» (Республика Коми). Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 108 с.
12. Низовцев А.Н., Кондратенко Б.М., Симонов Г.А., Габов Д. М., Кожевников Р.В. Ртуть в техногенно нарушенных грунтах Национального парка // Современные проблемы загрязнения почв: Матер. III междунар. науч. конф. М.: МГУ, 2010. С. 135–136.
13. Маслова Т.Г., Попова И.А., Попова О.Ф. Критическая оценка спектрофотометрического метода количественного определения каротиноидов // Физиология растений. 1986. Т. 33. С. 615–619.
14. Krause G.H., Weis E. Chlorophyll Fluorescence and Photosynthesis: The Basis // Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 1991. V. 42. P. 313–349.
15. Lichtenthaler H., Buschmann C., Knapp M. Measurement of Chlorophyll Fluorescence Kinetics (Kautsky Effect) and the Chlorophyll Fluorescence Decrease Ratio (R<sub>FD</sub>-Values) with the PAM-fluorometer // Analytical Methods in Plant Stress Biology / Eds Filek M., Biesaga-Kościełniak Y, Marcińska I. Kraków. 2004. P. 93–111.
16. Орлов Д.С. Химия почв. М.: Изд-во МГУ, 1985. 376 с.
17. Низовцев А.Н., Безносиков В.А., Кондратенко Б.М., Лодыгин Е.Д. Фоновое содержание ртути в почвах таёжной зоны Республики Коми // Теоретическая и прикладная экология. 2008. № 1. С. 45–50.
18. Перечень предельно допустимых концентраций и ориентировочно допустимых химических веществ в почве № 6229-91. Утв. МЗ СССР 19.11.91.
19. Dan T.V., KrishnaRaj S., Saxena P.K. Metal Tolerance of Scented Geranium (*Pelargonium* sp., Frensham): Effects of Cadmium and Nickel on Chlorophyll Fluorescence Kinetics // Int. J. Phytorem. 2000. № 2. P. 91–104.

20. Семихатова О.А. Энергетика дыхания растений в норме и при экологическом стрессе. Л.: Наука, 1990. 72 с.

21. Шапигузов А.Ю. Аквапорины: строение систематика и особенности регуляции // Физиология растений. 2004. Т. 51. № 1. С. 142–152

22. Baker A.J.M. Accumulators- and Excluders-strategies in the Response of Plants to Heavy Metals // J. Plant Nutrit. 1981. № 3. P. 643–654.

23. Siedlecka A., Krupa Z. Cd/Fe interaction in Higher Plants – its Consequences for the Photosynthetic Apparatus // Photosynthetica. 1999. V. 36. № 3. P. 321–331.

24. Sheoran I.S., Singal H.R., Singh R. Effect of Cadmium and Nickel on Photosynthesis and Enzymes of the Photosynthetic Carbon Reduction Cycle in Pigeonpea (*Cajanus cajan* L.) // Photosynthetic Res. 1990. V. 23. P. 345–351.

*Работа выполнена в рамках комплексного проекта Института биологии Коми НЦ УрО РАН «Биологическое разнообразие наземных и водных экосистем Приполярного Урала: механизмы формирования, современное состояние, прогноз естественной и антропогенной динамики» (рег. № 09-П-4-1032) по Программе Президиума РАН № 23 «Биологическое разнообразие».*

УДК 581.526.35:581.116:581.13 (1-924.82)

### **Оценка потоков диоксида углерода в растительных сообществах мезо-олиготрофного болота средней тайги**

© 2011. О. А. Михайлов<sup>1</sup>, аспирант, С. В. Загирова<sup>1</sup>, д.б.н., зав. отделом, М. Н. Мигловец<sup>1</sup>, аспирант, Ю. Шнайдер<sup>2</sup>, к.б.н., М. Гажович<sup>2</sup>, к.б.н., Л. Кутцбах<sup>3</sup>, профессор,

<sup>1</sup> Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,

<sup>2</sup> Институт ботаники и ландшафтной экологии Эрнст Моритц Арндт Университета Грайфсвальда,

<sup>3</sup> Институт почвоведения Университета Гамбурга,

e-mail: mikter@mail.ru; zagirova@ib.komisc.ru; miglovec@bk.ru

В статье приведены результаты исследований потоков диоксида углерода с поверхности мезо-олиготрофного болота средней тайги. Установлено, что наиболее интенсивно выделение углекислого газа в атмосферу идет в кустарничковых сообществах кочек. Стабильный сток диоксида углерода из атмосферы в болотные сообщества наблюдается в сфагновых сообществах микропонижений.

The article presents the results of investigation of CO<sub>2</sub> fluxes from the surface of mezo-oligotrophic peatland of middle taiga. It was stated that the most intense CO<sub>2</sub> emission was from the associations of hummocks with shrub vegetation. The stable sink of CO<sub>2</sub> from the atmosphere to the peatland was noticed in Sphagnum communities of hollows.

**Ключевые слова:** средняя тайга, мезо-олиготрофное болото, потоки диоксида углерода, парниковые газы

**Key words:** fluxes of carbon dioxide, emission, flow, dynamics, swamps

В России оторфованные земли занимают около 22% территории и играют важную роль в поддержании газового состава атмосферы [1].

На территории Республики Коми болота и заболоченные земли занимают свыше 30 тыс. км<sup>2</sup>, или 9,6%, в некоторых речных бассейнах – до 40–80% [2]. Процессы стока/эмиссии парниковых газов в болотных экосистемах бореальной зоны Европейского Северо-Востока России слабо изучены. Имеются лишь

данные о потоках метана и диоксида углерода в тундровых сообществах [3, 4]. Величина эмиссии углекислого газа с поверхности болот зависит от таких факторов, как характер микрорельефа, видовой состав растительности и гидротермический режим.

Целью наших исследований являлась характеристика суточной и сезонной динамики стока и эмиссии CO<sub>2</sub> в растительных сообществах мезо-олиготрофного болота, расположенного в подзоне средней тайги.

**Объекты и методы исследования**

Исследования проводили на болоте Мэдла-Пэв-Нюр, расположенном в Сыктывдинском районе Республики Коми, в 40 км на северо-запад от г. Сыктывкара. Площадь болота составляет 2790 га, средняя мощность торфа – 1,4 м, максимальная – 3,4 м [5]. Болото располагается на второй надпойменной террасе, водоприёмниками служат р. Пожег и р. Пычим.

Для измерений потоков CO<sub>2</sub> было выбрано 6 участков, различающихся по видовому составу растений, их обилию и микрорельефу. Видовой состав и общее проективное покрытие растений на площадках, где проводили изучение потоков CO<sub>2</sub>, представлены в таблице 1. Растительность болота описывали с использованием шкалы Друде [6]. Измерения потоков CO<sub>2</sub> проводили с мая по октябрь 2008 г. камерным методом с использованием газоанализатора Li-840 (Li-Cor, США). Светлая камера была изготовлена из оргстекла и снабжена герметично закрытым отверстием для отбора газовых проб, вентилятором для перемешивания воздуха и термометрами для контроля температуры внутри и снаружи ка-

меры. Тёмная камера, изготовленная из алюминия, использовалась для измерения суммарного потока CO<sub>2</sub> с поверхности болота. При использовании светлой камеры получали величину видимого фотосинтеза, которая представляет разницу между истинным фотосинтезом и суммарным дыханием растений и почвы. Камеры устанавливали на металлические рамки размером 60х60 см с жёлобом. Во избежание потерь газа в жёлоб предварительно заливали воду. Измерения на каждой площадке проводили сначала светлой, а затем тёмной камерой несколько раз в сутки. Экспозиция составляла три минуты для каждого измерения.

Микроклиматические параметры на болоте регистрировали автоматической метеостанцией фирмы Campbell Scientific (Великобритания). Температуру почвы на участках на глубине 5–10 см измеряли автоматическими датчиками почвенных температур фирмы Нобо (США). Для определения уровня грунтовых вод использовали пластмассовые трубки, установленные в верхних горизонтах почвы.

Расчёт эмиссии и стока CO<sub>2</sub> производили в программном обеспечении Matlab.

**Таблица 1**

Характеристика микрорельефа и видового состава растений на экспериментальных участках

№ участка	Микрорельеф	Видовой состав и общее проективное покрытие растений
1	Понижение (межкочечное пространство)	Травяно-кустарничковый ярус развит слабо, доминируют <i>Scheuchzeria palustris</i> (10%) и <i>Oxycoccus palustris</i> (5%). <i>Carex limosa</i> встречается редко (<1%), единично отмечается <i>Drosera rotundifolia</i> . Моховой ярус образован мхами рода <i>Sphagnum</i> (100%).
2	Кочка	В травяно-кустарничковом ярусе доминируют <i>Chamaedaphne calyculata</i> (10%) и <i>Oxycoccus palustris</i> (5%). Некоторое пространство занимает <i>Andromeda polifolia</i> (4%). Моховой ярус образован преимущественно мхами рода <i>Sphagnum</i> (95%), небольшую площадь занимает <i>Polytrichum strictum</i> (5%).
3	Кочка	В травяно-кустарничковом ярусе доминируют <i>Chamaedaphne calyculata</i> (10%), <i>Oxycoccus palustris</i> (4%) и <i>Andromeda polifolia</i> (4%). Единично встречается <i>Carex limosa</i> . В моховом ярусе доминируют мхи рода <i>Sphagnum</i> (100%).
4	Осоково-сфагновый ковёр	В травяно-кустарничковом ярусе доминируют <i>Carex rostrata</i> (10%), <i>Oxycoccus palustris</i> (10%) и <i>Carex limosa</i> (10%). Незначительное пространство занимают <i>Andromeda polifolia</i> (4%) и <i>Scheuchzeria palustris</i> (4%). В моховом ярусе доминируют мхи рода <i>Sphagnum</i> (100%).
5	Осоково-сфагновый ковёр	В травяно-кустарничковом ярусе доминируют <i>Carex rostrata</i> (до 50%) и <i>Oxycoccus palustris</i> (10%). Единично встречается <i>Betula nana</i> . В моховом ярусе доминируют мхи рода <i>Sphagnum</i> (100%).
6	Понижение (межкочечное пространство)	В травянисто-кустарничковом ярусе здесь доминируют <i>Scheuchzeria palustris</i> (до 50%) и <i>Utricularia intermedia</i> (20%). Незначительное пространство занимают <i>Oxycoccus palustris</i> (4%), <i>Menyanthes trifoliata</i> (4%), <i>Carex limosa</i> (4%) и <i>Andromeda polifolia</i> (3%). Единично встречается <i>Betula nana</i> . Моховой ярус представлен мхами рода <i>Sphagnum</i> (80%).

Результаты и обсуждение

Наши наблюдения выявили существенное влияние микрорельефа и типа растительности на величину и направление потока углекислого газа в системе болото–атмосфера. На пониженном участке болота и осоково-сфагновом ковре в светлой камере в утренние и дневные часы суток преобладал сток углекислого газа, лишь в некоторые дни в вечерние часы отмечена его эмиссия (рис. 1). На кочке в первой половине дня происходило поглощение  $\text{CO}_2$ , а после полудня значительно возрастала эмиссия углекислого газа в атмосферу, достигая

максимальных значений в вечернее время суток. В целом же на свету максимальная величина интенсивности стока  $\text{CO}_2$  ( $-191 \text{ мкг м}^{-2}\text{с}^{-1}$ ) была характерна для растительных сообществ, в которых доминирует *Carex rostrata*.

Интенсивность темнового дыхания возрастала в течение дня, достигая максимальной величины на всех участках в вечернее время (рис. 2). Наиболее высокие значения эмиссии  $\text{CO}_2$  в тёмной камере были отмечены с поверхности кочки, а минимальные – в межкочечном пространстве.

Возможно, что активное дыхание в кустарничковых сообществах на микроповышениях

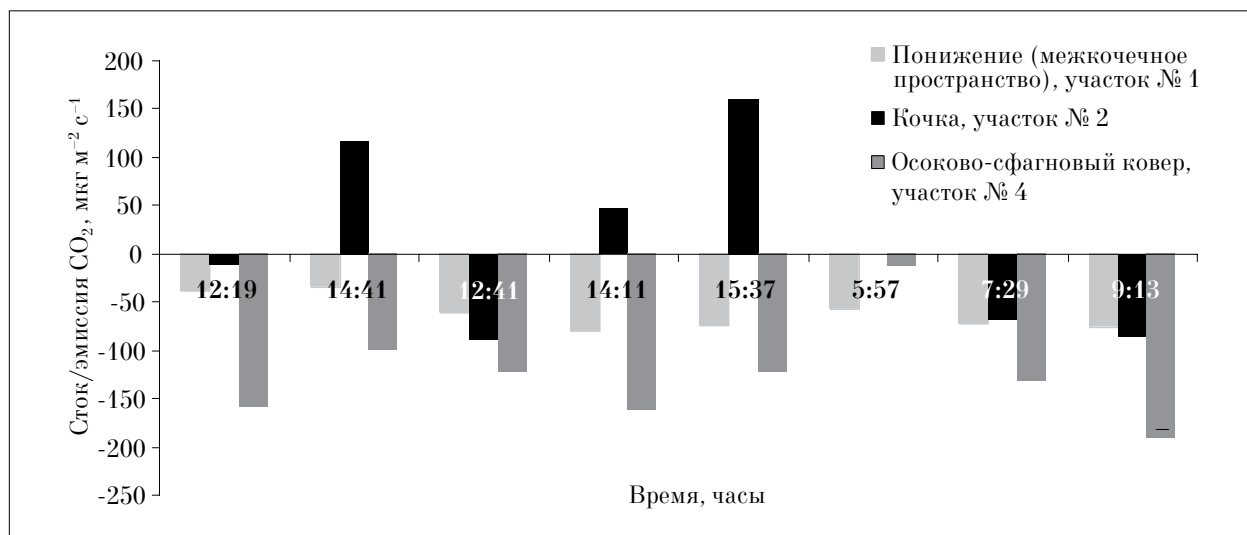


Рис. 1. Суточная динамика потоков  $\text{CO}_2$  в болотных сообществах растений на свету, 23–26 июня 2008 г.

Примечание: здесь и далее отрицательные значения соответствуют стоку, а положительные – эмиссии  $\text{CO}_2$ .

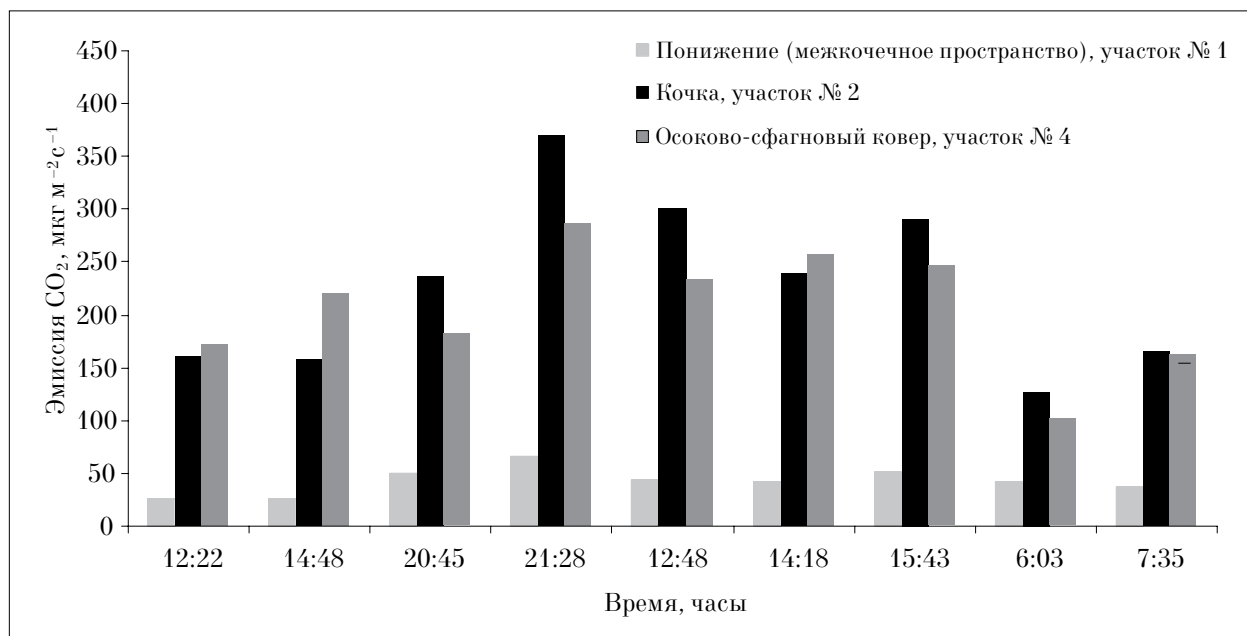


Рис. 2. Суточная динамика потоков  $\text{CO}_2$  в болотных сообществах растений в темной камере, 23–26 июня 2008 г.

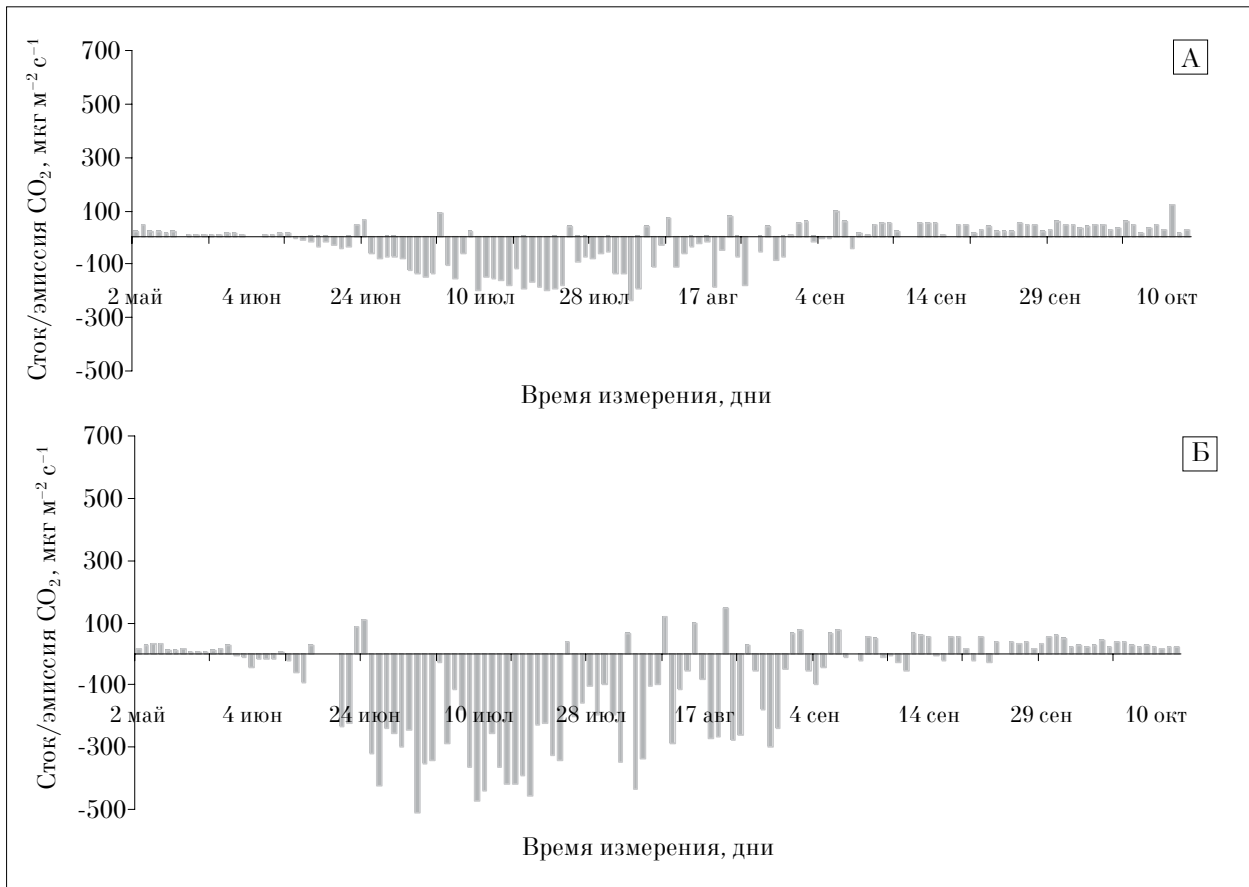


Рис. 3. Сезонная динамика потоков  $\text{CO}_2$  на участках №1 (А) и №6 (Б) в светлой камере

в дневное время суток связано с более высокой биомассой нефотосинтезирующих органов растений. Поэтому в дневное время суток величина дыхания не компенсируется фотоассимиляцией  $\text{CO}_2$ , что приводит к его эмиссии.

В сезонной динамике в понижении микрорельефа (участок № 1), где высокое проективное покрытие имеют сфагновые мхи, а травяно-кустарничковый ярус развит слабо, максимальные величины эмиссии  $\text{CO}_2$  в весенний период достигали 44,3, а осенью – 123,3  $\text{мкг м}^{-2}\text{с}^{-1}$ . В летний период в этом сообществе поглощение  $\text{CO}_2$  было выше эмиссии, его максимальная величина достигала -238,6  $\text{мкг м}^{-2}\text{с}^{-1}$ . Поэтому в целом за сезон на данном участке преобладал сток  $\text{CO}_2$  (рис. 3 А).

Сходная динамика  $\text{CO}_2$ -газообмена отмечена нами на участке № 6, также расположенном в микропонижении рельефа и характеризующемся обилием *Scheuchzeria palustris* (рис. 3 Б). В весенний период, до начала роста растений травяно-кустарничкового яруса, наблюдали незначительную эмиссию  $\text{CO}_2$  (до 39,3  $\text{мкг м}^{-2}\text{с}^{-1}$ ). Осенью эмиссия достигла 56,6  $\text{мкг м}^{-2}\text{с}^{-1}$ . В летний период отмечено значительное усиление стока диоксида углерода, величина которого была в 1,5-2 раза выше, чем на участке

№1. В течение сезона на данном участке также преобладал сток над эмиссией  $\text{CO}_2$ .

Направление потоков  $\text{CO}_2$  и их величины заметно менялись в кустарничковых сообществах, сформированных на кочках. Так, на участке № 2 весной и осенью наблюдался сток (от -79,4 до -131,7  $\text{мкг м}^{-2}\text{с}^{-1}$ ), а летом, с конца июня по август, эмиссия преобладала над стоком углекислого газа (рис. 4 А). Сходная динамика отмечена в растительном сообществе на участке № 3, где доминировали *Chamaedaphne calyculata*, *Oxycoccus palustris* и *Andromeda polifolia* (рис. 4 Б). Интенсивному образованию на микроповышениях диоксида углерода в летний период может способствовать улучшение аэрации верхнего активного слоя торфа, а также увеличение интенсивности выделения метана, который активно окисляется метанотрофными микроорганизмами в условиях меньшей обводнённости поверхности [7].

В растительных сообществах, образующих осоково-сфагновые ковры (участки № 4 и № 5), несмотря на сходство микрорельефа и видового состава растений, отмечены существенные различия в сезонной динамике  $\text{CO}_2$ -газообмена. На участке № 4, представленном

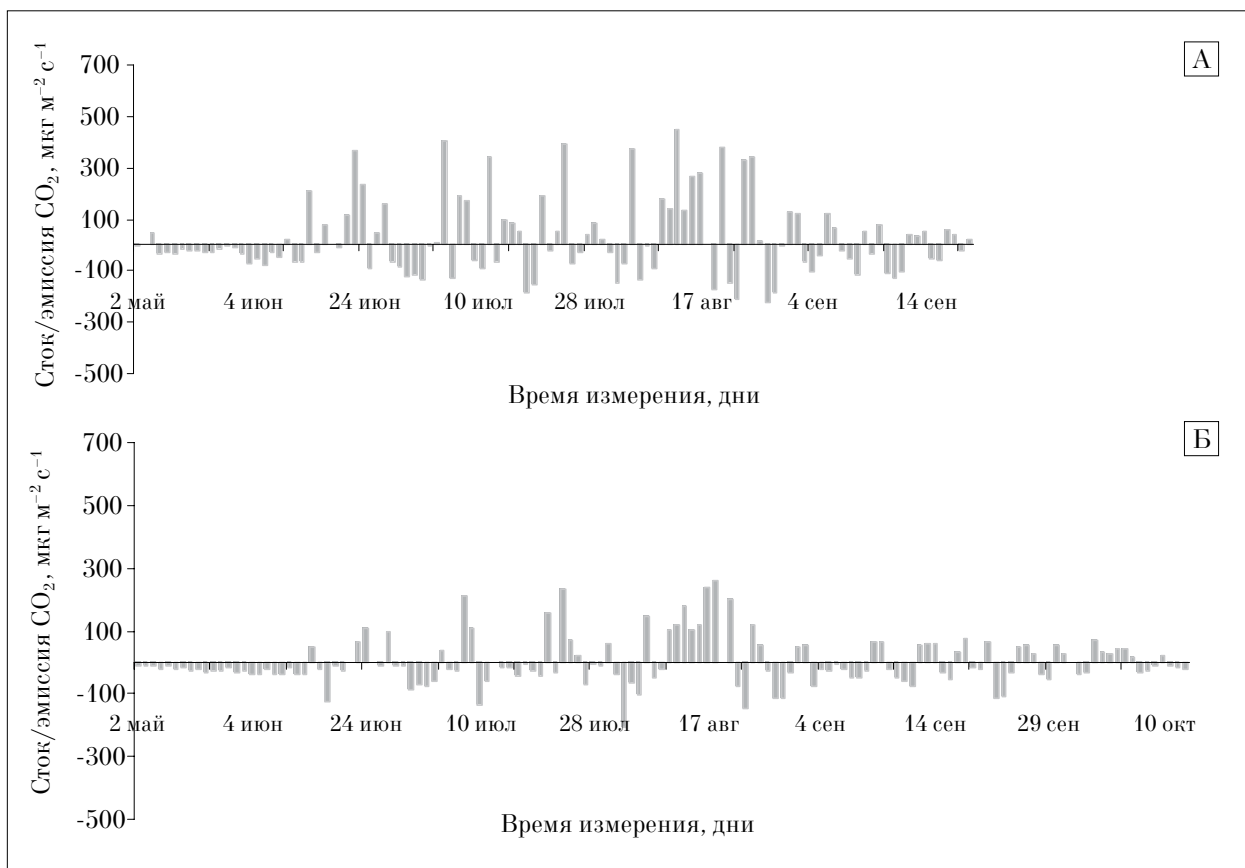


Рис. 4. Сезонная динамика потоков CO<sub>2</sub> на участках №2 (А) и №3 (Б) в светлой камере

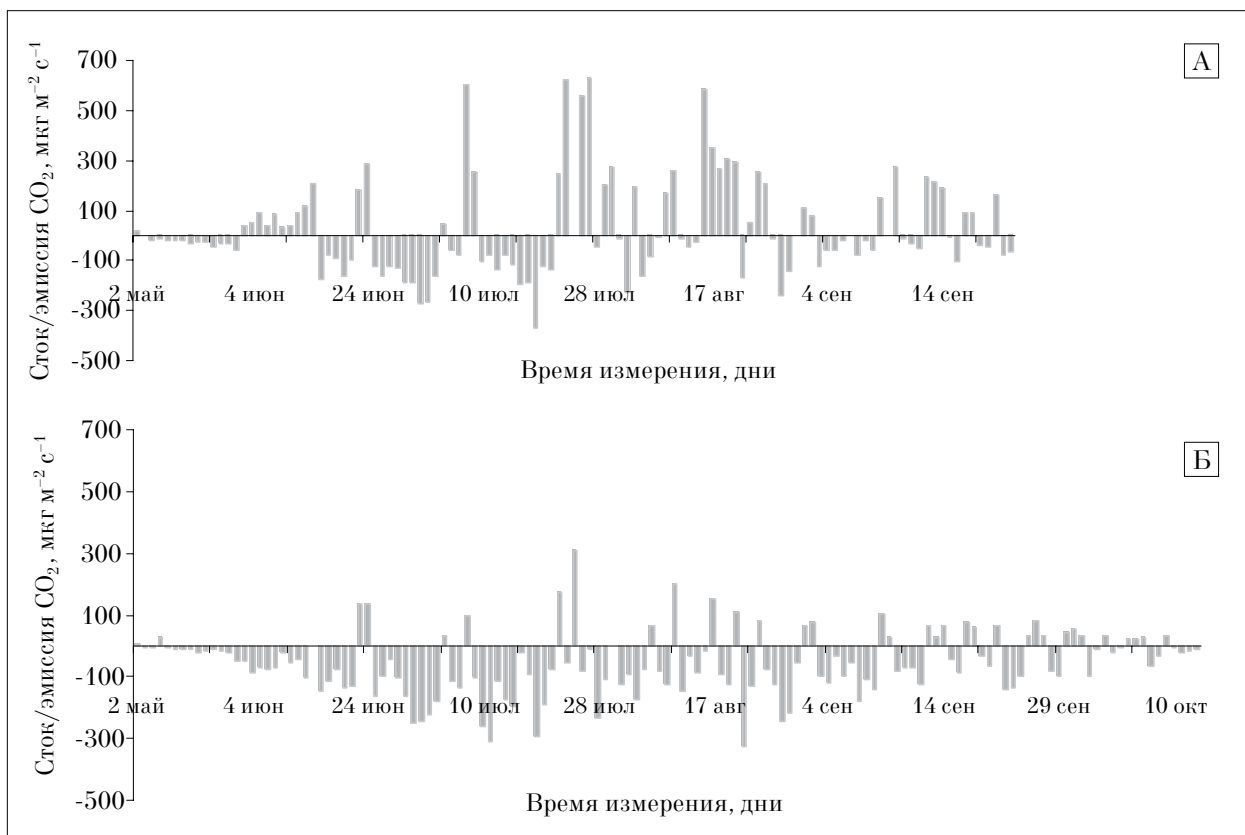


Рис. 5. Сезонная динамика потоков CO<sub>2</sub> на участках № 4 (А) и № 5 (Б) в светлой камере



Таблица 2

Величина потоков диоксида углерода в тундровых и болотных сообществах

Тип растительности	Район исследования	Средние значения эмиссии / стока*	Авторы
Олиготрофное болото	Средняя тайга, Западная Сибирь, 60° 59' с.ш. 70° 10' в.д.	+5,6 – +11 г м <sup>-2</sup> сут <sup>-1</sup> (+64,96 – +127,6 мкг м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup> )	Naumov et al., 2007 [10]
Бугристая лесотундра	Западная Сибирь, 65° 52' с.ш. 74° 58' в.д.	+4,6 – +5,4 г м <sup>-2</sup> сут <sup>-1</sup> (+53,36 – +62,64 г м <sup>-2</sup> сут <sup>-1</sup> )	Naumov et al., 2007 [10]
Осоково-сфагновая топь	Западная Сибирь, в пределах 56°03' – 56°37' с.ш. и 82°22' – 82°42' в.д.	+75,8 мг м <sup>-2</sup> ч <sup>-1</sup> (+21,6 мкг м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup> )	Инишева, 2001 [9]
Сосново-кустарничково-сфагновые сообщества	Западная Сибирь, 56°03' – 56°37' с.ш. и 82°22' – 82°42' в.д.	+216,2 мг м <sup>-2</sup> ч <sup>-1</sup> (+60,06 мкг м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup> )	Инишева, 2001 [9]
Моховая тундра	Республика Коми, 67°57' с.ш. 64°40' в.д.	-2,035 – +2,017 г м <sup>-2</sup> сут <sup>-1</sup> (-23,606 – +23,397 мкг м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup> )	Замолодчиков и др, 1998 [3]
Осоковое болото	Республика Коми, 67°20' с.ш., 63°44' в.д.	-2,672 – +0,326 г м <sup>-2</sup> сут <sup>-1</sup> (-30,995 – +13,456 мкг м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup> )	Замолодчиков и др, 1998 [3]
Кочкарная тундра	Республика Коми, 67°23' с.ш., 63°22' в.д.	+0,584 – +0,615 г м <sup>-2</sup> сут <sup>-1</sup> (+6,774 – +7,134 мкг м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup> )	Замолодчиков и др, 1998 [3]
Моховая тундра	Sphagnum sp., Республика Коми, 67°23' с.ш., 63°22' в.д.	-155 – +225 г м <sup>-2</sup> сут <sup>-1</sup> (-43,093 – +62,554 мкг м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup> )	Heikkinen et al., 2004 [11]
Кустарничковая тундра	Республика Коми, 67°23' с.ш., 63°22' в.д.	-238 – +374 мг м <sup>-2</sup> ч <sup>-1</sup> (-66,168 – +103,978 мкг м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup> )	Heikkinen et al., 2004 [11]
Кочкарная тундра	Республика Коми, 67°23' с.ш., 63°22' в.д.	-166 – +286 мг м <sup>-2</sup> ч <sup>-1</sup> (-46,151 – +79,513 мкг м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup> )	Heikkinen et al., 2004 [11]
Мезо-олиготрофное болото, микропонижение	Республика Коми, 61° 56' с.ш., 56° 13' в.д.	-509,878 – +145,192 мкг м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup>	Настоящая работа
Мезо-олиготрофное болото, осоково-сфагновый ковёр	Республика Коми, 61° 56' с.ш., 56° 13' в.д.	-370,725 – +625,543 мкг м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup>	Настоящая работа
Мезо-олиготрофное болото, кочка	Республика Коми, 61° 56' с.ш., 56° 13' в.д.	-223,896 – +450,653 мкг м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup>	Настоящая работа

Примечание: «+» – эмиссия, «-» – сток; в скобки помещены величины стока/эмиссии, пересчитанные авторами.

несколькими видами травянистых растений и кустарничков, в течение вегетационного сезона преобладала эмиссия CO<sub>2</sub>, максимальные её значения летом достигали 625,5 мкг м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> (рис. 5 А). На участке № 5 в летний и осенний периоды преобладал сток CO<sub>2</sub>, который составил соответственно 327 и 179,9 мкг м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> (рис. 5 Б). Доминирование на этом участке *Carex rostrata* и появление кустарника *Betula nana* – растений со значительной биомассой фотосинтезирующих органов, вероятно, определяет преобладание стока CO<sub>2</sub> над эмиссией.

Таким образом, нами установлено, что в растительных сообществах болота Мэдла-Пэв-Нюр в течение вегетационного сезона величина и направление потока CO<sub>2</sub> могут сильно варьировать. Преобладание эмиссии CO<sub>2</sub> на кочках можно объяснить наличием дополнительного процесса образования диоксида углеро-

да в результате окисления метана, образование которого происходит в этих сообществах более интенсивно, чем в мочажинах [7]. Поэтому осушение на верховых болотах приводило к усилению эмиссии диоксида углерода в 2-3 раза [8]. Полученные нами величины стока диоксида углерода в кустарничковых сообществах согласуются с данными других авторов для болот в Сибири [9, 10], а также для тундровых сообществ Европейского Северо-Востока [3, 11].

Сравнительный анализ полученных нами результатов показал, что имеется сходство в направленности потоков CO<sub>2</sub> кустарничковых и травяных сообществ исследованного нами болота (табл. 2). Однако сильно обводнённые болота, расположенные в разных географических точках, существенно различаются по этому показателю. Так, согласно нашим наблюдениям, в сфагновых сообществах микропони-

жений в течение сезона сток преобладает над эмиссией  $\text{CO}_2$ . В целом же максимальные величины потоков  $\text{CO}_2$  в растительных сообществах болота Мэдла-Пэв-Нюр оказались выше имеющихся в литературе данных для сходных сообществ [3, 9 – 11].

Это может быть связано с гидротермическим режимом данного болота. Однако в литературе имеются достаточно противоречивые мнения о взаимосвязи потоков углекислого газа и экологических факторов. Так, по данным некоторых авторов, чёткой зависимости между эмиссией  $\text{CO}_2$  из почвы и её температурой не выявляется [12]. Другие авторы указывают на тесную зависимость потоков диоксида углерода от температуры почвы на глубине 0–5 см [13] и 0–20 см [14].

Авторы зарубежных публикаций отмечают слабую зависимость потоков  $\text{CO}_2$  от уровня грунтовых вод (УГВ), либо вообще подчёркивают отсутствие этой связи [15]. По данным других авторов, УГВ существенно влияет на потоки диоксида углерода [1, 16]. Согласно исследованиям [8], понижение уровня болотных вод на 5 см ведёт к увеличению эмиссии  $\text{CO}_2$  на 5–45% на верховом болоте. В работе [17] было показано, что с повышением УГВ происходит увеличение стока углекислого газа.

Возможно, что с действием факторов погоды связаны кратковременные изменения в сезонной динамике потоков  $\text{CO}_2$  в растительных сообществах исследованного нами болота. Так, во время похолодания в конце июля – первой половине августа на всех участках отмечено резкое снижение эмиссии диоксида углерода в атмосферу, особенно это заметно на кочках и осоково-сфагновых коврах. Затем, при повышении среднесуточных температур во второй половине августа, эмиссия  $\text{CO}_2$  вновь увеличилась. При понижении среднесуточных температур в первой половине сентября наблюдалось резкое снижение абсолютных значений стока/эмиссии на всех участках.

### Выводы

В результате проведённых исследований в подзоне средней тайги на Европейском Северо-Востоке России было показано, что структура растительности оказывает существенное влияние на величину и направление потоков диоксида углерода в системе болото–атмосфера. Эмиссия  $\text{CO}_2$  более интенсивно происходит в кустарничковых сообществах, сформированных на коч-

ках. Осоково-сфагновые сообщества также характеризуются преобладанием эмиссии над стоком, однако на участках с доминированием *Carex rostrata* и появлением *Betula nana* направленность потока  $\text{CO}_2$  меняется. Стабильный сток диоксида углерода из атмосферы в болотные сообщества наблюдается в сфагновых сообществах микропонижений. Резкие изменения погодных условий в течение сезона могут вызывать кратковременные изменения в величине и направленности потоков углекислого газа в болотной экосистеме.

### Литература

1. Вомперский С.Э., Иванов А.И., Цыганова О.П. и др. Заболоченные органогенные почвы и болота России и запас углерода в их торфах // Почвоведение. № 12. 1994. С. 17–25.
2. Леса Республики Коми / Под ред. Г.М. Козубова и А.И. Таскаева. М.: «Дизайн. Информация. Картография», 1999. С. 39.
3. Замолотчиков Д.Г., Карелин Д.В., Иващенко А.И. Пороговая температура углеродного баланса южных тундр // Доклады Академии наук. 1998. Т. 358. № 5. С. 708–709.
4. Glagolev M.V., Maksyutov S.S., Peregon A.M. and Shnyrev N.A. The data base of  $\text{CH}_4$  emission from soils of Russia // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее. Томск: Изд-во НТЛ, 2007. С. 128–129.
5. Торфяные ресурсы Республики Коми. Сыктывкар: «Полиграф-сервис», 2000. 450 с.
6. Шенников А.П. Введение в геоботанику. Учебник. Л.: Изд-во ЛГУ, 1964. 447 с.
7. Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Хромов М.И. Эмиссия метана с торфяных залежей Иласского болотного массива Архангельской области // Известия РГО. 2008. Т. 140. Вып. 5. С. 40–46.
8. Александров Г.А., Голицын Г.С., Мохов И.И., Петухов В.К. Глобальные изменения климата и регулирующая роль болот // Изв. РАН. Сер. географическая. № 2. 1994. С. 5–15.
9. Инишева Л.И. Болота и биосфера // Российская наука на заре нового века. М.: Научный мир, 2001. С. 330–338.
10. Naumov A.V., Huttunen J.T., Repo M.E., Chichulin A.V., Peregon A.M., Filippov I., Lapshina E.D., Martikainen P.J. and Bleuten W. West Siberian peatlands: comparative study of greenhouse gas emission in middle taiga and forest tundra climatic conditions // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее. Томск: Изд-во НТЛ, 2007. С. 132–135.
11. Heikinen Juha E.P., Virtanen Tarmo, Huttunen Jari T., Elsakov Vladimir and Martikainen Pertti J. Carbon

balance in East European tundra // Global biogeochemical cycles. V. 18. 2004. P. 1023–1036.

12. Christensen T.R., Ekberg A., Ström L., Mastepanov M., Panikov N., Öquist M., Svensson B. H., Nykänen H., Martikainen P.J., Oskarsson H. Factors controlling large scale variations in methane emissions from wetlands // Geophysical research letters. 2003. V. 30. № 7. P. 67–70.

13. Pihlatie M.K., Kiese R., Bruggemann N., Butterbach-Bahl K., Kieloaho A.-J., Laurila T., Lohila A., Mammarella I., Minkkinen K., Penttilä T., Schonborn J. and Vesala T. Greenhouse gas fluxes in a drained peatland forest during spring frost-thaw event // Biogeosciences. 2009. № 6. P. 6111–6145.

14. Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А. Интенсивность продуцирования CO<sub>2</sub> сфагновыми торфами в нативных условиях // Торфяники Западной Сибири и цикл угле-

рода: прошлое и настоящее. Томск: Изд-во НТЛ, 2007. С. 130.

15. Parmentier F.J.W., Uan der Mollen M.K., De Jeu R.A.M., Hendriks D.M.D., Dolman A.J. CO<sub>2</sub> fluxes and evaporation on a peatland in the Netherlands appear not affected by water table fluctuations // Agricultural and forest meteorology. 2009. № 6-7. P. 1201–1208.

16. Гинзбург А.С. Значение болот России для смягчения антропогенного изменения климата (Экспертная оценка). М.: Центр «Эко-Согласие», 2005. 31 с.

17. Ниценко А.А. Краткий курс болотоведения. М.: Высшая школа, 1967. 148 с.

*Работа выполнена в рамках международного проекта Института биологии Коми научного центра УрО РАН «Carbonorth».*

## Эколого-генетический анализ негативного воздействия сложных углеводов в модельных экспериментах

© 2011. Ю. Г. Шутова, ассистент,  
Самарский государственный университет,  
e-mail: shutova79@yandex.ru

Изучали мутагенную активность адамантана и семи его производных в модельных экспериментах на растениях (*Allium cepa*) и животных (*Drosophila melanogaster*). Показано, что все исследованные адамантаны оказывали митозмодифицирующее и мутагенное воздействие на *A. cepa*. В тестах на *D. melanogaster* проанализированные адамантаны приводили к снижению плодовитости и возникновению доминантных летальных мутаций у самок и самцов.

Mutagen activity of some adamantan derivatives in modeling experiments with plants *Allium cepa* and animals *Drosophila melanogaster* was studied. The results obtained show that all the investigated adamantans render a mitosis-modifying and mutagen influence on *A. cepa*. In tests on *D. melanogaster* adamantans lead to decrease in fruitfulness and occurrence of prepotent lethal mutations of male and female.

Ключевые слова: адамантаны, доминантные летальные мутации, мутагенность, *Allium cepa*, *Drosophila melanogaster*

Key words: adamantanes, prepotent lethal mutations, mutagen activity, *Allium cepa*, *Drosophila melanogaster*

### Введение

Среди многих проблем, с которыми столкнулась современная экотоксикология, одной из самых острых является анализ воздействия на природные экосистемы антропогенных органических соединений, имеющих сложное строение и слабую растворимость в воде. Способны ли такие соединения, наряду с углеводами, хорошо растворимыми в воде, оказывать комплексные негативные воздействия, выражающиеся в индукции мутаций, снижении продолжительности жизни, выживаемости и плодовитости, оставалось до сих пор неизвестным. Для того чтобы иметь представление о возможностях поражающего действия таких соединений, необходимы модельные эксперименты с использованием хорошо изученных тест-объектов, представляющих разные трофические уровни в экосистемах. Продуцент *Allium cepa* хорошо изучен цитогенетически и широко используется для анализа загрязнителей различного типа [1, 2]. Консумент *Drosophila melanogaster* также является одним из наиболее изученных в генетическом отношении организмов и применяется для выяснения отдельных проблем генетического мониторинга [3, 4].

В качестве модельных токсикантов-мутagenов были выбраны соединения, широко используемые в хозяйственной деятельности,

обладающие сложной структурой и высокой мембранотропностью, – адамантаны. Адамантан ( $C_{10}H_{16}$ ) – представитель класса предельных каркасных углеводов, состоит из трёх циклогексановых колец. Перспективность применения производных адамантана обусловлена набором специфических свойств: большой размер адамантильного радикала, конформационная жёсткость, высокая липофильность, что свидетельствует о его высокой способности взаимодействовать с различными биологическими структурами и, в первую очередь, с биомембранами [5]. На основе адамантана выпускаются лекарственные препараты, используемые в медицине в качестве антивирусных, антибактериальных, ноотропных, нейролептических, противопаркинсонических, спазмолитических, противогрибковых, противорвотных, противоопухолевых средств [6, 7]. Единственным природным продуктом, содержащим адамантан и его гомологи, является нефть [5].

Целью данного исследования был анализ воздействия адамантанов различного строения на организмы, представляющие трофические уровни продуцентов и консументов.

### Материалы и методы

В качестве модельных ксенобиотиков использовали адамантан и его производ-

дные: адамантан (I), аминоксантадантан (II), 6-[3-адамантиламино]-1,2,3,4-ди-О-изопропилиден- $\alpha$ -D-галактопираноза (III), 3-[3-адамантиламино]-1,2,5,6-ди-О-изопропилиден- $\alpha$ -D-ксилофураноза (IV), 3-(N-адамантиламино)-3-дезоксид-1,2,5,6-ди-О-изопропилиденаллофураноза (V), метиладамантан (VI), этиладамантан (VII), 2-дезоксид-2-амино-(N-адамантил)-глюкопираноза (VIII).

В проведённых ранее исследованиях мы обнаружили, что некоторые адамантаны в высокой концентрации были настолько токсичны, что ингибировали процессы пролиферативной активности клеток, что не позволяло выявить механизм токсического действия соединения. Поэтому в модельном эксперименте все адамантаны использовали в концентрации 0,005 мг/мл.

На стандартно приготовленных давленных препаратах корневой меристемы *A. cepa* исследовали цитотоксичность соединений по способности ингибировать процессы пролиферации, оцениваемой величиной митотического индекса и продолжительностью фаз митоза. С помощью метода ана-телофазного анализа [4] оценивали способность адамантанов индуцировать хромосомные аберрации. Анализировали 900 ана-телофаз для каждого варианта опыта.

Негативное воздействие на *D. melanogaster* оценивали по способности адамантанов ингибировать плодовитость и индуцировать доминантные летальные мутации у имаго разных полов по методу Белоконов [4].

Достоверность различий между параметрами оценивали с помощью полного двухфакторного дисперсионного анализа [8].

## Результаты и их обсуждение

Проведённые эксперименты показали, что растворы адамантана и его исследованные производные даже в концентрации 0,005 мг/мл достоверно ( $p < 0,01$ ) ингибируют деление клеток (табл. 1).

Мы выяснили, что все производные адамантана менее токсичны, чем он сам, за исключением соединения VIII. Способность ингибировать митотическую активность растёт в следующем ряду: V>III>IV>VII>II>VI>I>VIII.

Изменение митотического индекса связано в первую очередь с нарушением нормального прохождения митотического цикла. В процессе формирования митотического аппарата под воздействием ксенобиотиков могут возникать различные патологии, которые исправляются системой checkpoints [9]. Активация этой системы блокирует переход клеток из одной фазы митоза в другую, поэтому изменение продолжительности фаз митоза позволяет понять механизмы патологического действия ксенобиотиков.

Проведённый двухфакторный дисперсионный анализ выявил статистически значимые различия ( $p < 0,01$ ) между продолжительностью фаз митоза и строением веществ.

Все проанализированные нами адамантаны приводили к возникновению митотических блоков. Вещества II, V и VII вызывали задержку клеточного деления на стадии *профазы*. Данный вид нарушений относится к патологиям, связанным с повреждением хромосом и свидетельствует о нарушениях процессов их редупликации. Подобные изменения в делении клетки обычно наблюдаются при нарушении синтеза ДНК [10]. Вещества VI и III

Таблица 1

Влияние адамантанов на пролиферативную активность клеток корневой меристемы *Allium cepa*

Соединения	Митотический индекс*	Фаза митоза, на которой возникают митотические блоки	Количество хромосомных аберраций, %
Контроль	365±1,9	–	2,4±0,48
I	194±3,3	Телофаза	7,7±0,84
II	324±2,1	Профаза	7,6±0,83
III	355±1,9	Метафаза	9,3±0,92
IV	350±1,9	Анафаза	16,4±1,17
V	362±1,7	Профаза	18,9±1,24
VI	237±2,8	Метафаза	4,2±0,63
VII	328±2,1	Профаза	11,4±1,00
VIII	119±3,7	Телофаза	10,0±0,94

Примечание: «–» блоков не выявлено; \* – количество делящихся клеток, приходящихся на каждые 1000 клеток ткани.

приводили к образованию блока на стадии *метафазы*, что является свидетельством повреждения митотического аппарата клетки – центриолей, веретена деления и кинетохоров. При действии высоких доз исследованных адамантанов подобные нарушения приводят либо к гибели клетки, либо к полиплоидизации клетки. Соединение IV – вызывает блок на стадии *анафазы*; адамантаны I и VIII – на стадии *телофазы*, что свидетельствует о нарушении цитотомии. Такое изменение митотической активности приводит к возникновению двухъядерных клеток или одноядерной полиплоидной клетки. Подобные нарушения ведут к изменениям кариотипа, являются причиной возникновения других патологий митотического процесса и могут стать началом цепной реакции, приводящей к ненормальному течению митоза в ряду следующих поколений клеток.

Мы выявили слабую положительную корреляцию ( $r=0,5$ ) между степенью ингибирования пролиферативной активности и индукцией хромосомных aberrаций. При анализе способности соединений индуцировать хромосомные aberrации установлено, что максимальной мутагенностью обладает производное V, минимальной – VI. В целом можно отметить, что максимальную мутагенность проявляли гликозилированные адамантаны. Минимальную активность проявлял метилированный адамантан. Мутагенность адамантилсахаров (IV и V) объясняется высокой скоростью проникновения данных ксенобиотиков в клетки корневой меристемы лука, но, безусловно, огромную роль в развитии мутагенного ответа играет и топология молекулы.

Результаты анализа типов aberrаций, индуцируемых адамантаном и его производными, представлены в таблице 2.

Было обнаружено, что изучаемые адамантаны индуцируют все типы хромосомных aberrаций: хромосомные и хроматидные «мосты», хромосомные «разрывы», отставания хромосом.

Полученные в ходе проведенного эксперимента данные согласуются с результатами, полученными при анализе продолжительности фаз митоза. В корневой меристеме происходило нарушение формирования веретена деления и задержка цитотомии. Это является патологическим процессом. Задержка митоза в профазе свидетельствует о нарушениях процессов редупликации хромосом. Появление aberrаций типа «отставание» и «мост» является фактором, вызывающим удлинение или остановку клеточного деления на стадии анафазы и телофазы. Это указывает на способность адамантанов специфически поражать микротрубочки и актиновые филаменты клеток, а следовательно, и повреждать веретена деления активировавшись *checkpoint* перехода метафаза–анафаза в анафазу [10]. Aberrации типа «мост» длительно сохраняются в ряду клеточных поколений и приводят не только к генотипической разнородности дочерних ядер, но и углубляют патологию митоза, нарушая течение завершающих стадий деления. Образование моста задерживает завершение цитотомии, а иногда может сохраняться и в интерфазе. Отставание хромосом может приводить к образованию микроядер. Мы предполагаем, что задержка клеток на стадии метафазы и цитотомии позволяет синтезировать недостающие вещества для нормального протекания митоза и не допустить потери клеткой части хромосомного материала в результате неправильного прохождения митоза. Такой механизм предохраняет делящиеся клетки от ле-

Таблица 2

Типы хромосомных aberrаций в корневой меристеме *Allium cepa*, в % от общего количества проанализированных клеток

Соединения	Типы хромосомных aberrаций			
	«отставания»	«разрывы»	«простые мосты»	«двойные мосты»
Контроль	1,76	0,9	0,3	0,03
I	5,8	1,71	0,23	0
II	2,7	2,43	2,43	0
III	1,3	7,19	0,52	0,33
IV	8,36	2,16	5,12	0,8
V	5,97	5,66	7,23	0
VI	2,09	1,26	0,84	0
VII	4,32	0,62	6,48	0
VIII	3,53	0	5,88	0,59

Таблица 3

Мутагенная активность адамантанов для самок и самцов дрозофилы

Соединения	Доминантные летальные мутации, %		Плодовитость, шт.	
	самки	самцы	самки	самцы
Контроль	2,5	2,2	442	455
I	4,3	3,7	303	542
II	29,73	24	88	97
III	5,14	4,31	136	326
IV	8,06	1,07	264	287
V	19,39	16,85	198	449
VI	33,27	29,44	388	400
VII	18,06	27,47	227	326
VIII	20,35	23,8	520	544

тального митоза, останавливая деление и давая время системе репарации для восстановления повреждений ДНК.

Таким образом, мы выявили, что адамантаны обладают генотоксическими свойствами.

Иерархическая структурно-функциональная организация живого предполагает многоуровневую систему ответных реакций тест-организмов на внешнее воздействие. При этом вещества, обнаружившие цитотоксическое действие *in vivo*, на организменном уровне, претерпевая ряд метаболических превращений, могут как нивелировать своё действие, так и усиливать. С целью исследования влияния адамантанов на организм в целом [3, 4] мы использовали в качестве тест-объекта *D. melanogaster*, которая обладает микросомальной системой, сходной с таковой в печени млекопитающих.

Мы проанализировали способность адамантанов индуцировать доминантные летальные мутации у самок и самцов дрозофилы. Поскольку доминантные летальные мутации не передаются следующим поколениям, по их уровню можно судить о количестве вновь возникающих мутаций, что, в свою очередь, может являться критерием оценки мутагенного действия того или иного соединения и генетическим показателем загрязнённости им среды. Результаты экспериментов суммированы в табл. 3.

Проведённые исследования показали, что все адамантаны индуцировали доминантные летали как у самцов, так и у самок дрозофилы. Двухфакторный дисперсионный анализ полученных данных не выявил полоспецифического мутагенного действия адамантанов, но выявил достоверные различия в действии веществ на использованные тест-объекты. Если минимальной мутагенностью для растений обладало производное VI, то для *D. melanogaster* это соединение обладало максимальной мутагенностью

В целом можно отметить, что аминоксиды адамантан (II) и его алкильные производные (VI, VII) проявили наиболее сильную мутагенную активность.

Особый интерес представляют собой гликозилированные адамантаны (IV и V), являющиеся трансизомерами. Если вещество IV по мутагенности слабо отличалось от алкильных производных, то V обладало самой слабой мутагенной активностью. Анализируя мутагенность соединений и их способность влиять на плодовитость *D. melanogaster*, можно отметить, что все соединения достоверно различаются по влиянию на плодовитость ( $p < 0,003$ ), кроме того, мы обнаружили, что прямое воздействие на самок растворами исследуемых соединений вызывает у них достоверно более сильное снижение плодовитости, чем при воздействии этих же соединений на самцов ( $p < 0,02$ ). Таким образом, можно предположить, что адамантаны «вмешиваются» в различные процессы гаметогенеза у особей разных полов.

Проведённый модельный эксперимент показал, что адамантаны обладают способностью негативно воздействовать на представителей различных трофических блоков экосистем: продуцентов и консументов. Они индуцируют у них различного рода мутации, а также нарушают процессы гаметогенеза и пролиферации в соматических тканях. Использование тест-объектов позволило оценить потенциальную опасность многих генотоксикантов, и чем больше различных видов используется в «батареях» тестов, тем точнее можно оценить потенциальный негативный ответ. Многие авторы [11 – 14], использовавшие в своих исследованиях *A. cerea* и *D. melanogaster*, показали, что данные, полученные в модельных экспериментах, сопоставимы с результатами, наблюдаемыми в природных экосистемах.

Можно с уверенностью сказать, что адамантаны различного строения различаются по механизмам своего токсичного воздействия на высшие организмы. Даже микровоздействия соединениями адамантанов в условиях природных экосистем будут приводить как к прямому негативному ответу, выражающемуся в снижении выживаемости, о чём свидетельствует ингибирование пролиферативных процессов в клетках корневой меристемы *A. sepa*, и, следовательно, снижению тканевой репарации, так и к косвенному. Косвенный ответ выражается в снижении численности организмов, подвергнутых воздействию исследуемых веществ за счёт уменьшения их плодovitости, как это показано нами на примере *D. melanogaster*. Кроме того, все протестированные нами соединения влияют на генофонд популяции и, таким образом, приводят к росту генетического груза и снижению эволюционной пластичности видов.

### Литература

1. Fiskesjo G. The Allium test as a standard in environmental monitoring // *Hereditas*. 1985. V. 102. P. 99–112.
2. Гостимский С.А., Дьякова М.И., Ивановская Е.В., Монахова М.А. Практикум по цитогенетике. М.: МГУ, 1974. 275 с.
3. Руководство по краткосрочным тестам для выявления мутагенных и канцерогенных химических веществ // Гигиенические критерии состояния окружающей среды № 51. Женева: ВОЗ, 1989. 212 с.
4. Белоконь Е.М. Методические указания к определению мутагенной активности химических препаратов на дрозофиле. Львов: ЛГУ, 1984. 260 с.
5. Багрий Е. И. Адамантаны. М.: Наука, 1989. 264 с.
6. Морозов И.С., Петров В.И., Сергеева С.А. Фармакология адамантанов. Волгоград: Волгоградская мед. академия, 2001.
7. Козелецкая К.Н. Ремантадин как химиопрепарат для экстренной профилактики и лечения гриппа А // *Consilium medicum*. 2004. № 6. С. 35–39.
8. Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высшая школа, 1990. 352 с.
9. Омелянчук Л.В., Трунова С.А., Лебедева Л.И. Федорова С.А., 2004. Основные события клеточного цикла, их регуляция и организация // *Генетика*. 2004. Т. 40. № 3. С. 293–310.
10. Смирнова Е.А. Организация митотического веретена в клетках высших растений // *Физиология растений*. 1998. Т. 45. № 2. С. 198–207.
11. Дружинин В.Г. Хромосомные нарушения у населения крупного промышленного региона: странственно-временной цитогенетический мониторинг. Дисс. докт. биол. наук. М. 2003. 206 с.
12. Калаев В.Н. Цитогенетический мониторинг загрязнения окружающей среды с использованием растительных тест-объектов. Дисс. канд. биол. наук. Воронеж. 2003. 245 с.
13. Буторина А.К., Калаев В.Н., Карпова С.С. Цитогенетические нарушения в соматических клетках человека и берёзы повислой в районах г. Воронежа с различной интенсивностью антропогенного загрязнения // *Экология*. 2002. № 6. С. 438–441.
14. Graf U., Van Schaik N., Wugler F.E. *Drosophila genetics. A practical course*. Berlin: Springer-Verlag, 2000. 240 p.



## Изменение климата и его роль в надёжности инженерных объектов в криолитозоне

© 2011. М. М. Шац, к.г.н., в.н.с.,

Институт мерзлотоведения имени П. И. Мельникова СО РАН,  
e-mail: shatz@vpi.ysn.ru

Показаны современные тенденции изменения климата и их последствия для инженерных сооружений криолитозоны. На примере инфраструктуры г. Якутска показана её связь с динамикой климата.

The stability state and problems of infrastructure of Yakutsk, one of the most Northern cities, are considered. Different stages of the city development, as well as connection of infrastructure reliability with climate dynamics are shown.

Ключевые слова: состояние и проблемы устойчивости инфраструктуры, динамика климата

Key words: condition and problems of stability of infrastructure; climate dynamics

### Введение

Потепление климата, в последние годы именуемое не столь однозначно «изменением», и его влияние на многолетнемёрзлые породы (ММП) и состояние геотехнических объектов в криолитозоне является принципиальной проблемой, мнения по которой разнополярны. Отсутствует единая точка зрения даже на основные причины этого явления, а также его последствия для мёрзлых толщ. Поэтому остановимся на этом подробнее.

По проблеме потепления существуют две основные точки зрения.

Сторонники первой, в основном климатологи, считают этот процесс следствием антропогенной деятельности и одной из главных, если не основных, причин происходящих на Российском Севере деформаций и обрушений геотехнических объектов.

По мнению одного из ведущих специалистов по динамике глобального климата, представителя этого направления О. А. Анисимова [1], глобальное потепление обусловлено «...главным образом парниковым эффектом образующихся при сжигании ископаемого топлива углекислого газа и метана, количество которого в атмосфере также увеличивается». О. А. Анисимов считает, что в продолжение происходящего потепления (табл. 1) за несколько будущих десятилетий температура воздуха может вырасти ещё на 3 °С. Это будет сопровождаться повышением температуры ММП и неизбежно приведет к утрате устойчивости многих геотехнических объектов. Он

отмечает, что в случае сохранения современных тенденций изменения климата, а именно об этом свидетельствуют теоретические прогнозы, деградация ММП и обусловленные ею негативные геоэкологические последствия станут неизбежны и будут сопровождаться массовыми деформациями геотехнических объектов, выстроенных без учёта тенденций динамики климата. Судя по многочисленным примерам в научной литературе и в СМИ, в последнее время резко усилилось негативное воздействие экзогенных, в т. ч. криогенных, процессов на объекты инфраструктуры геотехнических сооружений. Так, в Западной Сибири ежегодно происходит около 35 тыс. дефектов и аварий на нефте- и газопроводах [1]. При этом около 21% из них вызвано механическими воздействиями, связанными с потерей устойчивости и деформацией оснований и опор.

С 1990-го по 1999 г. количество зданий, получивших деформации из-за неравномерных просадок мёрзлых грунтов оснований, увеличилось на 42% в г. Норильске, на 61% в г. Якутске и на 90% в г. Амдерме (НАО). Все эти негативные события О. А. Анисимов связывает с меняющимся климатом и, гораздо в меньшей степени, с негативным влиянием антропогенных и техногенных факторов. В то же время О. А. Анисимов отмечает, что достоверность прогноза состояния ММП в основаниях геотехнических объектов зависит от точности закладываемых граничных условий. Судя по результатам подобных расчётов, проведённых по трёхмерным климатическим моделям, в ближайшие 25–30 лет среднегодовая температура

Таблица 1

Современные изменения температуры многолетнемерзлых пород (ММП) по данным измерений (IPCC, 2007)

Регион	Глубина, м	Период, гг.	ΔТ ММП, °С
США			
Арктическое побережье Аляски	1	1910–1980	2-4
Арктическое побережье Аляски	20	1983–2003	2-3
Континентальная Аляска	20	1983–2003	0,5-1,5
Россия			
Восточная Сибирь	1,6–3,2	1960–2002	1,3
Север Западной Сибири	10	1980–1990	0,3-0,7
Север ЕТР	6	1973–1992	1,6-2,8
Зона сплошных ММП ЕТР, прерывистые ММП	6	1970–1995	1,2-2,8

на арктическом побережье Сибири может возрасти на 3–5 °С; на Дальнем Востоке и на севере европейской территории России – на 2–4 °С. Это в ближайшие 25–30 лет приведёт к сокращению площади развития ММП на 10–18%, а часть их перейдёт в реликтовое состояние, либо полностью протает. Более того, к середине столетия территория ММП уменьшится на 15–30%, при этом её граница сместится к северо-востоку на 150–200 км.

Близкую точку зрения на динамику климата в последнее время и её последствия высказал бывший руководитель Росгидромета А. И. Бедрицкий [2]. Он считает, что в России, где при самых суровых в мире погодных условиях проживания 65% территории занимают ММП, при потеплении климата неизбежно ухудшится несущая способность грунтов в основаниях зданий различного назначения, дорог, трубопроводов и т. д. Так, при повышении среднегодовой температуры воздуха на 2 °С несущая способность свайных фундаментов сократится на 50%, а более 25% жилых домов, построенных в 1950–1970-е годы в таких городах, как Якутск, Воркута, Тикси грозит разрушение. Та же причина в отношении оснований бытовых трубопроводов приведет в городах к ухудшению качества теплоснабжения и канализации. Не можем согласиться с однозначной зависимостью несущей способности свайных фундаментов от повышения температуры воздуха. Связь эта гораздо сложнее и многофакторнее, но в этой статье специально не рассматривается.

Ещё один из ведущих специалистов, сторонник техногенных причин потепления климата и его главенствующей роли в нарушении устойчивости геотехнических объектов в криолитозоне В. Клименко [3] считает, что «...не смотря на то, что земной шар сейчас намного теплее, чем в 1930–1940-х гг., Арктика всё ещё намного холоднее, чем в 1930-х годах и ледо-

витость морей сейчас более значительная. Изменения, которые нас ожидают, на мой взгляд, далеки от катастрофы. Если понять, что происходит, понять то, что эти изменения неотвратимы, что бы человек ни делал: приняли Киотский протокол, не приняли, будем мы что-то ограничивать или нет. Климат меняется не только в результате антропогенного воздействия, но и в связи с космическими и геофизическими факторами: поведением Солнца, вулканов, океанической, атмосферной циркуляции, положением Юпитера, Сатурна и Луны по отношению к Земле». Кроме того, В. Клименко отмечает, что человечество никогда не существовало в климатических условиях, аналогичных ожидаемым в ближайшие десятилетия. И это притом что наукой установлено, что климатической системе присущи свои весьма устойчивые циклы – 100 тыс. лет, 41 тыс. лет, 23 тыс. лет, 2,5 тыс. лет, 200, 65, 22, 10–11, 7,5 года и т. д. Так, например, декабрь 2002 года был самым холодным после декабря 1940, 1941, 1942 и 1978 годов.

До начала XX века считалось, что климат со временем не меняется, но сейчас стала понятна ошибочность этой точки зрения. Со временем климат испытывает значительные колебания, и в XX веке земной шар, по сравнению с концом XIX века, в среднем стал теплее на 0,7–0,8 °С. Следует отметить, что потепление произошло в основном после 1970-го года, то есть всего за 35 лет, хотя и в 1930–1940-х годах XX столетия тоже было потепление, которое особенно проявилось в Арктике, чем обусловило в это время её бурное освоение. Профессор В. Клименко предполагает, что потепление будет продолжаться ещё не менее 200 лет и климат станет теплее, чем за предшествующие 250 тыс. лет. Он признаёт, что мнение о хозяйственной деятельности человека как единственной причине потепления хотя и имеет под собой очень серьёзные основания, но излиш-

не категорично и не учитывает мощные естественные факторы. Ожидаемые изменения, отмечает В. Клименко, хотя и неотвратимы, но к катастрофическим последствиям привести не должны. При этом следует учитывать, что степень потепления по поверхности земного шара распространяется крайне неравномерно и на фоне общего потепления есть области похолодания: Гренландия, Китай, Тибет, Гималаи, Англия, Восточное Средиземноморье. Значит, проблема не так уж однозначна.

Относительно проблемы надёжности трубопроводов В. Клименко категорично уверен, что в России они «...будут рваться со страшной силой». И это ужасно. Но есть же и другой пример: США значительную часть своей нефти добывают на Аляске, причём в её северной части существует трансалаяскинский трубопровод протяженностью более 1,5 тыс. км, на котором используются новейшие технологии, так называемые «плавающие фундаменты» не только для трубопроводов, но и для иных инженерных сооружений.

Судя по ориентировочным расчётам, стоимость удорожания трубопровода на Аляске за счёт современных технологий составляет 5 млн. тонн нефти, то есть 1/2000 нефтяных запасов было затрачено на то, чтобы обезопасить систему от разрушения в связи с деградацией ММП, которая на Аляске проходит очень активно и этот регион, наряду с российской Арктикой, является одним из эпицентров глобального потепления [3].

По мнению В. Клименко, обнадёживает и тот факт, что в соответствии с законами теплофизики все процессы, включающие фазовые переходы такого вещества, как вода, требуют огромного количества энергии, поэтому деградация мерзлоты всегда происходит постепенно. Только когда среднегодовая температура ММП поднимается выше  $-2^{\circ}\text{C}$  нужно около 500 лет, чтобы мерзлая толща разрушилась полностью.

Ещё одним связанным с потеплением аспектом, особенно актуальным в последнее время, является угроза засухи. Некоторая часть Южной Сибири, Северный Кавказ, Украина действительно в ближайшие десятилетия будут подвержены засухам. В то же время, 90% территории России с потеплением станут влажнее, хотя Россия в течение всей истории страдала в основном от засух и именно они были «бичом сельского хозяйства и причиной страшного голода, как в 1891 или 1920 гг.»

В отличие от сторонников первого направления, представители второго, включающие

большую группу специалистов-мерзлотоведов (академика РАН В. П. Мельникова, члена-корр. РАН В. Т. Балобаева, д.т.н. Р. В. Чжана, д.г.-м.н. В. В. Шепелева и др.), придерживаются принципиально иной позиции.

Директор института криосферы Земли СО РАН (ИКЗ) в г. Тюмени В. П. Мельников отмечает [4], что сегодня факт потепления климата никем не оспаривается. Споры на этот счет идут по двум направлениям и в основном сводятся к оценке причин и их последствий. По мнению сотрудников ИКЗ, катастрофических последствий не будет, а их оппоненты считают, что они неизбежны.

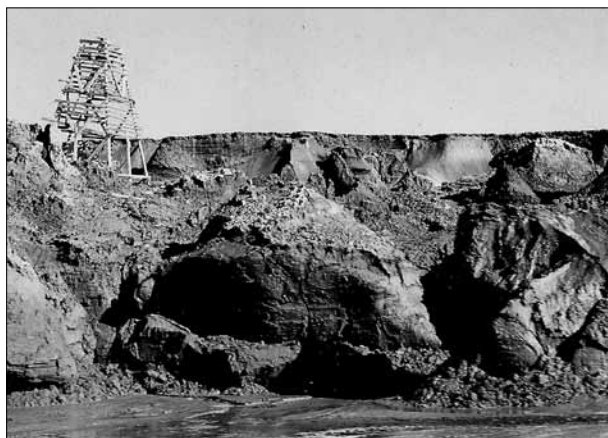
В. П. Мельников не согласен с мнением международных экологических организаций, что человек может воздействовать на природу в такой мере, чтобы растопить мерзлоту либо предотвратить её таяние. По его словам, процесс деградации или аградации мерзлоты идёт периодически всю известную нам историю. «Ледники то наступали, то отступали. Вслед за этим шла аградация (расширение, увеличение площади занятой мерзлотой) или деградация – отход её к северу», – пояснил академик. Судя по созданным в ИКЗ ретроспективным картам, показывающим картину развития ММП 5 тыс. лет назад, масштабы аградации – деградации мерзлоты были огромны. В то же время, по мнению В. П. Мельникова, изменение климата, то есть повышение температуры в атмосфере, оказывается, не всегда ведёт к повышению температуры мерзлоты. Её природа сопротивляется любым изменениям, а потому ни один из катастрофических прогнозов, которых сейчас не счесть, вряд ли когда-нибудь оправдается.

Поэтому говорить о каких-либо серьёзных катастрофах нет оснований [4]. «То, что мы имеем сегодня в плане потепления, ещё не дошло до того климатического оптимума, который наблюдался несколько тысяч лет тому назад. То есть тогда было значительно теплее и никаких катастроф для природы не произошло. Даже если мы дойдем до цифр, наблюдавшихся в голоценовый минимум, то и в этом случае никаких катастроф не будет», – констатирует академик.

Таким образом, по мнению академика [5], у сложившейся ситуации есть две причины – человеческий фактор и действительно потепление климата. Уже в начальный период создания методов возведения зданий на вечной мерзлоте были даны и рекомендации, как поддерживать их устойчивое состояние. «Мерзлота – она с виду только прочная, но

если там высокая льдистость, значит, это лёд, на котором с помощью свай и держится фундамент зданий. Естественно, первое, что необходимо, это сохранять проветриваемое подполье. То есть дома строились так, что первый этаж начинался на уровне 1–1,5 м от поверхности земли, а эти полтора метра образовывали проветриваемое пространство, посредством которого зимним холодом излишнее тепло отводилось и тем самым сводилось к минимуму воздействие тепла здания на мёрзлые основания». Кроме того, отмечает В. П. Мельников, существуют современные наукоёмкие технологии, которые позволяют существенно уменьшить зависимость от климата, именно их следует активнее развивать.

Академик В. П. Мельников в качестве основной идеи отмечает [5], что он не разделяет всеобщей паники, связанной с глобальным потеплением. По его словам, достаточно вспомнить, как мировая общественность реагировала на озоновые дыры. «Сейчас всё утихло. Природа свои дела сама сделала. Неоднократно все мы были свидетелями того, что в результате таких мощнейших кампаний одни фирмы обогащались, другие разорялись. В частности, в результате борьбы с озоновыми дырами предлагалось заменить применение одних баллончиков с газом на другие. Для того, чтобы якобы, не разрушать озоновый слой», – пояснил Владимир Павлович. По его мнению, кому-то попросту нужна эта мощная реклама, и в качестве наглядного примера приводит деятельность бывшего вице-президента США Альберта Гора, получившего Нобелевскую премию за пропаганду глобального потепления. «Нельзя сказать, что он полностью не прав, но, на мой взгляд, за его правдой есть какая-то цель», – отмечает Мельников. Он по-



**Рис. 2.** Разрушение льдистых мёрзлых берегов и навигационных знаков на побережье моря Лаптевых. Фото М. Н. Григорьева

яснил, что климат всегда меняется циклично. В настоящее время закончился третий цикл с начала XX века: было потепление, сменившееся похолоданием, затем снова потепление, которое сейчас заканчивается.

В. П. Мельников отмечает, что по Западной Сибири регулярный мониторинг ведётся уже более 30 лет, а вообще наблюдения за мерзлотой начинались ещё до нефтегазовой эпохи. Установлено, что действительно в Арктике льда стало меньше. «Но я не могу сказать, что это напрямую связано с потеплением климата. Думаю, там накладываются ещё какие-то процессы, которые ещё не очень хорошо изучены, либо в самом океане в целом, либо в атмосфере».

Член-кор. РАН из ИМЗ В. Т. Балобаев и профессор В. В. Шепелев из ИМЗ подчеркивают [6], что представления ученых института по проблеме базируются на результатах многолетних совместных исследований с Геофизическим университетом США, включающих исследовательский проект по изучению климатических изменений температурных показателей в г. Якутске и г. Фэрбенксе. В основу исследований положен амплитудно-частотный метод, основывающийся на двухсотлетней истории метеорологических наблюдений в Якутии и современных показателях, позволивший выявить 3 цикла потеплений климата: 320, 170 и 75 лет. Нынешнее относительно резкое потепление – следствие их наложения друг на друга, а потому проявление их суммарного эффекта столь отчётливо. В соответствии с упомянутой цикличностью мерзлота формируется периодами, и последнее оледенение было 18 тыс. лет назад, а потепление всего лишь 8–4 тыс. лет назад. Судя по прогнозам, потепление закончится 2010–2015 гг., а затем наступит похолодание, которое продлится до 2060 года.

Специалисты из ИМЗ отмечают, что криолитозона обладает достаточной устойчивостью и на протяжении нескольких десятилетий катастрофические изменения её температуры не зафиксированы. В то же время отрицать таяние ее верхних горизонтов неразумно, но именно несколькими метрами пород процесс и ограничивается. Наиболее значительные последствия наблюдаются в береговой полосе тундры, где в результате таяния особо льдистых пород (рис. 1., см. цветную вставку) Якутия ежегодно теряет в море 11 кв. км тундры. Часто обрушение льдистых пород сопровождается развалом навигационных знаков (рис. 2).

Таблица 2

Среднемесячные и среднегодовые температуры воздуха по данным метеостанции Якутск

Годы	Средняя температура воздуха, °С												Год
	Месяцы												
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1990	-42,4	-35,9	-12,0	-5,3	9,8	17,4	17,1	16,8	4,4	-4,3	-28,3	-34,9	-8,1
1991	-32,0	-35,8	-22,4	-4,3	6,9	14,2	20,9	16,8	5,0	-8,6	-26,9	-34,5	-8,4
1992	-39,5	-32,3	-20,9	-3,6	7,6	17,0	18,8	14,2	6,5	-5,3	-32,0	-35,4	-8,7
1993	-32,4	-32,1	-21,3	-9,4	6,6	15,9	19,7	14,8	6,0	-7,9	-28,4	-41,6	-9,2
1994	-45,0	-34,2	-19,9	-5,3	8,0	14,4	17,4	14,4	7,2	-4,7	-26,5	-40,4	-9,6
1995	-35,8	-27,4	-22,5	-6,2	6,6	18,4	18,4	15,3	5,8	-3,8	-26,3	-33,8	-7,6
1996	-38,4	-32,1	-21,9	-5,2	7,1	17,2	18,9	13,3	5,7	-6,2	-25,0	-39,3	-8,8
1997	-37,1	-32,1	-22,0	-2,6	9,1	15,2	20,0	17,3	4,9	-5,5	-24,9	-40,0	-8,1
1998	-39,3	-30,3	-21,1	-6,0	5,0	20,2	22,0	18,2	5,1	-9,7	-28,8	-39,7	-8,7
1999	-33,3	-34,0	-25,3	-5,8	7,5	16,7	20,0	13,2	6,4	-9,1	-28,7	-34,9	-8,9
2000	-36,9	-32,5	-20,6	-2,6	7,9	16,2	19,0	14,8	5,4	-10,7	-30,2	-39,3	-9,1
2001	-38,8	-37,5	-19,5	-7,2	8,1	16,1	23,0	14,9	3,5	-7,7	-23,0	-36,2	-8,7
2002	-36,5	-29,1	-18,3	-3,1	8,3	18,3	19,7	16,7	6,6	-8,1	-25,0	-40,4	-7,6
2003	-39,3	-33,6	-15,2	-3,9	5,0	14,4	21,5	16,6	7,5	-7,1	-28,2	-34,2	-8,0
2004	-38,8	-36,6	-20,0	-4,5	6,2	13,7	18,8	13,8	6,9	-11,1	-22,6	-43,8	-9,8
2005	-39,5	-35,2	-21,1	-0,5	8,6	17,5	18,8	13,9	9,4	-8,8	-20,2	-35,1	-7,7
2006	-42,9	-35,4	-22,9	-3,7	7,5	17,3	18,7	15,9	7,0	-8,3	-25,4	-35,4	-9,0
2007	-33,9	-36,1	-17,8	-1,7	8,9	16,1	16,1	16,7	6,7	-5,6	-25,6	-32,2	-7,4
2008	-37,8	-30	-13,3	-6,1	9,4	19,4	20	16,7	5,5	-3,7	-26,5	-40	-7,2

Автор поддерживает эту точку зрения на широко обсуждаемое потепление климата и его влияние на состояние ММП, являющихся основанием различных геотехнических объектов в криолитозоне. Остановимся лишь на основных составляющих проблемы. Собственно потепление складывается как производная тёплых и холодных периодов года и выражается в повышении среднегодовой температуры воздуха. Эта величина в районе г. Якутска за последние несколько десятилетий составляет около 1,5 °С. Однако, проанализировав многолетние тенденции динамики температур воздуха в теплый и холодный периоды (табл. 2, 3), можно обнаружить интересную закономерность. Температуры лета, а именно они оказывают серьёзное влияние на состояние ММП, в среднем многолетнем выражении за последние несколько десятилетий изменились, за редким исключением, незначительно. Вместе с тем за тот же период температуры воздуха в холодное время года отчетливо повысились. Нередкие в 60–70 гг. прошлого века периоды с температурой воздуха ниже -50 °С, продолжавшиеся до 1,5 месяца, и зафиксированные в Якутске 26 января 1968 г. -62,5 °С для последнего времени не характерны. Это и обусловило повышение среднегодовой температуры воздуха с одновременным незначительным влиянием на мёрзлые толщи горных пород,

ограничиваясь лишь их верхними горизонтами до глубины в несколько метров. К сожалению, отсутствие данных не позволяет пока количественно оценить эту тенденцию.

Гораздо большее влияние на состояние инженерных объектов оказывает резко возросшее за последние несколько лет увлаж-

Таблица 3

Приращения температуры воздуха в Якутске, °С

Месяцы, годы	1883–1965	1966–2008	1883–2008
Январь	2,6	<b>5,0</b>	<b>6,1</b>
Февраль	-1,2	<b>5,6</b>	1,6
Март	-1,4	<b>3,8</b>	1,5
Апрель	0,6	2,2	<b>3,5</b>
Май	0,9	1,0	<b>2,6</b>
Июнь	0,4	1,8	1,2
Июль	0,3	1,1	0,8
Август	1,4	1,2	1,0
Сентябрь	0,0	1,1	0,5
Октябрь	0,2	1,5	0,3
Ноябрь	-0,6	<b>6,1</b>	0,2
Декабрь	-0,2	3,0	0,2
Зима	-0,1	<b>3,8</b>	<b>2,2</b>
Лето	0,6	<b>1,2</b>	<b>1,0</b>
Год	0,2	<b>2,8</b>	<b>1,7</b>

Примечание. Жирным шрифтом выделены величины, имеющие статистически значимые тренды.

нение сезонно-талого слоя грунтов, обусловленное увеличением осадков [7, 8] (рис. 3), а еще в большей степени – многочисленными и продолжительными течами из неисправных систем водо- и теплоснабжения, а также канализации. Это вызвало ряд негативных явлений, главным образом пучение, осложнивших условия эксплуатации многих инженерных объектов. Особенно наглядно это проявляется в положении утративших устойчивое состояние опор электрических (рис. 4, 5, см. цветную вкладку) и телефонных сетей. Представленные в табл. 3 и на рис. 3 данные по осадкам за различные периоды свидетельствуют о том, что за последние десятилетия наблюдались значительные межгодовые колебания годовых сумм осадков, но в целом в Якутске они не увеличивались. Отсутствие тренда осадков позволяет говорить о явном, никак не связанном с глобальным потеплением человеческом факторе в повышении обводнённости города, существенно

ухудшающем состоянии инженерных объектов.

Ещё одну точку зрения на проблему высказали учёные В. Б. Спектор и Б. М. Кершенгольд [9], по мнению которых «климатическую машину можно рассматривать как саморегулируемую систему, а климатические автоколебания – как суммарный результат действия многих различных факторов...»

Повышение среднегодовой температуры воздуха за последние 43 года не должно в настоящее время сильно настораживать [10]. Последние же двадцать лет она практически не росла, а в период 1988–2004 гг. даже немного понижалась. То есть увеличение температуры не является поступательным, её среднегодовые значения вследствие межгодовой изменчивости варьируют в диапазоне от -7 до -10 °С.

Как известно [8], в формировании температуры верхних горизонтов многолетнемерзлых грунтов значительная роль принадлежит гидрометеорологическим факторам: сумме

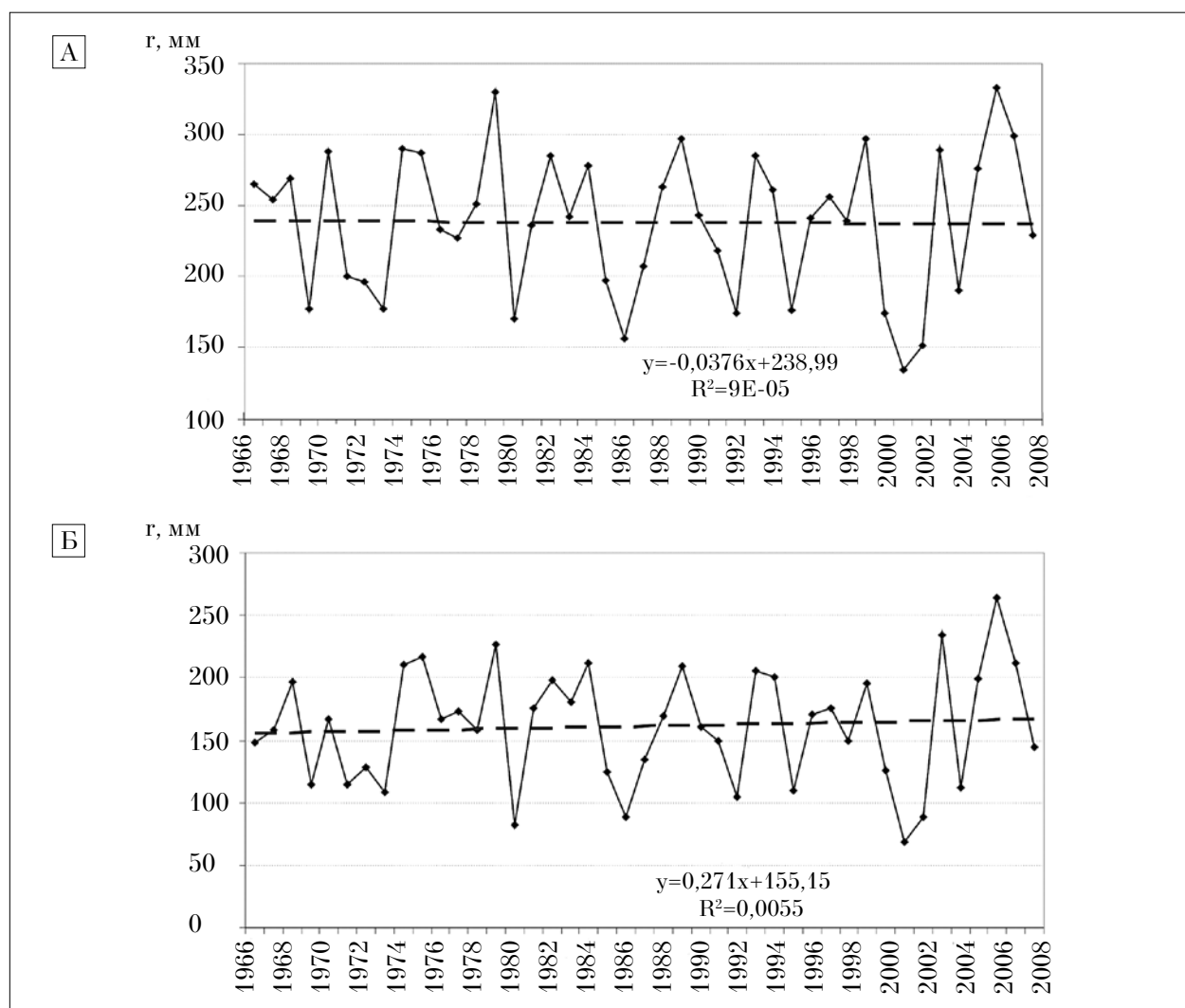


Рис. 3. Изменчивость сумм осадков за год (А) и теплый (Б) период в г. Якутске

отрицательных температур воздуха за сезон, а также высоте снега и характеру его накопления. Пока их сочетание в Якутске ещё достаточно, чтобы не бояться возможного отчётливого изменения свойств мерзлоты. К тому же нельзя автоматически переносить изменчивость температуры воздуха на грунты. Взаимосвязь между ними достаточно сложна и не ограничивается только температурными факторами. Внутригрунтовые условия (литология, влажность), напочвенный и снежный покровы оказывают существенное влияние на термическое состояние верхних горизонтов криолитозоны. Многолетние мониторинговые исследования в различных ландшафтных условиях Центральной Якутии фиксируют пока ещё слабую реакцию многолетнемёрзлых пород на современное потепление климата как в плане увеличения глубины сезонного протаивания, так и в плане повышения температуры многолетнемёрзлых грунтов [7].

Оценка внутригодовой изменчивости температуры воздуха, выполненная с помощью регрессионного анализа, дополняет и расширяет наши представления о вкладах отдельных месяцев (табл. 1, 2). Очевидно, что до середины 60-х годов прошлого столетия потепление в Якутске не только не проявлялось, но даже в отдельные зимние месяцы шло похолодание. После 1966 г. наиболее холодные зимние месяцы (ноябрь–март) потептели на 3–6 °С, а среднезимняя температура, при средней за 1961–1990 гг. -25,9 °С, повысилась почти на 4 °С. Среднегодовая температура воздуха увеличилась почти на 3 °С.

Итак, наблюдаемые в настоящее время в большинстве северных регионов изменения основных климатических параметров не выходят за пределы естественной изменчивости и не могут быть причиной возросшей аварийности геотехнических объектов. Совершенно очевидно, что виновником этих бедствий является человеческий фактор, а не эта коварная, тающая от избытка парниковых газов мерзлота. Но и в этих сложных природных и геотехнических условиях возможно поддержание геотехнических объектов в устойчивом состоянии. Для этого необходимо владеть достоверной, достаточно полной и оперативной информацией о состоянии городской и промышленной инфраструктуры, а также о причинах и масштабах её негативной трансформации. Это позволит при необходимости своевременно осуществлять компенсационные мероприятия, пока же, к сожалению, для большинства руководителей характерно игнори-

рование нормативных требований в отношении капитальных ремонтов зданий, а проведение текущих они считают пустой тратой средств. А ведь мнение большинства специалистов однозначно – текущий ремонт является условием сохранения технологических свойств строения, предотвращения его досрочного износа и соблюдения нормативного срока эксплуатации.

### Заключение

Приведённые данные свидетельствуют об отсутствии единой точки зрения на причины потепления климата и его последствий для геотехнических объектов криолитозоны. Ряд специалистов (О. А. Анисимов, А. И. Бедрицкий, В. Клименко и другие) начиная с середины девяностых годов прошлого века отводят главную роль в этом процессе техногенной составляющей, а точнее – парниковым газам, выделяющимся в атмосферу в результате деятельности человека. При этом они игнорируют или недооценивают тот известный факт, что огромные объёмы парниковых газов выделяются именно по причине таяния ММП, т. е. не могут служить его причиной, а скорее являются его последствием.

Сопоставляя все освещённые выше точки зрения, легко заметить, что, диаметрально расходясь в причинах потепления, большинство учёных близки в оценке его последствий. Основываясь на фундаментальных законах климатологии, физики, геологии и других естественных наук, они отмечают, что все процессы, включающие фазовые переходы воды, требуют огромного количества энергии, а деградация мерзлоты всегда происходит постепенно, медленно и даже когда среднегодовая температура ММП поднимается выше -2 °С, то нужно около 500 лет, чтобы мёрзлая толща значительной мощности разрушилась полностью. Этого времени более чем достаточно, чтобы принять необходимые меры и провести компенсационные мероприятия.

Исключение составляет О. А. Анисимов [1], считающий, что в случае продолжения потепления за несколько будущих десятилетий температура воздуха может возрасти ещё на 3 °С, и это будет сопровождаться повышением температуры ММП и неизбежно приведёт к быстрой утрате устойчивости многих геотехнических объектов. Он отмечает, что в случае сохранения современных тенденций изменения климата, а именно об этом свидетельствуют, по его мнению, теоретические прогнозы

климата, деградация ММП и обусловленные ею негативные геоэкологические последствия станут необратимы и будут сопровождаться массовыми деформациями геотехнических объектов, выстроенных без учёта тенденций динамики климата.

Мнение это, как было показано для территории криолитозоны, не совсем верно, а важным должно стать общее признание факта, что кризисное состояние многих геотехнических объектов в области ММП связано не с изменением климата, как это совершенно ошибочно преподносится в последнее время, а с деградацией мёрзлых грунтов оснований, а также деструкцией несущих конструкций, вызванной неудовлетворительными проектированием, строительством и особенно эксплуатацией [10].

### Литература

1. Анисимов О.А., Лавров С.Н. Глобальное потепление и таяние вечной мерзлоты: оценка рисков для производственных объектов ТЭК РФ. Электронный ресурс <http://articles.excelion.ru/science/geografy/55448055.html>
2. Бедрицкий А.И. Что-то стало пригревать // Итоги. 22 января 2007 г. № 4.
3. Клименко В. Глобальные изменения климата: Что ждет Россию. Электронный ресурс <http://www.polit.ru/analytics/2005/01/12/klim.html>
4. Мельников В.П. Прогресс на вечной мерзлоте. Электронный ресурс <http://www.expert.ru/printissues/ural/2005/17/17ur-unit/>.
5. Мельников В.П. Успокойтесь, не будет никаких катастроф. Электронный ресурс [http://www.stoletie.ru/russkiy\\_proekt/akademik\\_vladimir\\_melnikov\\_uspokotes\\_ne\\_budet\\_nikakih\\_katastrof.htm](http://www.stoletie.ru/russkiy_proekt/akademik_vladimir_melnikov_uspokotes_ne_budet_nikakih_katastrof.htm)
6. Балобаев В.Т., Шепелев В.В. Космопланетарные климатические циклы и их роль в развитии биосферы Земли // ДАН. 2001. Т. 379. № 2. С. 3–8.
7. Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н., Варламов С.П. Влияние современных изменений климата на многолетне-мёрзлые породы Центральной Якутии // Третья конференция геокриологов России: Матер. конф. М.: Изд-во МГУ, 2005. Т. 2. С. 146–152.
8. Скачков Ю.Б. Аномальные зимы и их роль в формировании термического режима грунтов // Третья конференция геокриологов России: Матер. конф. М.: Изд-во МГУ, 2005. Т. 3. С. 239–244.
9. Спектор В.Б., Кершенгольц Б.М. Карбонатная геохимическая модель планетарного климата // Доклады Академии наук. 2007. Т. 416. № 3. С. 392–394.
10. Шац М.М., Скачков Ю.Б. Изменение климата Якутска и его влияние на городскую инфраструктуру // Чистый город. М. 2010. №2 (50). С. 16–22.
11. Шац М.М., Шепелев В.В., Алексеева О.И., Балобаев В.Т., Григорьев М.Н., Чжан Р.В., Макаров В.Н. Об инженерных и эколого-геоэкологических проблемах градостроительства на Севере (на примере г. Якутска) // СЕВЕР: Арктический вектор социально-экологических исследований. Сыктывкар. 2008. С. 97–109.



## Специфика альгофлоры в ризосфере ячменя и сорных растений

© 2011. Л. В. Кондакова, к.б.н., зав. кафедрой,  
Вятский государственный гуманитарный университет,  
e-mail: kaf\_eco@vshu.kirov.ru

В работе приведены результаты исследования альгофлоры в ризосфере ячменя (*Hordeum distichon* L.) и сорных растений на дерново-подзолистой глееватой и дерново-перегнойной глеевой почвах. На видовой состав группировок водорослей ризосферы оказывают влияние индивидуальные особенности высшего растения и свойства почвы.

The results of researching algoflora in barley (*Hordeum distichon* L.) rhizosphere and in weeds on sod-podzol and sod-humus gley soils are presented. Individual features of a higher plant, as well as soil properties influence the groups of algae species composition in the rhizosphere.

Ключевые слова: альгофлора, ризосфера, ризоплана

Key words: Algoflora, rhizosphere, rhizoplane

Высшие растения, несомненно, оказывают сильное влияние на почвенную микрофлору. Концентрирование микроорганизмов в зоне корней высших растений было обнаружено в начале XX века Гильтнером. Он предложил термин «ризосфера» для обозначения той части почвы, которая окружает корни и в которой наблюдается увеличение численности микроорганизмов по сравнению с почвой без корней. В настоящее время под ризосферой понимают пространство вокруг корня от 0 до 2–8 мм в диаметре. В ризосфере растений происходит активное размножение бактерий, грибов и водорослей. Развитие сапротрофных микроорганизмов в этой зоне стимулируется корневыми экссудатами и ризодепозитами. Корневые экссудаты представляют собой низкомолекулярные органические вещества, продукты фотосинтеза и метаболизма растения (сахара, органические кислоты, аминокислоты, спирты, фитогормоны, витамины и др.). Корневые ризодепозиты включают не только экссудаты, но и высокополимерные слизи полисахаридной и белковой природы, ферменты, слущивающиеся поверхностные клетки корня и др. Наибольшая концентрация микроорганизмов происходит непосредственно на поверхности корня – в ризоплане. Масса корневых выделений может составлять более 30–40% продуктов фотосинтеза. Считается, что, получая часть энергетического материала от растений, микроорганизмы отдают взаимы легкоусвояемый азот, фосфор, железо, ряд важных физиологически активных веществ [1].

Являясь фототрофными микроорганизмами, водоросли способны и к миксотрофному питанию [2]. Многие водоросли, особенно зелёные, обладают лабильным обменом веществ и способны перестраивать его в зависимости от условий среды. Немало способных к гетеротрофии видов обнаружено и среди жёлтозелёных водорослей. Между корнями высших растений и водорослями ризосферы возникают взаимопользные связи. Доказана миграция азота из синезелёных водорослей в органы высших растений [3]. Есть точка зрения, что взаимоотношения высших растений с альгофлорой ризосферы также можно рассматривать и как один из вариантов консортивных отношений, где растение служит детерминантом консорции, а водоросли являются консортами [4].

Ж. Ф. Пивоваровой [5] в горных степных фитоценозах Южной Сибири отмечена селективная роль высших растений в видовом составе альгофлоры. Благодаря ризосфере растений сохраняется выживаемость альгофлоры степной экосистемы при сильном антропогенном воздействии, что даёт возможность восстановления её исходного состояния при прекращении воздействия.

Впервые влияние корней на почвенные водоросли было обнаружено Катцнельсоном [6] при изучении микроскопического населения ризосферы кормовой свёклы. Работ, касающихся распространения почвенных водорослей в ризосфере растений, немного [5, 7–14]. В большинстве случаев авторы наблюдали определённое влияние растений на рас-

пределение водорослей в ризосферном слое почвы. Количество клеток в ризосфере может до трёх раз превышать содержание их в почве вдали от корней. Видовое разнообразие водорослей в ризосфере может быть меньше [8, 10] или больше [15], чем вне её. В некоторых случаях ризосферная и контрольная почвы, а также ризосферные зоны разных растений различаются соотношением отдельных групп водорослей. Видов, характерных только для ризосферы растений, не обнаружено [15]. Авторами ряда работ отмечено, что на развитие водорослей в ризосфере оказывают влияние температура и влажность почвы, возраст и физиологическое состояние растений, поражение болезнями и механические повреждения. Для сравнительной оценки микрофлоры ризосферной почвы и почвы, взятой вдали от корней, применяется показатель ризосферного эффекта. Ризосферный эффект – это отношение количества микроорганизмов в ризосфере к их количеству в контрольной почве.

Неотъемлемой частью любого агрофитоценоза, наряду с культурными растениями, являются сорные растения. Водоросли в ризосфере сорных растений ранее не исследовались.

Цель работы: изучить специфику сообществ водорослей в ризосфере и ризоплане ячменя и сорных растений.

**Объекты и методы**

Исследования проводились на пахотных мелиорированных почвах стационара «Ивакинские пашни» (Котельничский район Кировской области): дерново-подзолистой глееватой и дерново-перегнойной глеевой.

Почвенные пробы отбирали из ризосферы ячменя (*Hordeum distichon* L.) и наиболее распространённых сорных растений: пикульника обыкновенного (*Galeopsis bifida* Boenn.), осота полевого (*Sonchus arvensis* L.), клевера ползучего (*Trifolium repens* L.), мари белой (*Chenopodium album* L.), горца почечуйного (*Polygonum persicaria* L.), мяты полевой (*Mentha arvensis* L.). При отборе проб не менее чем у 5 экземпляров каждого анализируемого вида растения выкапывали корневую систему, встряхиванием освобождали от свободной почвы и помещали в стерильные пакеты. Контролем служила почва, взятая вдали от корней растений. Для альгологического анализа использовали как ризосферную почву, так и корни, с кото-

**Таблица 1**  
Разнообразие водорослей в ризоплане, ризосфере и почве, взятой вдали от корней

Растение	Количество видов по систематическим группам				Всего видов	Ризосферный эффект
	синезелёные	зелёные	жёлто-зелёные	диатомовые		
Дерново-подзолистая глееватая почва						
Ячмень 1	9	11	10	1	31	1,11
Ячмень 2	13	7	3	3	26	0,93
Осот полевой 1	13	6	2	1	22	0,76
Осот полевой 2	7	7	0	1	15	0,54
Пикульник обыкновенный 1	11	9	8	0	28	1
Пикульник обыкновенный 2	11	10	1	2	24	0,85
Контрольная почва	11	11	4	2	28	
Дерново-перегнойная глеевая почва						
Ячмень 1	12	12	7	1	32	0,94
Ячмень 2	14	13	10	0	37	1,08
Осот полевой 1	9	19	11	3	42	1,24
Осот полевой 2	11	8	3	0	22	0,65
Пикульник обыкновенный 1	13	15	14	3	45	1,32
Пикульник обыкновенный 2	10	9	5	0	24	0,71
Контрольная почва	10	16	6	2	34	

Примечание: 1 – ризосфера, 2 – ризоплана.

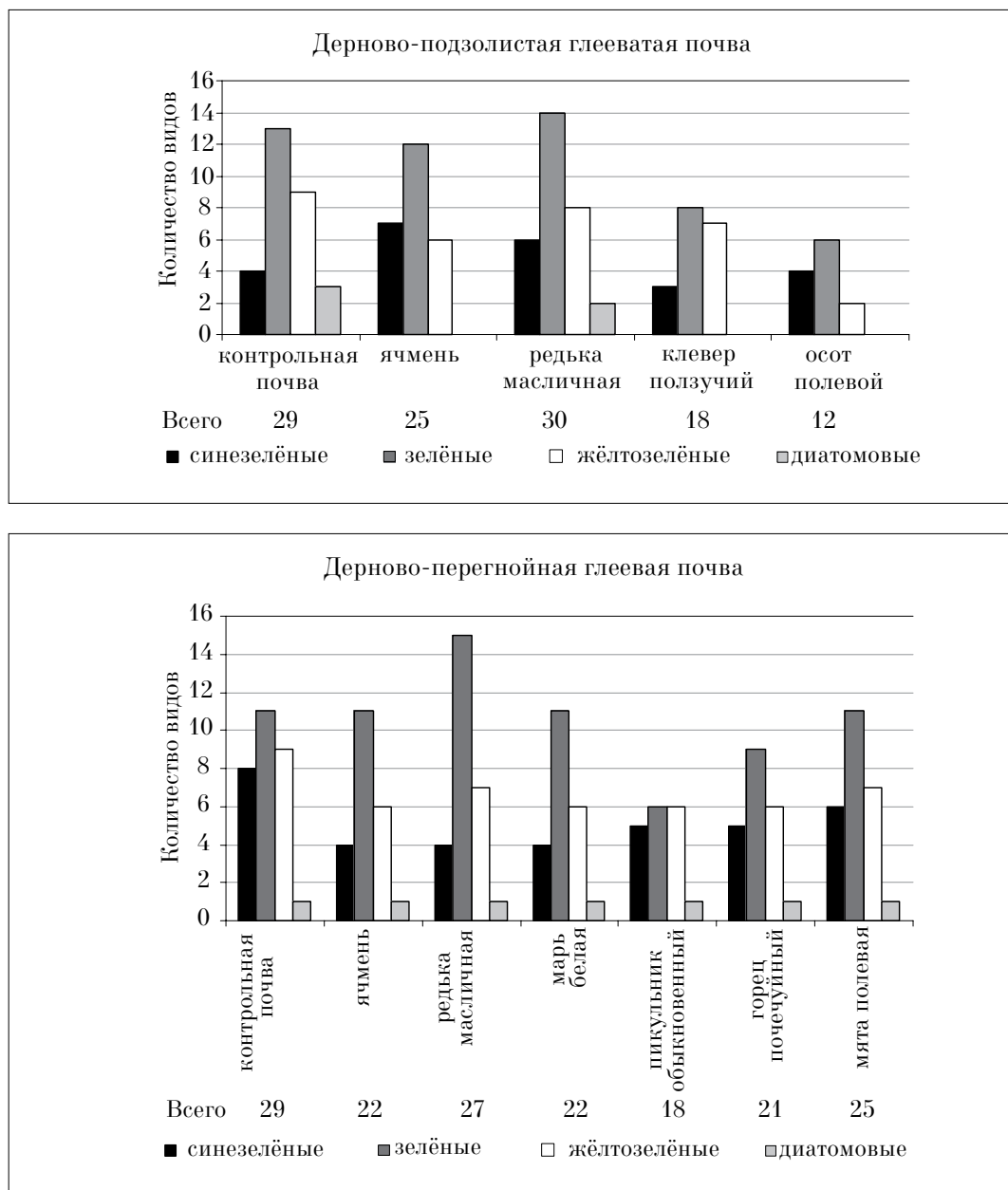


Рис. 1. Состав водорослей в ризосфере культурных и сорных растений

рых готовили смыв (ризоплану). Для этого в колбы со стерильной питательной средой помещали освобождённые от ризосферной почвы корни растений, взбалтывали и оставляли на несколько часов. Затем, соблюдая стерильность, корни извлекали и колбы ставили на свет.

### Результаты и обсуждение

В культурах с посевом смывов ризопланы наблюдали более раннее развитие водорослей по сравнению с контрольной и ризосферной почвой. Ранее это отмечалось Э. А. Штиной [7] и Т. И. Алексахиной [13, 14]. В дерново-

подзолистой глееватой почве ранний рост культур водорослей наблюдали в колбе со смывом с корней ячменя. В дерново-перегнойной глеевой почве более ранний рост водорослей отмечали в культурах с ризопланой пикульника, мари и горца.

Видовое разнообразие водорослей в ризосфере ячменя мало отличалось от контрольной почвы. Ризосфера ячменя в дерново-подзолистой глееватой почве включала следующие виды водорослей: *Anabaena sphaerica*, *A. cylindrica*, *Cylindrospermum licheniforme*, *Nostoc punctiforme*, *N. muscorum* (азотфиксаторы), *Phormidium autumnale*, *Ph. formosum*, *Ph. aerugineo-acerulea*, *Leptolyngbya foveolarum*

(Cyanophyta); виды родов *Chlamydomonas*, *Chlorococcum*, *Chlorella*, *Bracteacoccus minor*, *Tetracystis aggregata*, *Klebsormidium flaccidum* и др. (Chlorophyta); *Eustigmatos magnus*, *Visch-eria helvetica*, *Xanthonema exile*, *X. bristolianum* (Eustigmatophyta); *Bumilleriopsis brevis*, *Characiopsis minuta*, *Pleurochloris anomala* и др. (Xanthophyta) и редко диатомеи *Hantzschia amphioxys*, *Luticola mutica* (Bacillariophyta). Видовое разнообразие водорослей в почве, взятой вдали от корней, было несколько ниже, чем в ризосфере ячменя. Увеличение видового разнообразия было обусловлено жёлтозе-

лёными водорослями, число видов которых в ризосфере ячменя было больше контроля в 2,5 раза (табл. 1, рис. 1). Э. А. Штина [8] отмечала, что яровые злаки оказывают слабое действие на ризосферу. Ранее Катцнельсон с соавторами [16] не обнаружили увеличения численности водорослей в ризосфере яровой пшеницы. В дерново-подзолистой глееватой почве альгофлора ризосферы сорных растений была беднее альгофлоры ризосферы ячменя. Наблюдалось снижение видового разнообразия зелёных и жёлтозелёных водорослей, особенно в ризосфере осота. Видо-

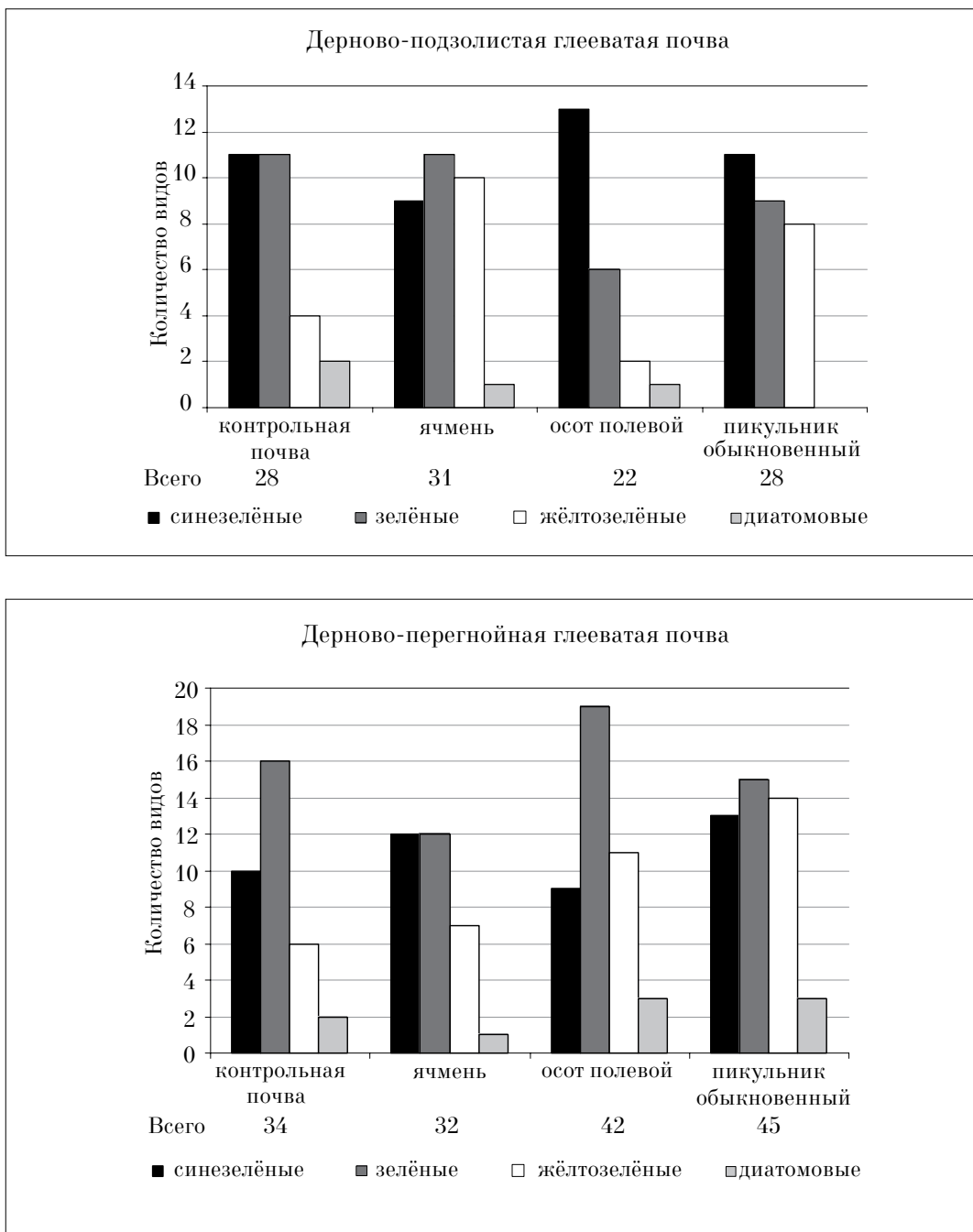


Рис. 2. Состав водорослей в ризоплане культурных и сорных растений

вое разнообразие синезелёных водорослей не уменьшалось по сравнению с контролем. На дерново-перегнойной глеевой почве в ризосфере ячменя видовое разнообразие водорослей несколько ниже контрольной почвы. Но при этом в глеевой почве, в отличие от глееватой, разнообразие водорослей в ризосфере тех же видов сорных растений оказалось выше контрольной почвы (табл. 1). Возможно, это связано с особенностями глееватой и глеевой почв. В дерново-перегнойной глеевой почве видовое разнообразие синезелёных водорослей в контроле, ризосфере ячменя и ризосфере сорных растений мало различалось. При этом число видов зелёных и жёлтозелёных водорослей было выше в ризосфере сорных растений.

Количество клеток водорослей в ризосфере зависит от почвенно-климатических условий и от растения, его возраста, стадии развития, жизненности [7, 8, 11, 15]. В период отбора проб (июль) растения испытывали недостаток влаги. Было отмечено наибольшее иссушение пахотного слоя почв. Численность водорослей в ризосфере ячменя на дерново-подзолистой глееватой почве была низкой –  $8,5 \pm 1,2$  тыс. клеток в 1 г абсолютно сухой почвы и мало отличалась от численности клеток вдали от корней ( $5,6 \pm 1,1$  тыс. клеток). В этот же период отбора проб на дерново-перегнойной глеевой почве водоросли при прямом микроскопическом учёте не были обнаружены ни в контроле, ни в ризосфере растений.

Таким образом, нами установлено, что в ризосфере разных растений агрофитоценоза формируются различные группировки водорослей. На видовой состав альгофлоры ризосферы оказывают влияние индивидуальные особенности высшего растения и свойства почвы. При этом ризосфера ячменя и сорных растений богаче видами, чем ризоплана этих же растений.

Высшие растения, через группировки водорослей в ризосфере и ризоплане, поддерживают гетерогенность альгофлоры почвенной среды и обеспечивают выживаемость водорослей в неблагоприятные по влажности и наличию питательных веществ периоды.

## Литература

1. Экология микроорганизмов. Учебник для студ. вузов/ Под ред. А.И. Нетрусова. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 272 с.
2. Штина Э.А., Голлербах М.М. Экология почвенных водорослей. М.: Наука, 1976. 144 с.
3. Панкратова Е.М. Роль азотфиксирующих синезелёных водорослей (цианобактерий) в накоплении азота и повышении плодородия почвы. Автореф. ... дис. докт. биол. наук. М.: МГУ. 1981. 40 с.
4. Работнов Т.А. О современном состоянии изучения аллелопатии // Бюл. МОИП. Отд. биол. 1974. Т. 79. Вып. 4. С. 71–85.
5. Пивоварова Ж.Ф. Узлы сгущения жизни – гарант сохранения биоразнообразия горных степей Южной Сибири // Водоросли и цианобактерии в природных и сельскохозяйственных экосистемах. Киров. 2010. С. 233–237.
6. Katznelson H. The «Rhizosphere effect» of mangels on certain groups of soil microorganismus // Soil Sci. 1946. V. 62. № 5. P. 343–354.
7. Штина Э.А. Влияние сельскохозяйственных растений на флору почвенных водорослей // Труды Киров. с.-х. ин-та. 1954. Т. 10. Вып. 22. С. 59–69.
8. Штина Э.А. Водоросли дерново-подзолистых почв Кировской области // Тр. Ботан. ин-та АН СССР. Сер. 2. 1959. Вып. 12. С. 36–141.
9. Hadfield W. Rhizosphere effect on soil algae (of thea plan *Camelia sinensis*) // Nature. 1960. V. 185. № 4707. P. 298.
10. Байрамова Л.С. Водоросли субтропических почв Азербайджана. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Баку: АН АзССР. 1965. 24 с.
11. Новичкова-Иванова Л.Н. Водоросли в ризосфере // Методы изучения продуктивности корневых систем и организмов ризосферы. Л. 1968. С. 131–135.
12. Metting B. The systematics and ecology of soil algae // The Bot. review. 1981. V. 47. № 2. P. 195–312.
13. Алексахина Т.И. Почвенные водоросли в ризосфере преобладающих растений лесных биогеоценозов // Экология. 1972. № 1. С. 45–52
14. Алексахина Т.И. Влияние некоторых древесных и травянистых растений леса на почвенные водоросли // Значение консортивных связей в организации биогеоценозов. Пермь. 1976. С. 85–89.
15. Алексахина Т.И., Штина Э.А. Почвенные водоросли лесных биогеоценозов. М.: Наука, 1984. 148 с.
16. Katznelson H., Rouatta J.W., Payne T.M. Recept studies on the microflora of the rhizosphere // VI Congr. Intern. du sol. Paris. 1956. P.151–156.

**Регуляция актиномицетом симбиотических отношений клубеньковых бактерий с клевером луговым**

© 2011. И. Г. Широких<sup>1,2</sup>, д.б.н., зав. лабораторией,

О. В. Рябова<sup>1</sup>, к.б.н., н.с., А. А. Широких<sup>1</sup>, д.б.н., в.н.с.,

<sup>1</sup>ГНУ Зональный научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого Россельхозакадемии,

<sup>2</sup>Лаборатория биомониторинга Института биологии Коми НЦ УрО РАН и Вятского государственного гуманитарного университета, e-mail: irgenal@mail.ru

Представлены экспериментальные данные, свидетельствующие о различном, в зависимости от наличия полимерного источника углерода, влиянии актиномицета *Streptomyces platensis* на симбиотические отношения клевера лугового с клубеньковыми бактериями *Rhizobium leguminosarum* bv. *trifolii*. Обсуждается возможность участия мицелиальных прокариот в регуляции инфицирования корней ризобиями на ранних стадиях формирования симбиотических отношений.

The experimental data show that the actinomycete *Streptomyces platensis* influences symbiotic relations of clover with *Rhizobium leguminosarum* bv. *trifolii* in a different way, depending on availability of polymer source of carbon. The possibility of mycelial prokaryotes participating in roots infecting with rhizobia at early stages of symbiosis is discussed.

Ключевые слова: стрептомицеты, ризобии, клевер луговой, колонизация корней, нодуляция

Key words: streptomycetes, rhizobium, red clover, root colonization, nodulation

Клевер луговой (*Trifolium pratense* L.), как и другие бобовые культуры, образует симбиоз с клубеньковыми бактериями – ризобиями. Бобово-ризобияльный симбиоз – одна из наиболее изученных надорганизменных систем, во многом благодаря своей практической значимости. Современные исследования генетических основ продуктивности симбиоза показывают, что в процессе взаимодействия растений с ризобиями возникает тесная структурно-функциональная интеграция партнёров, которая основана на перекрёстной регуляции и координированной экспрессии бактериальных и растительных генов [1].

Вместе с тем при интродукции ризобий в почву было обнаружено, что иногда они не оказывали положительного действия на растения, пока не вносили другие ризосферные бактерии. Проникновению ризобиев в растения и установлению симбиоза способствовали так называемые бактерии – «хелперы». Внесение таких пар культур, как *Rhizobium* – *Azospirillum* или *Rhizobium* – *Bacillus polytuxa*, в 2-3 раза увеличивало число клубеньков у растений [2]. Другие авторы отмечали положительный эффект (увеличение нодуляции и сухой массы проростков) от совместной инокуляции сои культурами *Streptomyces*

*griseus* и *Bradirhizobium japonicum* при покрытии семян хитином [3]. Благодаря выраженной экзогидролазной активности актиномицеты расщепляют в почве различные полимерные соединения, которые становятся доступными микроорганизмам других трофических блоков. Получены убедительные данные о существовании между мицелием актиномицетов и микроколониями клубеньковых бактерий *in situ* тесной положительной связи, близкой к функциональной [4]. Участвуя в регуляции численности свободноживущих в почве клубеньковых бактерий, актиномицеты могут играть важную роль в образовании клубеньков на корнях растений и, следовательно, в симбиотрофном питании бобовых культур.

Для понимания межорганизменных взаимодействий в их естественной среде обитания необходимым этапом является моделирование сообществ. В связи с этим изучали влияние последовательной интродукции *Streptomyces platensis* и *Rhizobium leguminosarum* bv. *trifolii* на симбиотрофию клевера лугового в модельном эксперименте для разработки путей направленного регулирования и повышения симбиотической эффективности искусственных бобово-ризобияльных систем.

**Объекты и методы**

Влияние интродукции клубеньковых и мицелиальных бактерий на развитие растений клевера лугового изучали в гнотобиотической системе в стеклянной посуде со стерильным кварцевым песком, увлажнённым (10% объём/вес) питательным минеральным раствором Красильникова-Кореньяко [5]. Варианты интродукции приведены в таблице 1.

Согласно схеме опыта, в вариантах 1, 4 и 6 в качестве полимерного источника углерода в песчаный субстрат в количестве 1% от его веса добавляли крахмал, при гидролитическом расщеплении которого образуются доступные клубеньковым бактериям мономеры. В качестве интродуцентов использовали штаммы *Streptomyces platensis* 4-кл-3 (рис. 1, см. цветную вкладку) и *Rhizobium leguminosarum* bv. *trifolii* 27-2Б (рис. 2, см. цветную вкладку), выделенные нами из ризосферы клевера лугового на дерново-подзолистой почве. В чистой культуре *S. platensis* 4-кл-3 оказывал стимулирующее действие на рост бактерий *R. leguminosarum* bv. *trifolii* 27-2Б [6]. Культуры микроорганизмов для интродукции выращивали на жидких питательных средах. Для стрептомицета использовали среду Гаузе 1 [7], для ризобий – маннитно-дрожжевую среду [8]. Посевы культур *S. platensis* 4-кл-3 и *R. leguminosarum* bv. *trifolii* 27-2Б инкубировали на качалке при 25 °С в течение 9-и и 7-и суток соответственно. Популяции стрептомицетов и ризобий вносились в различные сроки. Культуру стрептомицета вносили в песок в количестве  $1,0 \times 10^5$  КОЕ/г при закладке опыта, а спустя 7 сут – культуру клубеньковых бактерий в количестве  $2,0 \times 10^4$  КОЕ/г песка. Ещё через 7 сут стерилизованные (15 мин.) концентрированной серной кислотой и проращенные в течение 1 сут семена клевера (сорт Трио) асептически помещали на 5 мм в глубь кварцевого песка. Повторность опыта 25-кратная. Растения выращивали в климатической камере при 23 °С и фотопериоде 16 час.

Численность интродуцированных микроорганизмов определяли в песке перед закладкой растений (на 14-е сутки от начала опыта) и на корнях растений в возрасте 41 сут, для чего у 3-х растений в каждом варианте стерильно отделяли корневую систему от надземной части. Корни растений, принадлежащих к одному варианту, объединяли и отмывали в колбе со 100 мл стерильной воды, взбалтывая в течение 5 мин. Отмытые от песка корни гомогенизировали в ступке и готовили серию разведений для посева на плотные питательные среды. Численность стрептомицетов учитывали на агаре Гаузе 1, ризобий – на маннитно-дрожжевом агаре. Сухую массу корней определяли гравиметрически после фильтрования суспензии и последующего высушивания фильтров. У остальных растений в каждом варианте определяли линейные размеры и сухую биомассу надземной части и корней, количество листьев, количество клубеньков на 1 растении и в пересчёте на 1 г сухих корней.

Статистическую обработку производили с помощью дисперсионного анализа с использованием программы STATGRAFICS Plus.

**Результаты и обсуждение**

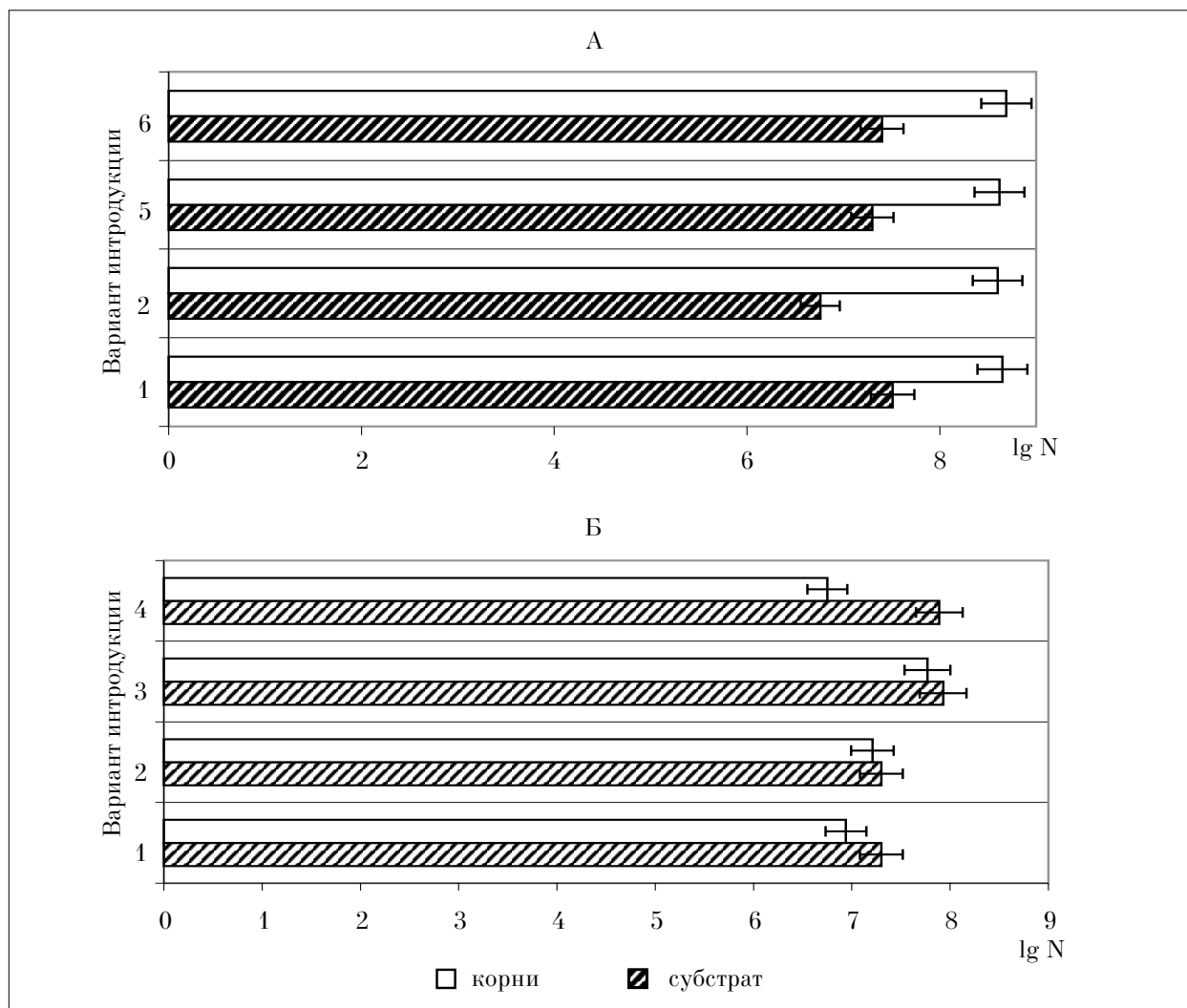
Анализ численности интродуцированных в гнотобиотическую систему микроорганизмов, проведённый до введения в неё растений клевера, показал, что численность *R. leguminosarum* bv. *trifolii* 27-2Б увеличилась за период прединкубации на три порядка, а численность *S. platensis* 4-кл-3 – на два порядка к первоначальному уровню, составив в среднем по вариантам соответственно  $2,1 \times 10^7$  и  $5,2 \times 10^7$  КОЕ/г (рис. 3). Внесение крахмала не оказало существенного влияния на численность КОЕ стрептомицета в песчаном субстрате, тогда как интродукция ризобий – в вариантах 1 и 2 – существенно снижала его численность по сравнению с ростом *S. platensis* 4-кл-3 в чистой культуре (вар. 3 и 4).

**Таблица 1**

Схема опыта

Компоненты	Варианты					
	1	2	3	4	5	6
Растение клевера	+	+	+	+	+	+
Бактерии рода <i>Rhizobium</i>	+	+	–	–	+	+
Бактерии рода <i>Streptomyces</i>	+	+	+	+	–	–
Крахмал	+	–	–	+	–	+

Примечание: знак «+/-» означает присутствие/отсутствие компонента в модельной системе.



**Рис. 3.** Численность (lgN, КОЕ/г) интродуцированных популяций *Rhizobium leguminosarum* bv. *trifolii* 27-2Б (А) и *Streptomyces platensis* 4-кл-3 (Б) в песчаном субстрате и на корнях растений клевера лугового

Популяционная плотность ризобий в варианте 1 ( $32,8 \times 10^6$  КОЕ/г), где развитие интродуцентов происходило в присутствии крахмала, была почти в 6 раз выше, чем во 2-м варианте – без дополнительного источника питания ( $5,7 \times 10^6$  КОЕ/г). Это говорит о возникновении между интродуцентами метабиотических взаимоотношений, основанных на использовании одним организмом продуктов обмена другого в качестве трофического субстрата. Так, при посеве бинарной суспензии бактерий на плотную среду с крахмалом вокруг образуемых стрептомицетом колоний наблюдали скопление колоний *R. leguminosarum* (рис. 4, см. цветную вкладку). Обладая, как и большинство представителей порядка Actinomycetales, экзогидролазной активностью, *S. platensis* 4-кл-3 способствовал снабжению ризобий продуктами гидролиза крахмала.

На 41-е сутки от начала совместного культивирования растений и микроорганизмов в

системе *in vitro*, плотность заселения корней *R. leguminosarum* bv. *trifolii* 27-2Б составила  $4,2-4,9 \times 10^8$  КОЕ/г, вне зависимости от уровня численности популяции в песке (рис. 3). Эти результаты соответствуют ранее полученным *in situ* данным, что уровень стабилизации численности клубеньковых бактерий непосредственно на корнях растений не зависит от исходной численности популяции в окружающей почве [9]. Колонизация корней ризобиями не зависела также и от наличия в песчаном субстрате крахмала, в то время как популяция стрептомицета на корнях клевера в условиях обогащения среды крахмалом имела на порядок меньшую плотность ( $5,7 \times 10^6$  КОЕ/г), чем в его отсутствие ( $5,9 \times 10^7$  КОЕ/г). Выявленные различия в стратегии выживания интродуцентов при обогащении среды источником углерода в полимерной форме вполне закономерны, поскольку стрептомицеты и клубеньковые



Таблица 2

Влияние интродукции культур *Streptomyces platensis* 4-кл-3 и *Rhizobium leguminosarum* bv. *trifolii* 27-2Б на биометрические показатели клевера лугового при выращивании в системе *in vitro*

Вариант	Количество клубеньков		Биомасса растения, мг	Масса надземной части ( $M_{\text{надз}}$ ), мг	Масса корней ( $M_{\text{к}}$ ), мг	Высота надземной части ( $L_{\text{надз}}$ ), мм	Длина корней ( $L_{\text{к}}$ ), мм	Соотношение	
	на 1 растение	на 1 г корней						$M_{\text{к}} / M_{\text{надз}}$	$L_{\text{к}} / L_{\text{надз}}$
1	3±2	201*	17,9	3,8*	14,1*	22*	40*	3,7	1,8
2	17±2*	1791	17,0	7,8	9,2	66	52	1,8	0,8
3	0	0	18,0	9,2	8,8	76	55	1,0	0,7
4	0	0	8,8*	3,2*	5,6*	27*	43	1,8	1,6
5	2±2	402	17,3	11,4	5,9	99	48	0,5	0,5
6	5±2	763	20,3	13,4	6,9	90	41	0,5	0,5

Примечание: Описание вариантов см. в таблице 1. \*Различия достоверны при  $P \geq 0,05$ .

бактерии являются представителями различных функциональных групп.

При совместной интродукции стрептомицета и ризобий (вар. 1 и 2) плотность заселения корней мицелиальными прокариотами уступала на порядок плотности стрептомицета в случае его интродукции в чистой культуре (вар. 3), что соответствует представлениям об актиномицетах как K-стратегах, менее конкурентоспособных в ризосфере растений по сравнению с типичными r-стратегами – клубеньковыми бактериями [10].

Структурную основу функционирования симбиоза составляют образуемые растениями клубеньки. Наибольшее (17±2 шт./раст.) за период наблюдений количество клубеньков на корнях клевера сформировалось при последовательной интродукции в субстрат стрептомицета и ризобий (табл. 2). Механизм стимуляции образования клубеньков стрептомицетом может быть связан с образованием на корнях дополнительных локусов инфицирования. Поскольку в свете современных представлений [1] формирование симбиоза между клубеньковыми бактериями и растением связано не столько с активным внедрением микросимбионта в корневые волоски, сколько обусловлено гидролизом клеточной стенки собственными ферментами растения, продуцируемые стрептомицетом гидролазы могли внести дополнительный вклад в процесс нодуляции.

На молекулярном уровне развитие клубеньков у растения-хозяина индуцируют синтезируемые ризобиями Nod-факторы, близкие по химической структуре к олигомерам хитина [11]. Так как непосредственно взаимодействует с растительными рецепторами не сам Nod-фактор, а продукты его процессинга, которые образуются в клетке-мишени под действием литических ферментов, широко рас-

пространённая среди стрептомицетов способность продуцировать хитиноподобные ферменты [10] может служить ещё одним объяснением вероятного механизма стимуляции образования клубеньков стрептомицетом. Однако высказанные предположения справедливы только для условий, когда корневые выделения являлись единственным источником углерода в системе. Обогащение среды крахмалом значительно снижало активность нодуляции в присутствии стрептомицета (вар. 1) и количество клубеньков на одном растении, как и в остальных вариантах (2–5 шт./раст.) опыта, существенно между собой не различалось.

Растения варианта 1 характеризовались минимальным количеством клубеньков в пересчёте на единицу сухой массы. Визуально наблюдали утолщение корней растений при незначительном их росте в длину. Соотношение биомассы корней и надземной части в этом варианте составило 3,7, что свидетельствует о нарушении гормонального баланса растений [12]. Продуцировать фитогормоны способны как стрептомицеты [13], так и бактерии рода *Rhizobium* [14]. Высокая численность той и другой популяций в условиях обогащения среды крахмалом, очевидно, привела к избытку в среде экзогенного ауксина, что обусловило торможение роста корней в длину и их утолщение. Такой характер роста может быть губительным для растения.

Активное клубенькообразование при интродукции стрептомицета и ризобий в варианте 2 – без добавления крахмала – тоже не привело к повышению биометрических показателей растений: линейные размеры и сухая биомасса клевера существенно не отличались от аналогичных показателей в варианте с чистой культурой клубеньковых бактерий (вар. 5), а соотношение массы и линейных размеров корней

и надземной части растений увеличилось (табл. 2) по массе – более чем в 3 раза. Известно, что бобовые способны к жесткой регуляции клубенькообразования, которая опосредована надземной частью [1]. Специфические механизмы авторегуляции процесса образования клубеньков позволяют растениям избегать избыточного количества клубеньков и тем самым экономить энергию, которая при симбиозе всегда в дефиците. Образование большого числа клубеньков под воздействием экзогидролазной активности стрептомицета, очевидно, обусловило перерасход энергии, что проявилось некоторым угнетением надземной части растений.

Выращенные *in vitro* без ризобий, но в присутствии стрептомицета (вар. 3 и 4) растения клевера не имели на корнях клубеньков и при добавлении в среду крахмала (вар. 4) характеризовались существенно более низкими значениями биометрических параметров (табл. 2). В варианте 3, где отсутствовал дополнительный к корневой экскреции источник углерода, взаимодействие стрептомицета и растений обеспечило макросимбионту линейные размеры и накопление сухой массы на уровне вариантов с интродукцией в систему клубеньковых бактерий (вар. 2, 5 и 6). Все растения, выращенные в присутствии культуры *S. platensis* 4-кл-3, отличались более высоким (1,0-3,7) соотношением биомассы корней и надземной части в сравнении с растениями, выращенными при введении в среду только культуры ризобий (0,5-0,6) – вар. 5 и 6.

### Выводы

При разработке новых способов повышения эффективности искусственных бобово-ризобиальных систем необходимо учитывать следующее:

1. Способность культуры *S. platensis* 4-кл-3 оказывать стимулирующее влияние на нодуляцию клевера лугового клубеньковыми бактериями *R. leguminosarum* 27-2Б проявилась в условиях, когда единственным источником углерода в среде служили корневые выделения растений.

2. В присутствии дополнительного источника углерода (крахмал) результатом взаимодействия популяций стрептомицета и ризобий явилось повышение численности клубеньковых бактерий в песчаном субстрате, но не на корнях растений; не возросла, против ожидаемого, и активность нодуляции корней. Более того, растения при совместном введении в систему ризобий, крахмала и способного к его

ферментативному расщеплению стрептомицета имели явные признаки угнетения, характерные для нарушений, обусловленных избытком экзогенного ауксина.

3. Стрептомицет, в отсутствие конкуренции со стороны ризобиев, более активно колонизировал корни и оказывал на растение стимулирующее действие, сопоставимое по эффектам на ранних стадиях развития с клубеньковыми бактериями. Но, в отличие от ризобий, стрептомицетная стимуляция сильнее выражена в отношении корней, чем в отношении надземной части растений.

### Литература

1. Генетика симбиотической азотфиксации с основами селекции / Под ред. И.А.Тихоновича, Н.А.Проворова. С-Пб.: Наука, 1998. 194 с.
2. Добровольская Т.Г. Структура бактериальных сообществ почв. М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. 282 с.
3. Li D.-M., Alexander M. Co-inoculation with antibiotic producing bacteria to increase colonization and nodulation by *Rhizobium* // Plant and Soil. 1988. V. 108. P. 211–219.
4. Кожевин П.А. Микробные популяции в природе. М.: Изд-во МГУ, 1989. 175 с.
5. Красильников Н.А., Коренько А.И. Влияние клубеньковых бактерий на азотфиксацию клевера в условиях стерильных культур // Микробиология. 1946. Т. 15. № 4. С. 279–283.
6. Широких И.Г., Широких А.А., Мерзаева О.В., Тумасова М.И. Актиномицеты ризосферы клевера лугового на дерново-подзолистой почве // Почвоведение. 2004. № 7. С. 875–881.
7. Определитель актиномицетов. Роды *Sreptomycetes*, *Streptoverticillium*, *Chainia*/ Гаузе Г.Ф., Преображенская Т.П., Свешникова М.А. и др. М.: Наука, 1983. 248 с.
8. Методы общей бактериологии / Под ред. Ф. Герхарда. М.: Мир, 1983. Т. 2. 469 с.
9. Лисичкина Г.А., Кожевин П.А., Звягинцев Д.Г. Динамика численности *Rhizobium japonicum* в ризоплане и ризосфере различных растений // Микробиология. 1983. Т. 52. Вып. 4. С. 646–650.
10. Звягинцев Д.Г., Зенова Г.М. Экология актиномицетов. М.: ГЕОС, 2001. 257 с.
11. Проворов Н.А., Борисов А.Ю., Тихонович И.А. Сравнительная генетика и эволюционная морфология симбиозов растений с микробами-азотфиксаторами и эндомикоризными грибами // Журнал общей биологии. 2002. Т. 63. № 6. С. 451–472.
12. Регуляторы роста растений / Под ред. Г.С. Муромцева. М.: Колос, 1979. 246 с.
13. Калакуцкий Л.В., Шарая Л.С. Актиномицеты и высшие растения // Успехи микробиологии. М.: Наука, 1990. № 24. С. 26–65.
14. Мишустин Е.Н., Шильникова В.К. Биологическая фиксация атмосферного азота. М.: Наука, 1968. 532 с.

**Комплекс почвенных нематод в пойменных лесах долины р. Печора**

© 2011. А. А. Кудрин, аспирант, Е. М. Лаптева, к.б.н., зав. отделом,  
М. М. Долгин, д.б.н., зав. отделом,

Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,  
e-mail: allkudrin@gmail.com

Комплекс нематод аллювиальной луговой кислой почвы пойменного леса включает 41 род из 23 семейств и 9 отрядов. Сообщество нематод может быть охарактеризовано как сукцессионно устоявшаяся система, функционирующая в условиях отсутствия антропогенного воздействия. Трофическая сеть высоко структурирована, с преобладанием хищных форм и политрофов. В почвенной пищевой сети пойменной лесной экосистемы наблюдается относительное равновесие между бактериальным и грибным способом первичного разложения органического вещества, с небольшим смещением в сторону бактериального в минеральных горизонтах аллювиальной почвы.

Complex of nematodes of alluvial meadow acidic soil of floodplain forests includes 41 genera consisting of 23 families and 9 orders. Nematodes community can be characterized as a stable successive system that functions in conditions of anthropogenic influence. Trophic chain is highly structured, predatory forms and poly-trophs predominate. In the soil trophic chain of floodplain forest ecosystem there is a relative balance between bacterial and fungal primary method of organic matter decomposition, in the mineral horizons of alluvial soils bacterial method slightly predominates.

Ключевые слова: сообщество нематод, аллювиальные почвы, пойменный лес,  
почвенная пищевая сеть

Key words: Nematodes community, alluvial soils, floodplain forest, soil trophic chain

**Введение**

Почвенный биотический комплекс – важнейшая составляющая наземных экосистем [1], определяющая скорость трансформации органических веществ, протекание почвообразовательных процессов, формирование и устойчивое функционирование почвы и экосистемы в целом [2 – 4]. Одной из наиболее многочисленных и широко распространённых групп почвенных беспозвоночных животных по праву считают группу нематод [5]. Нематоды участвуют в разложении растительных остатков, регулируют численность микробных комплексов, почвенных беспозвоночных [6], влияют на содержание и состав в почве биогенных элементов, необходимых для роста и развития растений, бактерий и животных [7].

Сообщества нематод достаточно чувствительны к изменениям почвенных условий, обусловленным изменениями климата [8], воздействием различных природных и антропогенных факторов [9], что позволяет использовать комплексы нематод в биоиндикационных целях [10], а также для диагностики статуса и сложности трофических связей в почвах [7]. Индикаторная роль нематод основана на их чёткой приуроченности к различным типам жизненной стратегии. В структу-

ре нематодных комплексов можно выделить группу «колонистов» (colonizers – С) и группу «персистеров» (persister – Р) [11]. «Колонисты» характеризуются коротким жизненным циклом, способностью к активному освоению субстрата, толерантностью к изменению экологических условий, эвтрофикации и дефициту кислорода. «Персистеры» отличаются невысокой скоростью размножения, длинным жизненным циклом и низкой способностью к колонизации. На пятибалльной шкале (с-р шкала) «колонисты» и «персистеры» находятся на крайних позициях (им присвоены соответственно 1-й и 5-й баллы), остальные группы нематод занимают промежуточные позиции. Доля каждой группы нематод в сообществе может быть преобразована в экологические индексы – структурный (SI), почвенного богатства (EI), путей разложения органического вещества в пищевой цепи (CI), позволяющие дать оценку нарушенности экосистемы, условиям почвенной пищевой сети, преобладающим путям разложения органического вещества, уровню первичной продукции.

К настоящему времени собран значительный материал по характеристике сообществ нематод в почвах луговых [12, 13] и лесных [14 – 17] сообществ водораздельных ландшафтов. Формирование комплексов беспозвоноч-

ных в почвах пойменных ландшафтов протекает в специфических, «земноводных» условиях, связанных с ежегодным затоплением паводковыми водами и отложением аллювиальных наносов (наилков) на поверхность поймы [18, 19]. Последнее обуславливает более высокую биологическую активность почв по сравнению с водоразделами [20].

Цель работы – изучение качественных и количественных характеристик сообщества почвообитающих нематод в аллювиальной почве пойменного осиново-берёзового леса и оценка состояния трофической сети нематоценоза.

### Объекты и методы

Исследования проводили в 2009 г. в долине среднего течения р. Печора, на территории левобережной пойменной террасы в 45 км выше по течению от г. Печора (Республика Коми, Печорский р-н, северная тайга). На данном отрезке поймы сохранены небольшие по площади массивы осиново-берёзовых лесов с примесью ели и хорошо развитым травянистым напочвенным покровом. Один из таких массивов, расположенный в понижении центральной части поймы (64°51' с.ш. 57°38' в.д.), послужил ключевым участком для изучения комплекса почвенных нематод.

Почва участка – аллювиальная луговая кислая на среднесуглинистом аллювии, подстилаемом песчаными отложениями с глубины 190–200 см. В строении профиля луговой почвы, сформированной в пойменном лесу, чётко выделяется горизонт лесной подстилки А0 мощностью 3–4 см, представленный опадом травянистых растений и древесных пород. Под лесной подстилкой, переплетённой корнями трав, залегает комковато-порошистый гумусоаккумулятивный горизонт А1 мощностью до 6–10 см, постепенно переходящий через серию переходных по гумусу горизонтов в суглинистый аллювий. После паводка зеркало грунтовых вод находится на глубине 1–1,5 м, признаки оглеения (в виде сизых и ржавых пятен) в морфологическом строении профиля прослеживаются с глубины 10–15 см от поверхности почвы.

Для оценки численности и таксономического состава нематод отбирали пробы почв с июня по сентябрь случайным образом из наиболее заселённых горизонтов – гор. А0 (глубина отбора 0–3 см) и гор. А1 (глубина отбора 3–10 см) в 8-кратной повторности. Всего за период исследования было отобрано 64

пробы. Экстрагировали нематод в лабораторных условиях из свежих образцов почвы массой 50 г в течение 48 часов в соответствии с модифицированным методом Бермана, с последующей их фиксацией 4% раствором формалина и изготовлением временных глицериновых препаратов. Идентификацию нематод проводили до рода, используя инверсионный световой микроскоп (увеличение ×400). Выделение эколого-трофических групп нематод осуществляли согласно классификации Ятса [21]. Численность нематод выражали в экз./100 г воздушно-сухой почвы. Полевую влажность почвы определяли гравиметрическим методом [22].

При характеристике сообщества нематод использовали индексы, основанные на характере питания и типе жизненной стратегии (с-р шкала), – индекс зрелости (MI), индекс путей разложения органического вещества в пищевой сети (CI), структурный индекс (SI) и индекс почвенного богатства (EI). Формулы расчёта приведены ниже:

$$MI = \sum V_i \cdot f_i \quad (1),$$

где  $V_i$  – значение по с-г шкале  $i$ -го таксона;  $f_i$  – частота встречаемости  $i$ -го таксона.

$$CI = \frac{0,8 Fu_2}{3,2(Ba_2 + Fu_2)} \cdot 100 \quad (2),$$

где  $Fu_2$ ,  $Ba_2$  – функциональные гильдии нематод по Bongers [11] и Yeates et.al. [21].

$$SI = \left( \frac{\sum K_s n_s}{\sum K_s n_s + \sum K_b n_b} \right) \cdot 100 \quad (3),$$

$$EI = \left( \frac{\sum K_e n_e}{\sum K_e n_e + \sum K_b n_b} \right) \cdot 100 \quad (4),$$

где  $n$  – численность функциональной группы нематод в пробе;  $K$  – коэффициент, соответствующий определённой функциональной группе по [23].

Индекс зрелости (MI) характеризует нарушение среды в целом и может быть использован для мониторинга процессов колонизации и дальнейшей сукцессии после нарушения среды. Низкие значения MI свидетельствуют о начальных стадиях сукцессии, высокие – о более поздних стадиях или слабых нарушениях среды [14]. Индекс (CI) позволяет судить о путях разложения органического вещества в трофической цепи. Высокие значе-

ния CI указывают на преобладание грибного типа разложения, низкие – на доминирование бактериального. С помощью индексов SI и EI можно оценить уровень почвенного плодородия, доступность питательных веществ и стабильность почвенной экосистемы в целом [24]. Графическое изображение последних двух индексов в двухмерной оси координат позволяет получить фаунистический профиль, состоящий из 4 квадратов, характеризующих нарушенные (А), зрелые (В), деградированные (D) и структурированные (С) условия почвенной пищевой сети.

### Результаты и обсуждение

Как показали проведённые исследования, комплекс нематод аллювиальной почвы пойменного леса включает 41 род из 24 семейств и 6 отрядов (табл. 1). Впервые для Республики Коми (РК) было отмечено 7 родов – *Diphtherophora*, *Malenchus*, *Iotonchus*, *Miconchus*, *Eumonhystera*, *Pratylenchoides*, *Gracilancia*, не встречавшихся ранее в почвах таёжных ландшафтов РК [17]. Выявление новых родов было вполне ожидаемо, поскольку

данные таксоны известны на территории Кировской области [24] и Республики Карелия [25]. В аллювиальной почве печорской поймы наиболее богат в таксономическом отношении отряд Telenchida, а по численности представителей – семейства Tripylidae и Mononchidae.

Уменьшение численности и таксономического разнообразия с переходом от органогенных горизонтов почвы к минеральным – характерная черта вертикального распределения многих групп беспозвоночных, в том числе и нематод [15, 17, 26]. Как показали проведённые нами исследования, максимальным таксономическим разнообразием и высокой численностью нематод во все сроки отбора отличаются горизонты лесной подстилки (рис. 1). Из всей совокупности зарегистрированных таксонов представители восьми родов (*Aphelenchoides*, *Anaplectus*, *Eudorylaimus*, *Helicotylenchus*, *Heterodera*, *Malenchus*, *Plectus*, *Tripyla*) встречались во всех горизонтах аллювиальной почвы и во все сроки отбора, остальные роды были приурочены к отдельным срокам и отдельным горизонтам.

Следует отметить, что в почве пойменного леса таксономическое разнообразие не-

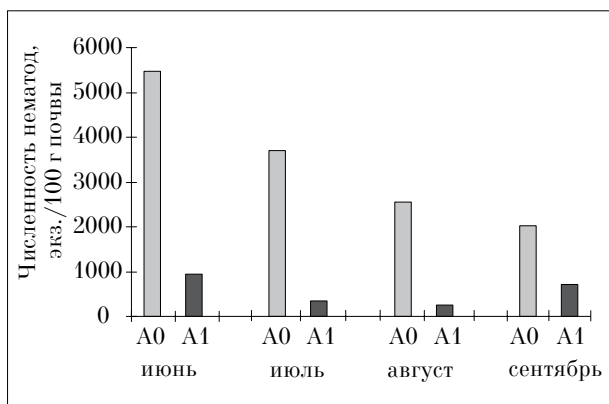
Таблица 1

Таксономическое разнообразие нематод смешанного хвойно-мелколиственного леса поймы р. Печора

Таксон	Трофическая группа	Значение по с-р шкале	Горизонт	
			A0	A1
Отряд Monhysterida				
Семейство Monhysteridae				
<i>Eumonhystera</i> *	Б	2	+	
Отряд Aegolaimida				
Семейство Plectidae				
<i>Anaplectus</i>	Б	2	+	+
<i>Wilsonema</i>	Б	2	+	
<i>Plectus</i>	Б	2	+	+
Отряд Rhabditida				
Семейство Teratocephalidae				
<i>Metateratocephalus</i>	Б	3	+	+
<i>Teratocephalus</i>	Б	3	+	+
Семейство Cephalobidae				
<i>Chiloplacus</i>	Б	2	+	+
<i>Acrobeloides</i>	Б	2	+	+
Семейство Panagrolaimidae				
<i>Panagrolaimus</i>	Б	1	+	
Семейство Rhabditidae				
<i>Rhabditis</i>	Б	1	+	+
Отряд Tylenchida				
Семейство Aphelenchoididae				
<i>Aphelenchoides</i>	М	2	+	+

Таксон	Трофическая группа	Значение по с-р шкале	Горизонт	
			A0	A1
Семейство Tylenchidae				
<i>Filenchus</i>	A	2	+	+
<i>Malenchus</i> *	A	2	+	+
<i>Aglenchus</i>	A	2	+	+
<i>Tylenchus</i>	A	2	+	+
<i>Lelenchus</i>	A	2	+	
<i>Coslenchus</i>	A	2	+	+
Семейство Anguinidae				
<i>Ditylenchus</i>	M	2	+	+
Семейство Belonolaimidae				
<i>Tylenchorhynchus</i>	Пр	3	+	+
Семейство Noplolaimidae				
<i>Helicotylenchus</i>	Пр	3	+	+
Семейство Pratylenchidae				
<i>Pratylenchus</i>	Пр	3	+	
<i>Pratylenchoides</i> *	Пр	3	+	+
Семейство Heteroderidae				
<i>Heterodera</i>	Пр	3	+	+
Семейство Tylenchulidae				
<i>Paratylenchus</i>	Пр	3	+	+
Семейство Tylodorinae				
<i>Gracilancia</i> *	Пр	3		+
Отряд Enoplida				
Семейство Alaimidae				
<i>Alaimus</i>	Б	4	+	+
Семейство Oxytominidae				
<i>Bastiania</i>	Б	3	+	
Семейство Pristomatolaimidae				
<i>Pristomatolaimus</i>	Б	3	+	
Семейство Tripylidae				
<i>Tripyla</i>	X	3	+	+
<i>Tobrilus</i>	X	3	+	+
Отряд Dorylaimida				
Семейство Mononchidae				
<i>Clarkus</i>	X	4	+	+
<i>Prionchulus</i>	X	4	+	+
<i>Iotonchus</i> *	X	4	+	+
<i>Mononchus</i>	X	4	+	
<i>Miconchus</i> *	X	4	+	+
Семейство Dorylaimidae				
<i>Mesodorylaimus</i>	П	5	+	
<i>Dorylaimus</i>	П	5		+
Семейство Qudsianematidae				
<i>Eudorylaimus</i>	П	5	+	+
Семейство Aporcelaimidae				
<i>Aporcelaimus</i>	П	5	+	+
<i>Aporcelaimellus</i>	П	5	+	+
Семейство Diphtherophoridae				
<i>Diphtherophora</i> *	M	3	+	+
Общее количество таксонов:			39	32

Примечание. Б – бактериотрофы; М – микотрофы; П – политрофы; А – нематоды, ассоциированные с растениями; Пр – паразиты растений; X – хищники. «+» – наличие представителей нематод; «\*» – роды нематод, впервые обнаруженные в Республике Коми.



**Рис. 1.** Динамика численности нематод в аллювиальной луговой почве пойменного леса долины р. Печора

матод возрастает ко второй половине вегетационного периода (с 26 до 28 родов в гор. А0 и с 16 до 26 родов в гор. А1). Однако динамика их численности несколько отличается в зависимости от генетического горизонта почвы: для лесной подстилки отмечено закономерное снижение численности нематод к концу вегетационного периода, в то время как в гумусоаккумулятивном горизонте зафиксировано два пика численности – в июне и сентябре (рис. 1). Возможно, осенний пик связан

с миграцией нематод в более глубокие слои почвы из лесной подстилки.

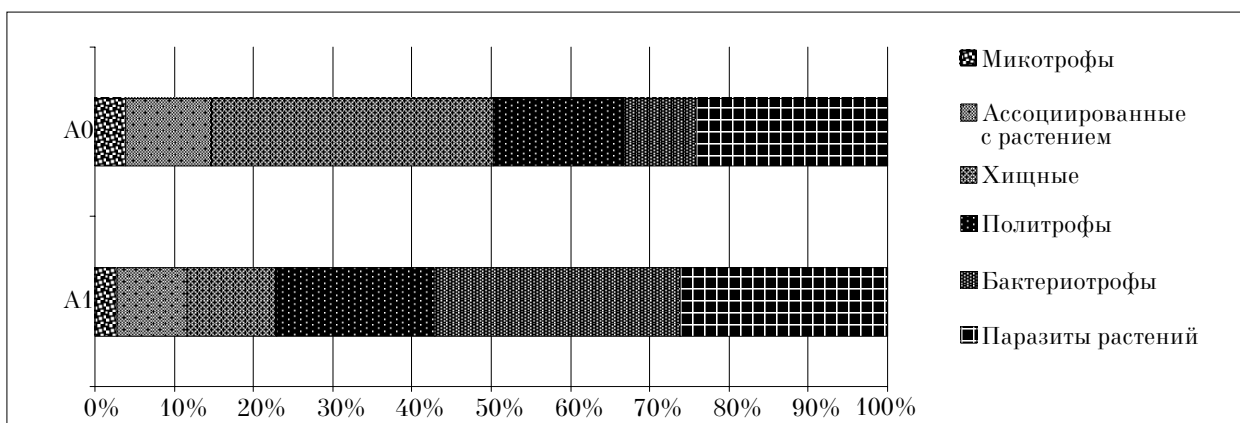
В трофической структуре сообщества нематод отмечены представители 6 экологотрофических групп, наиболее многочисленными из них являются хищники, бактериотрофы и политрофы (табл. 2). Одной из особенностей исследованного нами пойменного биотопа является доминирование хищных нематод, что в принципе не характерно для лесных почв [15, 17]. Как правило, в почвах таёжных экосистем, формирующихся на водоразделах, доминируют микробоядные формы [17]. Преобладание хищных форм в почве пойменного леса может быть связано со сложностью трофических связей [24, 27], обусловленной высокой биологической активностью пойменных почв [18, 28] и достаточно высокой численностью и разнообразием микроартропод в почвах пойменных лесных сообществ таёжной зоны [29].

Как видно из рисунка 2, трофическая структура нематоценозов несколько меняется с глубиной почвенного профиля. В гумусоаккумулятивном горизонте, по сравнению с горизонтом лесной подстилки, возрастает доля паразитических и уменьшается доля хищных форм нематод, что тесно связано с различия-

**Таблица 2**

Трофические группы почвенных нематод пойменного хвойно-мелколиственного леса (экз./100 г почвы)

Трофическая группа	Горизонт	
	А0	А1
Микотрофы	13±40	15±6
Ассоциированные с растением	360±60	48±14
Хищники	1170±170	61±15
Политрофы	550±110	108±14
Бактериотрофы	790±130	140±40
Паразиты растений	290±50	168±29



**Рис. 2.** Соотношение трофических групп нематод в различных горизонтах аллювиальной почвы хвойно-мелколиственного леса поймы р. Печора

Таблица 3

Численность и экологические индексы почвенных нематод смешанного хвойно-мелколиственного леса поймы р. Печора

Показатели	Горизонты	
	A0	A1
MI	3,15±0,08	3,1±0,1
EI	24±6	31±8
SI	92±1	88,6±1,8
CI	38±9	20±8
Численность, экз./100г	3300±400	500±100

ми этих горизонтов по составу пищевых ресурсов. Благодаря хорошо развитому ярусу травянистых растений, корневая система которых сосредоточена в верхней части гумусо-аккумулятивного горизонта, верхние минеральные горизонты аллювиальной почвы способны обеспечить необходимым количеством пищевых ресурсов паразитические формы нематод. В то же время для хищных форм с глубиной наоборот происходит уменьшение доступных пищевых ресурсов, таких, как более мелкие нематоды, коллемболы, грибы и прочие организмы, которые сосредоточены в основном в горизонте лесной подстилки [28, 29]. Высокая численность в составе нематоценозов хищников и политрофов, характеризующихся значениями по с-р шкале в пределах 3-5 баллов, указывает на зрелость данного сообщества и наличие минимального воздействия стрессовых факторов.

Расчёт индекса зрелости (MI) (табл. 3) характеризует сообщество нематод, функционирующее в аллювиальной почве пойменного леса как сукцессионно устоявшееся и не подвергавшееся антропогенному воздействию. Полученные значения хорошо соотносятся с данными

Д. Г. Даниленко [17], L. Hanel [30], полученными для ненарушенных лесных биотопов.

По данным литературы [31], значение индекса (CI) для агроценозов, лугов и лесных биотопов составляет соответственно 18, 24 и 50. Согласно исследованиям Hanel [30], при переходе от лугового биотопа к лесному происходит постепенное увеличение индекса CI, что свидетельствует о постепенной смене бактериального пути разложения органического вещества на грибной и увеличении в сообществе нематод доли микофагов. Близкая картина отмечена нами и в пойме р. Печора (табл. 3), что обусловлено особенностями флористического состава исследуемого биотопа. Величина индекса путей разложения органического вещества (CI) в пищевой сети горизонта лесной подстилки (38±9) свидетельствует о его смещении в сторону грибного разложения, что вполне оправдано, так как лесная подстилка в пойменном лесу представлена опадом как травянистых растений, так и листовыми пластинками берёзы и осины, а также хвоей ели. В горизонте A1 величина индекса CI (20±8) свидетельствует о преобладании бактериального пути разложения, что также вполне закономерно, поскольку

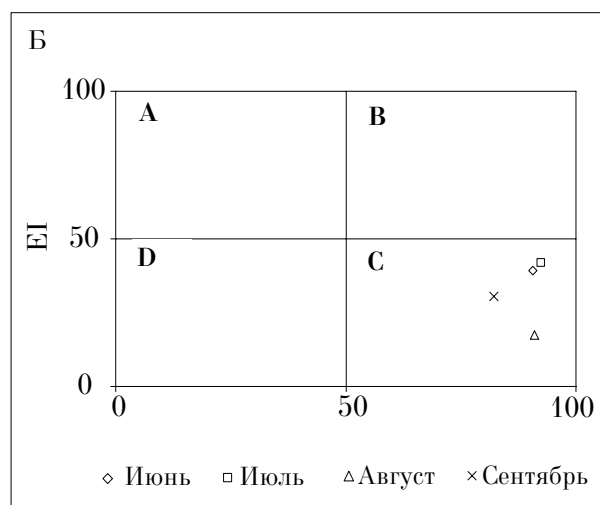
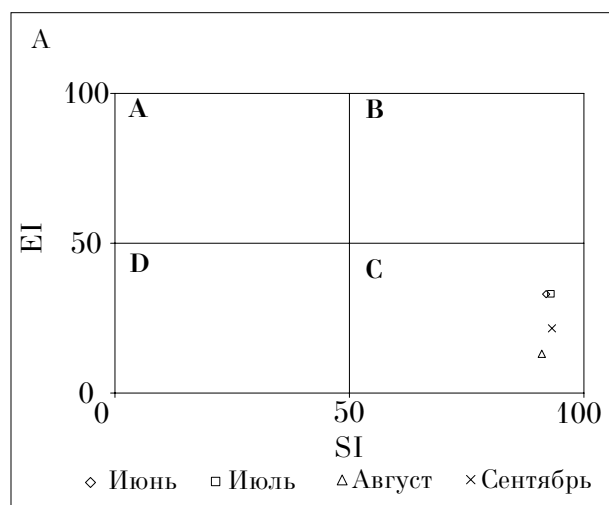


Рис. 3. Фаунистический профиль нематоценозов в почве пойменного хвойно-мелколиственного леса: А – горизонт A0; Б – горизонт A1



ку органическое вещество представлено здесь в первую очередь легкоразлагаемой корневой системой травянистых растений, 1/3 часть которой ежегодно отмирает и включается в процессы минерализации и гумификации [18].

Структурный индекс (SI) для исследованного нами сообщества нематод отличается довольно высокими значениями (табл. 3). Это обусловлено высокой численностью хищников и политрофов в трофической структуре нематоценозов, что предполагает наличие большого количества пищевых связей в экосистеме, более сложную структуру сообщества [27] и соответственно его высокую устойчивость [23].

Значения графически представленных индексов EI и SI (рис. 3) указывают на структурированность пищевой сети (все значения попали в квадрат С) и относительно низкий уровень первичной продукции, что соответствует данным, полученным для лесных биотопов [27].

### Заключение

Таким образом, в результате проведённых исследований установлен таксономический состав нематоценозов аллювиальной луговой почвы пойменного хвойно-мелколиственного леса, сформированного в центральной части пойменной террасы долины среднего течения р. Печора. Показано, что данное сообщество нематод имеет обычный набор родовых таксонов почвенных нематод с типичным вертикальным распределением по горизонтам почвы и высокой долей хищных форм. Комплекс нематод аллювиальной луговой почвы долины р. Печора может быть охарактеризован как сукцессионно устоявшаяся система, функционирующая в условиях отсутствия антропогенного воздействия. Трофическая сеть высоко структурирована, характеризуется наличием большого количества пищевых связей, устойчивостью и относительно низким уровнем первичной продукции. В почвенной пищевой сети пойменной лесной экосистемы наблюдается относительное равновесие между бактериальным и грибным путём первичного разложения органического вещества, с небольшим смещением в сторону бактериального пути в минеральных горизонтах аллювиальной почвы.

### Литература

1. Brussaard L. Biodiversity and ecosystem functioning in soil // *Ambio* 1997. V. 26. № 8. P. 563–570.
2. Goffman Peter M., Bohlen Patrick J. Soil and sediment biodiversity // *BioScience*. 1999. V. 49. № 2. P. 139–148.

3. Стриганова Б.Р. Локомоторная и трофическая активность беспозвоночных как фактор формирования почвенной структуры // *Почвоведение*. 2000. № 10. С. 1247–1254.
4. Черников В.А., Милащенко Н.З., Соколов О.А. Экологическая безопасность и устойчивое развитие // *Устойчивость почв к антропогенному воздействию*. Книга 3. Пуццино: Изд-во ОНТИ ПНЦ РАН, 2001. 202 с.
5. Соловьева Г.И. Экология почвенных нематод. Л.: Наука, 1986. 247 с.
6. Vinciguerra M.T. Role of nematodes in the biological processes of the soil // *Italian Journal of Zoology*. 1979. V. 46. № 4. P. 363–374
7. Ferris H., Venette R.C., Van der Meulen H.R., Lau S.S. Nitrogen mineralization by bacterial-feeding nematodes: verification and measurement // *Plant and Soil*. 1998. V. 203. P. 159–171.
8. Forge T.A., Simard S.W. Trophic structure of nematode communities, microbial biomass, and nitrogen mineralization in soil of forests and clearcuts in the southern interior of British Columbia // *Can. J. Soil Sci.* 2000. V. 80. № 3. P. 401–410.
9. Porazinska Dorota L., Wall Diana H., Virginia Ross A. Population age structure of nematodes in the Antarctic dry valleys: Perspectives on time, space, and habitat suitability // *Arct., Antarct., and Alp. Res.* 2002. V. 34. № 2. P. 159–168.
10. Neher D.A. Role of nematodes in soil health and their use as indicators // *J. Nematol.* 2001. V. 33. P. 161–168.
11. Bongers T. The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition // *Oecologia*. 1990. V. 83. P. 14–19.
12. Yeates G.W. Soil nematodes in terrestrial ecosystems // *J. Nematol.* 1979. V. 11. P. 117–212.
13. Richard D. Bardgett, Roger Cook, Gregor W. Yeates and Crystal S. Denton. The influence of nematodes on below-ground processes in grassland ecosystems // *Plant and Soil*. 1999. V. 212. P. 23–33.
14. Yeates, G.W. Nematode of the Danish beach forest, I. Methods and general analysis. *Oikos*. 1972. V. 23. P. 178–189.
15. Павлюк Л.В. Сравнительный анализ нематофауны берёзового и елового леса Малинского лесничества // *Фауна и экология почвенных беспозвоночных Московской области*. М.: Наука, 1983. С. 20–30.
16. Ruess L. Studies of nematode fauna on an acid forest soil, spatial distribution and extraction // *Nematologica*. 1995. V. 41. P. 229–239.
17. Данеленко Д.Г. Почвенные нематоды подзоны средней тайги Республики Коми // *Фауна и экология беспозвоночных животных европейского Северо-Востока России*. Сыктывкар, 2001. С. 71–78.
18. Добровольский Г.В. Почвы речных пойм центра Русской равнины. М.: Изд-во МГУ, 1968. 296 с.
19. Bayley P.B. Understanding large river-floodplain ecosystems // *Bioscience*. 1995. V. 45. P. 153–158.

20. Добровольский Г.В. Генезис, эволюция и охрана почвенного покрова пойм Нечернозёмной зоны РСФСР // Научные основы оптимизации и воспроизводства плодородия аллювиальных почв Нечернозёмной зоны РСФСР. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 1991. С. 3–14.
21. Yeates, G.W., Bongers, T., De Goede, R.G.M., Freckman, D.W., Georgieva, S.S. Feeding habits in soil nematode families and genera – an outline for soil ecologists // J. Nematol. 1993. V. 25. P. 315–331.
22. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
23. Алалыкина Н.М., Каратаев А.Б., Ходырев Н.Н., Целищева Л.Г. Итоги исследований и инвентаризации почвенных беспозвоночных Кировской области // Проблемы почвенной зоологии: Материалы II (XII) Всероссийского совещания по почвенной зоологии. М.: КМК, 1999. С. 14–15.
24. Ferris H., T. Bongers, de Goede R. G. M. A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept // Applied Soil Ecology. 2001. V. 18. P. 13–29.
25. Груздева Л.И. Видовое разнообразие и структура сообществ почвенных нематод как показатель антропогенной трансформации биогеоценозов // Биоразнообразие наземных и почвенных беспозвоночных на Севере: Тез. докл. междунар. конф. Сыктывкар. 1999. С. 55–56.
26. Armenddriz I., Arpin P. Nematodes and their relationship to forest dynamics: I. Species and trophic groups // Biol. Fertil. Soils. 1996. V. 23. P. 405–413.
27. Ferris H., Matute M.M. Structural and functional succession in the nematode fauna of a soil food web // Applied Soil Ecology. 2003. V. 23. P. 93–110.
28. Лаптева Е.М., Колесникова А.А., Таскаева А.А., Дегтева С.В., Виноградова Ю.А. Разнообразие микро- и мезофауны в аллювиальных лесных почвах средней тайги (на примере долины р. Сысола). Сыктывкар. 2005. 40 с. (Науч. докл. / Коми научный центр УрО РАН; Вып. 479).
29. Таскаева А.А. Коллемболы (Collembola) пойменных сообществ таёжной зоны Республики Коми // Зоологический журнал. 2009. Т. 88. № 9. С. 1055–1063.
30. Hanel L. Soil nematodes in a meadow – spruce forest ecotone // Acta Societatis Zoologica Bohemicae. 1992. V. 56. P. 265–278.
31. Ruess L. Nematode soil faunal analysis of decomposition pathways in different ecosystems // Nematology. 2003. V. 5. P. 179–189.

*Авторы выражают искреннюю благодарность Л.И. Груздевой, гл.н.с Института биологии Карельского научного центра, за помощь в определении таксономической принадлежности нематод.*

*Работа выполнена при финансовой поддержке программы Президиума РАН «Выявление закономерностей формирования биоразнообразия, взаимосвязей макро- и микроорганизмов и их роли в трансформации органического вещества в почвах пойменных лесов европейского Северо-Востока» (Рег. № 09-П-4-1035).*

## Оценка жизнеспособности популяций особо охраняемого вида *Helicopsis striata* Müller (Mollusca, Gastropoda, Pulmonata) в условиях юга Среднерусской возвышенности

© 2011 Э. А. Снегин, к.б.н., доцент, зав. лабораторией, А. А. Сычев, магистрант,  
Белгородский государственный университет,  
e-mail: snegin@bsu.edu.ru

Изучено состояние генофондов девятнадцати популяций особо охраняемого вида *Helicopsis striata* Müller (улитка степная ребристая) в условиях юга Среднерусской возвышенности на основе анализа морфологической и генетической изменчивости, выявляемой методом гель-электрофореза белков. В большинстве изученных групп зафиксировано достоверное снижение уровня гетерозиготности и уменьшение аллельного разнообразия, вызванное как естественными историческими факторами, так и факторами антропогенного происхождения. Рассмотрены генетико-автоматические процессы в популяциях и определены векторы естественного отбора. Проведён расчёт эффективной численности исследуемых групп.

On the basis of analysis of the morphological and genetic variability stated by a method of gel-electrophoresis of proteins, the state of gene pools of nineteen populations of especially protected species *Helicopsis striata* Müller (a ridge steppe snail) in conditions of the south of Mid-Russia Upland is investigated. In the majority of the investigated bunches authentic decrease of the level of heterozygosity and decrease of an allelic diversification caused by natural historical factors as well as by factors of an anthropogenic parentage is found out. The genetic-automatic processes in populations are considered and vectors of natural selection are defined. Calculation of effective number of researched bunches is made.

**Ключевые слова:** особо охраняемый вид, наземный моллюск  
популяционные генофонды, лесостепной ландшафт

**Key words:** especially protected species, terrestrial mollusk,  
population gene pools, a forest-steppe landscape

### Введение

Исследование состояния природных популяций видов, находящихся под охраной, является одним из основных направлений современного биомониторинга различных территорий. Одним из таких видов является *Helicopsis striata* Müller (улитка степная ребристая), занесённый в Красную книгу Белгородской области [1], а также в списки охраняемых видов Польши, Чехии и Словакии [2, 3].

Ареал вида охватывает территорию от Западной и Средней Европы до Восточной Украины, Курской, Белгородской и Воронежской областей [4]. В пределах Среднерусской возвышенности вид обитает на сухих, хорошо прогреваемых склонах балок, как правило, южной экспозиции, с меловой почвой. Период основной активности приходится на апрель–май, а также сентябрь. В это время в местах обитания можно наблюдать массовые скопления моллюсков. Летние месяцы улитки проводят зарывшись в почву.

*H. striata* относится к средиземноморской реликтовой группе ксерофильных моллюсков. В исследованиях по восстановлению истори-

ческого прошлого биоценозов Европы вид используется в качестве индикатора сухих остепнённых экосистем [5]. На территории Среднерусской возвышенности часто является компонентом реликтовых ценозов, называемых «Сниженные Альпы» [6].

Цель работы – оценить состояние популяций *H. striata* на границе его видового ареала в природоохранных целях.

### Материал и методика

Выборки особей из популяций *H. striata* осуществлялись в девятнадцати пунктах юга Среднерусской возвышенности (рис. 1). Описание пунктов сбора приведено в таблице 1. Живых особей и пустые раковины собирали с поверхности почвы и в подстилке на глубине до 5 см. В сырую погоду проводили «кошение» энтомологическим сачком в местах обитания улиток. Определение видовой принадлежности проводили по конхиологическим признакам и половой системе [4]. Измерение раковин осуществляли под бинокуляром МБС-10 при помощи окуляра-микрометра (измеряли только раковины особей, закончивших рост и име-

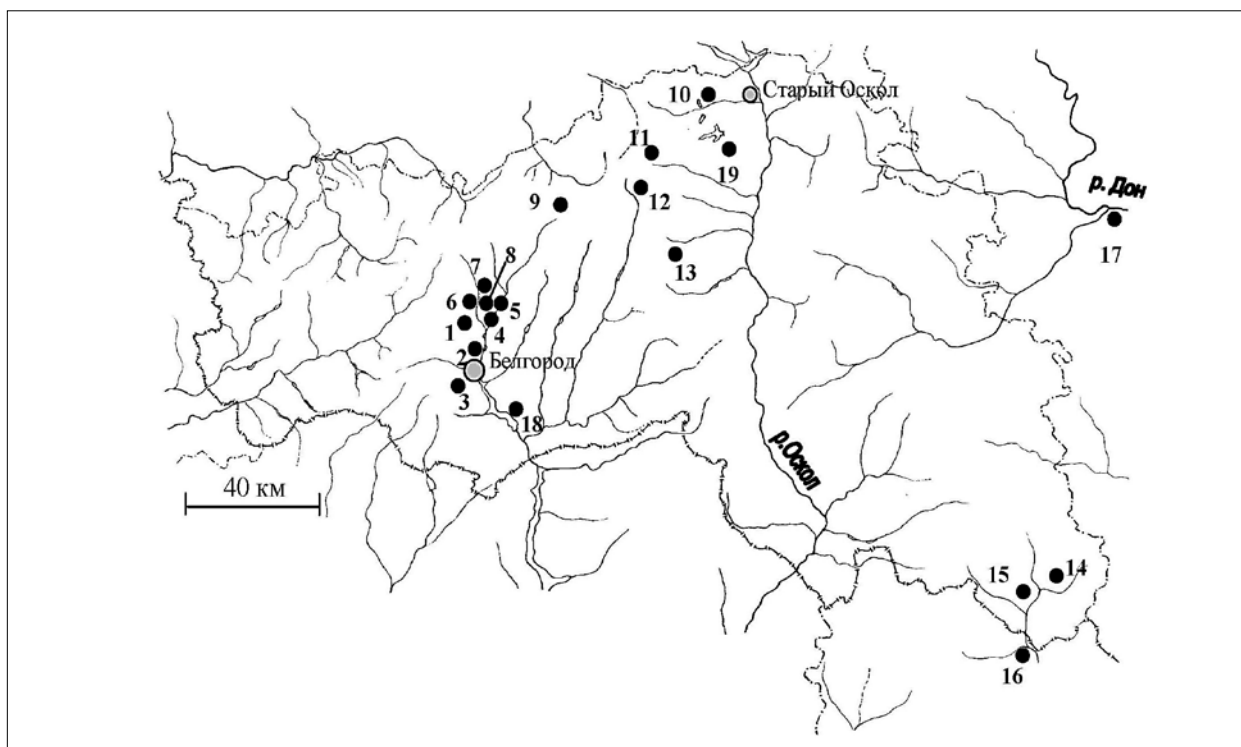


Рис. 1. Район исследования (чёрными точками обозначены пункты сбора моллюсков)

Таблица 1

Описание пунктов сбора

№ пункта	Описание	Координаты
1	«Шопино» – юго-восточный склон правого берега р. Липовый Донец; депрессивные разнотравные луга; меловые почвы.	50°42'20,17" с.ш. 36°35'43,20" в.д.
2	«Белая гора» – окрестности г. Белгорода, юго-западный крутой меловой склон правого берега р. Северский Донец.	50°37'28,66" с.ш. 36°37'15,97" в.д.
3	«Ботанический сад» – окрестности г. Белгорода, территория ботанического сада БелГУ, меловые обнажения.	50°35'30,20" с.ш. 36°32'20,66" в.д.
4	«Петропавловка А» – меловой склон южной экспозиции в месте впадения р. Липовый Донец в р. Северский Донец.	50°41'32,48" с.ш. 36°38'26,51 в.д.
5	«Петропавловка Б» – правый крутой берег р. Северский Донец, юго-западная экспозиция, на месте бывшего мелового карьера.	50°42'16,15" с.ш. 36°39'29,89" в.д.
6	«Терновка» – склон правого берега р. Липовый Донец южной экспозиции; почвы глинистые; растительность обеднённая.	50°44'01,45" с.ш. 36°35'46,02" в.д.
7	«Терновка А» – юго-восточный глинистый склон левого берега р. Липовый Донец рядом с автомобильной дорогой.	50°43'37,58" с.ш. 36°36'44,09" в.д.
8	«Терновка Б» – юго-восточный склон левого берега р. Липовый Донец, почвы меловые, растительность разнотравно-луговая.	50°43'30,75" с.ш. 36°36'58,84" в.д.
9	«Беленихино» – меловой склон левого берега р. Саженьский Донец юго-западной экспозиции; злаково-разнотравная растительность.	50°54'41,87" с.ш. 36°38'21,65" в.д.
10	«Губкин» – территория г. Губкин; склон балки юго-восточной экспозиции с лугово-степной разнотравной растительностью.	51°17'50,56" с.ш. 37°32'11,98" в.д.
11	«Мелавое» – юго-восточный меловой склон балки левого берега р. Орлик; злаковое разнотравье.	51°08'02,93" с.ш. 37°25'05,72" в.д.
12	«Телешовка» – крутой меловой левый берег р. Короча; растительность в депрессивном состоянии из-за перевыпаса скота.	51°02'20,91" с.ш. 37°17'06,22" в.д.
13	«Хмелевое» – нижние участки меловых склонов южной экспозиции в верховьях бассейна р. Халань.	50°53'08,29" с.ш. 37°27'38,97" в.д.

Продолжение таблицы 1

14	«Нагольное» – меловые склоны южной экспозиции правого берега р. Сарма; степная растительность; природный парк «Айдарский».	49°58'43,61" с.ш., 38°57'33,69" в.д.
15	«Калужный яр» – меловая балка, выходящая в пойму реки Айдар, территория природного парка «Айдарский».	49°57'02,88" с.ш., 38°53'49,32" в.д.
16	«Крейдяная гора» – восточный меловой склон правого берега р. Айдар; окрестности с. Шаровка, Луганская обл., Украина.	49°49'54,75" с.ш., 38°53'47,71" в.д.
17	«Дивногорье» – правый берег р. Дон северной экспозиции; территория природного парка «Дивногорье», Воронежская область.	50°59'14,52" с.ш. 39°20'00,50" в.д.
18	«Ржавец» – участок железнодорожной насыпи; пологий берег Белгородского водохранилища.	50°59'14,52" с.ш. 39°20'00,50" в.д.
19	«Ямская степь» – юго-восточный меловой склон со степной растительностью; окрестности заповедного участка «Ямская степь».	51°40'07,54" с.ш., 37°38'23,18" в.д.

ющих отворот устья). Схема промеров представлена на рисунке 2. Нами были выбраны наиболее часто используемые в малакологии промеры раковины. Кроме того, рассчитывали отношение ширины раковины к её высоте ( $ШР/ВР$ ). Дополнительно вычисляли объём раковины ( $V=ШР^2 \times ВР/2$ ), площадь устья ( $S=3,145 \times ВУ \times ШУ/4$ ) и отношение этих двух параметров. Также учитывали композиции коричневых продольных полос на раковине.

Экстракцию водорастворимых белков проводили из ретрактора ноги моллюсков путём замораживания при  $-80^\circ\text{C}$  с последующим оттаиванием и механическим измельчением тefлоновым гомогенизатором в 0,05 М трис-НСl-буфере (рН 6,7). Диск-электрофорез изоферментов проводился в 10% полиакриламидном геле. Окрашивание блоков на выявление неспецифических эстераз проводили в субстратной смеси: трис-НСl (рН 7,4),  $\alpha$ -нафтилацетат, прочный красный TR; для выявления суперок-

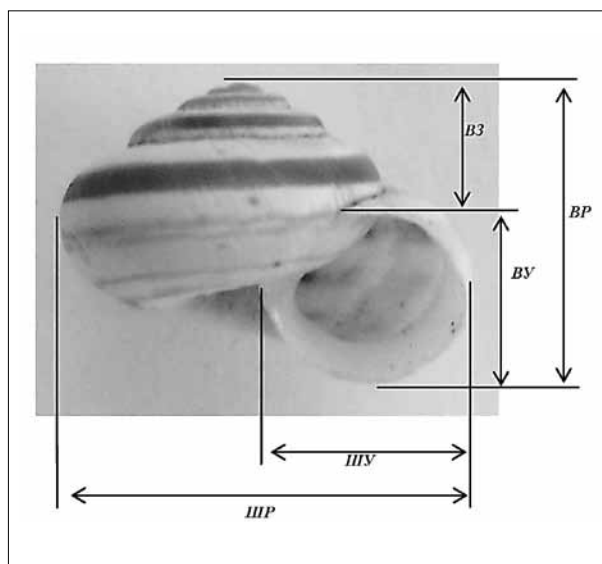


Рис. 2. Раковина *H. striata* (промеры: ВР – высота раковины, ШР – ширина раковины, ВЗ – высота завитка, ВУ – высота устья, ШУ – ширина устья)

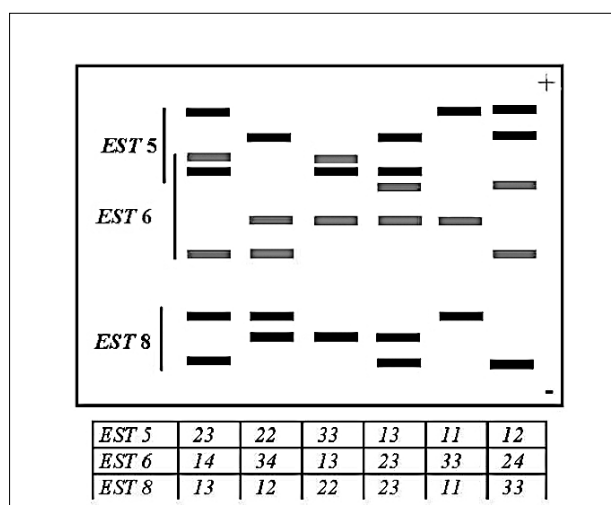


Рис. 3. Зоны активности трёх локусов эстераз и соответствующие им генотипы *H. striata* (генотипы EST6-11, EST6-22, EST6-44, EST6-24 на схеме отсутствуют)

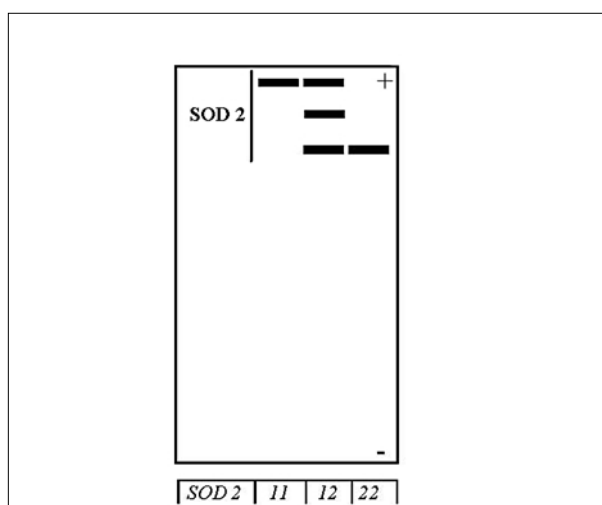


Рис. 4. Зона активности локуса супероксиддисмутазы и соответствующие им генотипы *H. striata*

Таблица 2

Средние значения конхиологических признаков раковины *H. striata* в различных пунктах сбора

Пункт	N	ЧО	ШР	ВР	ВЗ	ШУ	ВУ	S <sub>м.м</sub> <sup>2</sup>	V <sub>м.м</sub> <sup>3</sup>	ВР/ШР	S/V
1	96	5,0±0,02	10,2±0,2	6,8±0,1	2,5±0,1	4,7±0,1	4,8±0,1	17,7±0,5	360,5±16,7	0,663±0,007	0,050±0,001
2	100	5,2±0,06	10,2±0,3	7,1±0,2	2,8±0,1	4,6±0,2	5,1±0,1	18,7±1,1	403,2±40,7	0,706±0,009	0,050±0,002
3	44	5,1±0,1	8,8±0,3	6,1±0,2	1,7±0,2	4,3±0,1	4,2±0,1	14,7±0,9	244,6±22,3	0,704±0,012	0,062±0,002
4	111	5,1±0,03	10,2±0,2	6,9±0,1	2,6±0,1	4,8±0,1	4,8±0,1	15,1±0,2	370,4±19,3	0,682±0,006	0,051±0,002
5	98	5,0±0,02	10,0±0,2	7,0±0,1	2,6±0,1	4,8±0,1	4,8±0,1	18,1±0,6	359,5±19,1	0,701±0,007	0,053±0,002
6	97	5,1±0,04	9,9±0,2	6,4±0,2	2,5±0,1	4,5±0,1	4,4±0,1	16,0±0,6	326,4±18,7	0,653±0,007	0,051±0,002
7	120	5,1±0,03	9,8±0,2	6,4±0,1	2,2±0,1	4,5±0,1	4,4±0,1	14,1±0,2	319,9±14,8	0,655±0,006	0,051±0,001
8	80	5,0	9,3±0,2	6,2±0,1	2,3±0,1	4,3±0,1	4,3±0,1	13,6±0,3	281,1±17,7	0,669±0,007	0,055±0,002
9	96	5,2±0,06	10,0±0,2	7,3±0,2	2,9±0,1	4,7±0,1	4,7±0,1	17,6±0,8	384,3±28,4	0,732±0,008	0,049±0,001
10	66	5,1±0,05	10,3±0,2	7,2±0,3	2,7±0,1	5,0±0,1	5,0±0,1	19,7±0,7	391,7±29,0	0,703±0,021	0,058±0,013
11	94	5,1±0,02	10,6±0,1	7,6±0,1	2,9±0,1	5,0±0,1	5,1±0,1	20,3±0,5	436,0±13,8	0,722±0,005	0,047±0,001
12	134	5,2±0,04	10,8±0,2	7,8±0,1	2,9±0,1	5,1±0,1	5,2±0,1	21,0±0,5	463,9±18,8	0,723±0,004	0,047±0,001
13	21	5,3±0,1	10,9±0,4	7,9±0,3	1,9±0,2	5,2±0,1	5,2±0,1	21,6±1,3	486,0±50,3	0,728±0,015	0,046±0,003
14	30	5,0±0,1	7,8±0,2	5,2±0,2	1,5±0,1	3,8±0,1	3,8±0,1	11,5±0,7	163,8±16,9	0,678±0,009	0,073±0,003
15	98	5,0±0,02	8,3±0,1	5,6±0,1	1,9±0,1	4,4±0,7	4,0±0,1	13,9±2,4	198,3±9,6	0,671±0,009	0,073±0,014
16	36	5,1±0,09	9,7±0,4	6,1±0,3	2,1±0,2	4,5±0,1	4,3±0,1	15,4±1,0	296,2±37,1	0,627±0,018	0,056±0,005
17	58	5,0±0,02	8,7±0,2	6,0±0,1	2,5±0,1	4,1±0,1	3,9±0,1	12,7±0,7	230,3±13,3	0,694±0,011	0,056±0,002
18	21	4,9±0,1	7,8±0,2	5,6±0,2	1,9±0,2	4,0±0,1	3,8±0,1	12,1±0,6	174,3±13,5	0,712±0,016	0,071±0,003
19	77	5,0	9,4±0,2	6,4±0,2	2,6±0,1	4,3±0,1	4,1±0,1	14,7±0,6	292,3±20,7	0,681±0,011	0,051±0,002

Примечание: N – количество промеренных особей; ЧО – число оборотов. Остальные обозначения приведены в тексте. Приведены абсолютные значения признаков в миллиметрах и их доверительный интервал.

сиддисмутаза – калий-фосфатный буфер (рН 7,8), нитросиний тетразолий, феназин метасульфат. В качестве генетических маркеров использовались выявленные и диагностированные нами три локуса неспецифических мономерных эстераз (*EST5*, *EST6*, *EST8*) и один локус димерной супероксиддисмутазы (*SOD2*) (рис. 3, 4).

Сборы проводились в период с 2005-го по 2010 год. За весь период наблюдения было исследовано 1477 раковин и 1025 живых особей.

Обработка полученных данных проводилась с использованием программ GenAlEx и TFGPA [7, 8].

### Результаты и обсуждение

Результаты морфометрического анализа приведены в таблице 2. Согласно полученным данным наибольшие размеры раковины отмечены в северо-восточной части района исследования (пункты 10, 11, 12, 13), находящейся в зоне влияния Стойленского и Лебединского горно-обогатительных комбинатов. В пунктах 12, 13, а также в пункте 2 нами были найдены несколько крупных особей *H. striata*, ширина раковины которых превышала 16 мм, при известной максимальной для вида 12 мм. В этих же популяциях отмечены минимальные значения отношения площади устья к объёму раковины (*S/V*). Возможным объяснением этого явления может

служить реакция животных на ксерофитизацию биотопов в этом антропогенно-изменённом районе, вызванная разряжением растительных сообществ. По мнению ряда авторов, в аридных зонах увеличение объёма тела моллюсков увеличивает запасы воды [9]. Уменьшение относительной площади устья призвано сократить количество испаряемой жидкости.

Нужно отметить, что в этом районе фиксируется повышенная магнитная активность (территория относится к району Курской магнитной аномалии). Вероятно, это явление может вызывать определённые генетические и фенотипические сдвиги в структуре популяций.

Проведённый однофакторный дисперсионный анализ морфометрических признаков показал значительную дифференциацию популяций в условиях лесостепного ландшафта (табл. 3). При этом весьма примечательно, что больший вклад в межпопуляционную изменчивость популяций внёс индекс ВР/ШР, отражающий у большинства видов моллюсков видоспецифичную конституцию раковины. Данный факт, вероятно, косвенно свидетельствует о длительной и сильной изолированности популяций друг от друга, а также о своеобразии микроклиматических условий различных биотопов, что привело к формированию оригинальных фенотипов изучаемых групп.

Оригинальность исследуемых популяций подтверждает также изучение рисунка на ра-

Таблица 3

Результаты однофакторного дисперсионного анализа морфометрических признаков

Признак	Изменчивость	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Средний квадрат	F
ШР	Между группами	853,8	18	47,4	49,6*
	Внутри групп	1395,3	1457	0,9	
ВР	Между группами	673,8	18	37,4	69,4*
	Внутри групп	785,4	1457	0,5	
ВУ	Между группами	181,6	18	10,1	8,4*
	Внутри групп	1741,1	1457	1,2	
ШУ	Между группами	132,9	18	7,4	6,2*
	Внутри групп	1746,3	1457	1,2	
ВЗ	Между группами	204,2	18	11,3	48,3*
	Внутри групп	342,3	1457	0,2	
ВР/ШР	Между группами	1,1	18	0,06	35,2*
	Внутри групп	2,5	1457	0,002	
V	Между группами	9508644,2	18	528258,0	47,7*
	Внутри групп	16180928,3	1457	11105,6	
S	Между группами	9902,0	18	550,1	27,5*
	Внутри групп	29153,2	1457	20,0	
S/V	Между группами	0,079	18	0,0044	8,1*
	Внутри групп	0,787	1457	0,0005	

Примечание: F – критерий Фишера, \* – достоверные отличия при  $P > 0,95$ .

ковине, представленного продольными коричневыми полосами различной ширины. Число полос на раковинах варьирует от 0 до 12. Общее количество вариантов рисунка для района исследования составило 157. Но, несмотря на такое обилие фенотипов, в отдельных популяциях чаще всего встречаются несколько оригинальных комбинаций полос, что определяет своеобразный фенотип группы. По данным показателя внутривидового разнообразия ( $H$ ) [10], приведённым в таблице 4, наибольшего разнообразия достигает популяция «Белая гора», немного уступает ей популяция «Калюжный яр». Наименьшее разнообразие по рисунку раковины отмечено в пунктах 5, 10, 11, 12, 13, где в популяциях присутствуют два или три фена. Максимальные значения доли редких форм ( $h$ ) для района исследования зафиксированы в пунктах 1, 5, 6, 8, 9.

Результаты фенотипического анализа во многом подтверждаются данными о состоянии генофондов изучаемых групп на основе изоферментного анализа. Частоты аллелей и уровни гетерозиготности по используемым локусам представлены в таблице 5. Согласно этим данным в 22,4 % случаев отмечается достоверный ( $P \geq 0,05$ ) дефицит гетерозиготных фенотипов, в 35,5% случаев отмечена полная гомозиготность по одному из аллелей. Досто-

верность дефицита гетерозигот оценивалась по формуле  $\chi^2 = F^2 N(k-1)$ ,  $df = k-1$ , где  $F$  – коэффициент инбридинга,  $N$  – объем выборки,  $k$  – число аллелей по данному локусу [41]. Достоверный избыток гетерозигот зафиксирован только в одном случае (пункт 3, *EST8*). Наименьшие уровни генетической изменчивости, в среднем по всем локусам, зафиксированы в пунктах 12, 14 и 19, в этих же пунктах отмечены наиболее высокие значения коэффициента инбридинга (табл. 6). В пунктах 10 и 11 наблюдается полная гомозиготность по всем локусам. При этом нужно отметить, что уровень гетерозиготности в различных популяциях неодинаков по разным локусам. Гетерозиготные варианты чаще всего встречаются в локусах *EST6* ( $H_0 = 0,328$ ) и *EST8* ( $H_0 = 0,324$ ). Именно эти локусы вносят наибольший вклад в межпопуляционное разнообразие, оцениваемое по коэффициенту инбридинга *Fst* (табл. 7).

Результаты кластерного анализа на основе генетических расстояний [12] невзвешенным парногрупповым методом (UPGMA) представлены на рисунке 5. Анализ показывает весьма пёструю картину распределения популяций по группам. При этом географическое положение популяций, как и в случае с раковинными фенотипами, не оказывает решающего влияния на схожесть в соотношении частот аллелей и их комбинаций. Так, например, некоторые популяции, обитающие у истоков р. Северский Донец (пункты с 1 по 8), несмотря на близкое пространственное расположение, оказались, согласно схеме, в разных кластерах. Точно такую же картину мы наблюдаем и в отношении популяций, обитающих в бассейне р. Айдар (пункты 14, 15, 16). Об отклонении от панмиксии из-за подразделённости популяций говорят также высокие значения коэффициентов инбридинга *Fst* и *Fit* (табл. 7). Всё это подтверждает выдвинутый нами ранее тезис о нарушении каналов миграции между изучаемыми группами *H. striata* и их длительной изолированности друг от друга в условиях лесостепи [13]. С другой стороны, популяции улиток, обитающие в условиях нарушенной среды, обусловленной возможным влиянием горно-обогатительных комбинатов (пункты 10, 11, 12, 19), образовали единый кластер, что свидетельствует о сходном здесь векторе естественного отбора. По степени приближения к этому кластеру можно отчасти судить о степени изменения среды и состоянии генофондов других популяций. Ранее аналогичную картину в районе исследования мы получили для популяционной структуры других индикаторных видов наземных мол-

**Таблица 4**  
Показатель внутривидового разнообразия и доля редких морф по рисунку раковины

Популяция	$H \pm S_H$	$h \pm S_h$
1. «Шопоино»	10,5±1,3	0,42±0,07
2. «Белая гора»	36,1±1,5	0,18±0,03
3. «Ботанический сад»	10,3±0,9	0,21±0,07
4. «Петропавловка А»	16,5±0,8	0,09±0,05
5. «Петропавловка В»	5,0±0,6	0,45±0,07
6. «Терновка»	14,1±1,5	0,5±0,05
7. «Терновка А»	17,6±0,9	0,07±0,04
8. «Терновка Б»	15,4±1,6	0,41±0,06
9. «Беленихино»	9,6±1,8	0,44±0,06
10. «Губкин»	4,4±0,3	0,33±0,06
11. «Мелавое»	4,7±0,2	0,07±0,05
12. «Телешовка»	5,9±0,4	0,16±0,05
13. «Хмелевое»	6,7±0,8	0,26±0,08
14. «Нагольное»	8,8±0,6	0,3±0,06
15. «Калюжный яр»	20,2±0,8	0,16±0,03
16. «Кредяная гора»	15,4±0,9	0,19±0,05
17. «Ржавец»	17,3±1,1	0,21±0,05
18. «Дивногорье»	10,6±0,9	0,39±0,07
19. «Ямская степь»	13,5±0,5	0,1±0,03



Таблица 5

Частоты аллелей и уровни гетерозиготности локусов в популяциях *H. striata*

Локус	Аллели и показатели	Популяции																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
EST5	1	0,100	0,230	0,161	0,056	0,031	0,031	0,025	0,127	0,027	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,725	0,218	0,160	0,000
	2	0,300	0,421	0,000	0,097	0,112	0,188	0,550	0,329	0,351	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,069	0,027	0,043	0,000
	3	0,600	0,348	0,839	0,847	0,857	0,781	0,425	0,544	0,622	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,206	0,755	0,798	1,000
	H <sub>0</sub>	0,450	0,607	0,323	0,250	0,224	0,344	0,563	0,519	0,459	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,325	0,164	0,340	0,000
	H <sub>e</sub>	0,540	0,648	0,271	0,270	0,252	0,354	0,516	0,579	0,489	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,427	0,382	0,336	0,000
	F	0,167	0,064	-0,192	0,073	0,108	0,028	-0,090	0,104	0,061	-	-	-	-	-	-	0,239	0,572	-0,013	-
EST6	1	0,288	0,860	0,468	0,167	0,418	0,016	0,156	0,063	0,297	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,027	0,691	0,000
	2	0,388	0,140	0,097	0,375	0,173	0,156	0,269	0,171	0,527	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,013	0,018	0,309	0,000
	3	0,200	0,000	0,435	0,292	0,367	0,745	0,369	0,734	0,155	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,988	0,988	0,609	0,000	0,895
	4	0,125	0,000	0,000	0,167	0,041	0,083	0,206	0,032	0,020	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	0,345	0,000	0,105
	H <sub>0</sub>	0,400	0,101	0,226	0,611	0,408	0,281	0,300	0,215	0,365	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,026	0,455	0,234	0,211
	H <sub>e</sub>	0,712	0,241	0,582	0,719	0,658	0,414	0,725	0,427	0,609	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,025	0,509	0,427	0,188
EST8	F	0,438	0,581	0,612	0,150	0,380	0,320	0,586	0,496	0,401	-	-	-	-	-	-	-0,013	0,106	0,451	-0,118
	1	0,225	0,753	0,403	0,375	0,082	0,161	0,244	0,146	0,426	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,531	0,036	0,181	0,000
	2	0,388	0,174	0,597	0,444	0,561	0,432	0,419	0,184	0,149	1,000	1,000	0,934	0,000	1,000	1,000	0,469	0,018	0,787	1,000
	3	0,388	0,073	0,000	0,181	0,357	0,406	0,338	0,671	0,426	0,000	0,000	0,066	1,000	0,000	0,000	0,000	0,945	0,032	0,000
	H <sub>0</sub>	0,450	0,157	0,742	0,444	0,449	0,208	0,525	0,380	0,527	0,000	0,000	0,132	0,000	0,000	0,000	0,488	0,036	0,426	0,000
	H <sub>e</sub>	0,649	0,398	0,481	0,629	0,551	0,622	0,651	0,495	0,616	0,000	0,000	0,123	0,000	0,000	0,000	0,498	0,104	0,347	0,000
SOD2	F	0,307	0,604	-0,542	0,294	0,185	0,665	0,194	0,233	0,144	-	-	-0,070	-	-	-	0,021	0,652	-0,228	-
	1	0,838	0,596	0,613	0,792	0,806	0,849	0,931	0,861	0,838	1,000	1,000	1,000	1,000	0,975	1,000	0,981	1,000	1,000	1,000
	2	0,163	0,404	0,387	0,208	0,194	0,151	0,069	0,139	0,162	0,000	0,000	0,000	0,000	0,025	0,000	0,019	0,000	0,000	0,000
	H <sub>0</sub>	0,325	0,472	0,452	0,361	0,306	0,240	0,113	0,278	0,270	0,000	0,000	0,000	0,000	0,050	0,000	0,038	0,000	0,000	0,000
	H <sub>e</sub>	0,272	0,482	0,475	0,330	0,313	0,256	0,128	0,240	0,272	0,000	0,000	0,000	0,000	0,049	0,000	0,037	0,000	0,000	0,000
	F	0,194	0,020	0,048	-0,095	0,021	0,066	0,121	-0,162	0,005	-	-	-	-	-0,026	-	-0,019	-	-	-
N	40	89	31	36	49	96	80	79	74	55	35	38	23	40	40	80	55	47	38	38

Примечание: H<sub>0</sub> – средняя наблюдаемая гетерозиготность; H<sub>e</sub> – средняя ожидаемая гетерозиготность; F – коэффициент инбридинга (проверк обозначает невозможность вычисления по мономорфному локусу).

Таблица 6

Показатели генетической изменчивости и значения эффективной численности в изучаемых популяциях *H. striata*

Популяция	<i>N</i>	<i>P</i> %	<i>A<sub>e</sub></i>	<i>I</i>	$\mu$	<i>H<sub>o</sub></i>	<i>H<sub>e</sub></i>	<i>F</i>	<i>N<sub>e</sub></i>	<i>N<sub>e</sub>/N</i>
1	40	100,0	2,466	0,930	2,8	0,406	0,543	0,179	33,9	0,848
2	89	100,0	1,937	0,715	2,3	0,334	0,442	0,317	67,6	0,759
3	31	100,0	1,899	0,682	2,1	0,435	0,452	-0,018	31,0	1,0
4	36	100,0	2,279	0,850	2,7	0,417	0,487	0,105	32,6	0,905
5	49	100,0	1,986	0,760	2,5	0,347	0,443	0,173	41,8	0,852
6	96	100,0	1,811	0,711	2,4	0,268	0,411	0,270	75,6	0,787
7	80	100,0	2,429	0,862	2,7	0,375	0,505	0,203	66,5	0,831
8	79	100,0	1,854	0,759	2,5	0,348	0,435	0,168	67,6	0,856
9	74	100,0	2,123	0,820	2,6	0,405	0,496	0,153	64,2	0,867
10	55	0,0	1,0	0,0	1,0	0,000	0,000	-	27,5	0,5
11	35	0,0	1,0	0,0	1,0	0,000	0,000	-	17,5	0,5
12	38	25,0	1,035	0,061	1,1	0,033	0,031	0,732	21,9	0,577
13	23	0,0	1,0	0,0	1,0	0,000	0,000	-	11,5	0,5
14	40	25,0	1,013	0,029	1,1	0,013	0,012	0,744	22,9	0,573
15	40	0,0	1,0	0,0	1,0	0,000	0,000	-	20,0	0,5
16	80	100,0	1,450	0,399	1,7	0,219	0,247	0,057	75,7	0,946
17	55	75,0	1,443	0,432	1,9	0,164	0,249	0,583	34,7	0,631
18	47	75,0	1,445	0,458	1,8	0,250	0,277	0,303	36,1	0,767
19	38	25,0	1,058	0,084	1,2	0,053	0,047	0,721	22,1	0,581

Примечание: *P* – процент полиморфных локусов; *A<sub>e</sub>* – среднее эффективное число аллелей на локус;  $\mu$  – среднее число фенотипов; *I* – индекс Шеннона; *N<sub>e</sub>* – эффективная численность (показатель  $\mu$  оценен по Животовскому [10]).

Таблица 7

Значения полокусных значений гетерозиготности и коэффициентов инбридинга в изучаемых популяциях *H. striata*

Оцениваемые параметры	Локусы				Среднее
	<i>EST5</i>	<i>EST6</i>	<i>EST8</i>	<i>SOD2</i>	
<i>H<sub>o</sub></i>	0,267	0,328	0,324	0,150	0,267
<i>H<sub>e</sub></i>	0,240	0,202	0,261	0,153	0,214
<i>F<sub>is</sub></i>	0,098	0,385	0,195	-0,018	0,165
<i>F<sub>it</sub></i>	0,369	0,692	0,557	0,159	0,444
<i>F<sub>st</sub></i>	0,300	0,499	0,450	0,174	0,356

Примечание: *F<sub>it</sub>* – коэффициент инбридинга особи относительно большой популяции; *F<sub>is</sub>* – коэффициент инбридинга особи относительно субпопуляции; *F<sub>st</sub>* – коэффициент инбридинга субпопуляции относительно большой популяции.

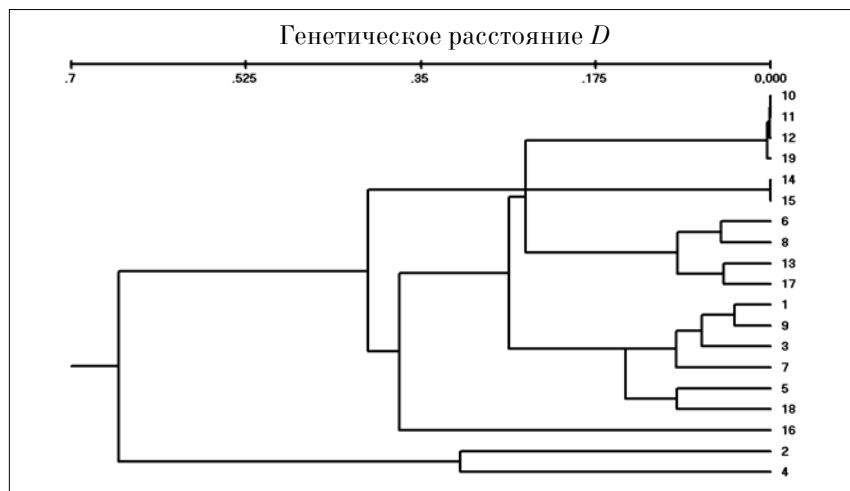


Рис. 5. Дендрограмма генетических расстояний по Неи [13] (UPGMA)

люсков *Bradybaena fruticum* Müll и *Chondrula tridens* Müller [14, 15].

Вместе с тем нужно отметить, что современная генетическая и фенотипическая структура популяций во многом определяется не только современными факторами, но и историческими предпосылками, а также особенностями лесостепного ландшафта, который вносит определённые коррективы в действие различных внешних факторов, включая факторы антропогенного происхождения. Так, группа «Ямская степь» (пункт 19), находящаяся в непосредственной близости от территории горнообогатительных комбинатов, достоверно отличается по размеру раковины от близлежащих популяций. Причем эта оригинальность прослеживается и в отношении окрасочных признаков раковины. Причиной тому, вероятно, может служить исходный генофонд этой группы, сформировавшийся при освоении этого биотопа, а также юго-восточная экспозиция склона, которая препятствует оседанию здесь промышленных выбросов (он обращен в другую сторону от комбинатов). Косвенно об этом свидетельствует химический анализ раковин моллюсков, проведённый нами здесь ранее [16].

Кроме того, наблюдаемое увеличение степени гомозиготности в различных популяциях может являться следствием не только стохастических процессов, вызванных «эффектом бутылочного горлышка» или «эффектом основателя», а также реакцией группы на внезапно возникшую изоляцию в ходе распашки территории, строительства дорог и т. д. Такие действия со стороны человека могли спровоцировать так называемый эффект «генетической революции», который описан для узколокальных изолированных групп [17]. Согласно данной гипотезе, в условиях изоляции, т. е. в условиях, в которых сегодня находится большинство изучаемых популяций региона, селективную ценность получили гены, которые особенно жизнеспособны в гомозиготном состоянии и редки в открытых популяциях из-за доминирования в них так называемых «хорошо смешивающихся генов». Попадая в условия иной генетической среды так называемые «солисты» оказались в более выгодном положении. Причем, по мнению Майра, этот процесс мог затронуть одновременно большое количество локусов. Такими «революционными» аллелями в изучаемых популяциях, возможно, являются *EST5-3*, *EST6-3*, *EST8-2*, *SOD2-1*. Именно эти аллели вносят наибольший вклад в уровень гомозиготности (табл. 5). Можно предположить, что доминирование в ряде популяций района исследования этих аллелей являет-

ся адаптивной реакцией вида на существование в условиях урбанизации.

В заключении нами была рассчитана эффективная численность исследуемых групп улиток. Она рассчитывалась по формуле, учитывающей уровень инбридинга в популяции [12]:

$$Ne = \frac{N}{1 + F}$$

где  $Ne$  – эффективная численность,  $N$  – численность особей в группе,  $F$  – коэффициент инбридинга.

Результаты расчётов приведены в таблице 6 (в мономорфных группах при расчёте  $Ne$  значение  $F$  принималось равным единице). Ввиду того, что определение общей численности особей в исследуемых популяциях связано с определенными трудностями (из-за неравномерного выхода улиток на поверхность), для получения сопоставимых данных мы вычислили отношение эффективного размера выборки к её общему объему. В дальнейшем полученные индексы можно будет использовать для вычисления  $Ne$  в больших популяциях, когда их общая численность будет определена. Согласно полученным данным соотношение  $Ne/N$  в среднем равно  $0,72 \pm 0,08$ , что укладывается в общий диапазон доли  $Ne$ , предложенный Кроу, Мортонем и Кимурой [18, 19]. Авторы определили, что для большинства организмов доля  $Ne$  составляет в среднем 0,75, а для многих популяций человека лежит в диапазоне 0,69-0,95. Однако в ряде изучаемых нами групп (10, 11, 12, 13, 14, 19) это отношение равно или приближается к минимальному значению для предложенной формулы (0,5).

Ещё меньшие значения  $Ne$  были получены нами при расчёте эффективной численности с учётом особенностей биологии размножения изучаемого вида, для чего использовали формулу вычисления  $Ne$  для животных гермафродитов [19]:

$$Ne = \frac{4N-2}{V+2} \quad V = \frac{\sum (k_i - k)^2}{N}$$

где  $N$  – численность половозрелых особей в популяции,  $V$  – дисперсия индивидуальной плодовитости,  $k_i$  – плодовитость отдельной особи,  $k$  – средняя плодовитость.

В ходе проведённого эксперимента, где спаривающиеся в природе особи были помещены в террариум, нами получены данные по тридцати четырём кладкам разновозрастных особей (табл. 8).

Исходя из этих результатов, размер кладки в среднем равен 19,9 яйца, а дисперсия ин-

Количество яиц в кладке в разновозрастных группах *H. striata*

Число оборотов на раковине	5,25	5	4,75	4,5	4,25
Количество яиц в кладке	17, 19, 28	19, 23, 30, 27, 31, 28, 35, 20	15, 13, 39, 33, 27, 47	11, 12, 13, 9, 12, 6, 21, 14, 27, 7	8, 10, 6, 8, 7, 8, 17
Среднее	21,3	26,6	29,0	13,2	9,1
V	22,9	27,2	149,3	39,7	12,7

Примечание: условный возраст определяли по числу оборотов на раковине, V – дисперсия индивидуальной плодовитости.

дивидуальной плодовитости – 50,4 (результат получен при сопоставлении средних показателей по группам разновозрастных особей). При этом эффективная численность популяции составила лишь 7,5% от общей численности половозрелых особей ( $N_e/N = 0,075$ ).

### Заключение

Исходя из приведённых данных, нельзя дать однозначного ответа об уровне жизнеспособности изучаемых популяций. Наблюдаемую нами мономорфность в ряде групп с одной стороны, можно расценивать как фактор, уменьшающий жизненный потенциал вида, но, с другой стороны, это, вероятно, является адаптивной реакцией улиток на обитание в условиях урбанизированного ландшафта. Вместе с тем низкий уровень эффективной численности, вызванный большой дисперсией индивидуальной плодовитости, вызывает определенные опасения за дальнейшую судьбу популяций *H. striata*, существующих на границе своего видового ареала.

### Литература

1. Красная книга Белгородской области. Редкие и исчезающие растения, грибы, лишайники и животные. Белгород: 2004. 532 с.
2. Ložek V. Z červené knihy našich měkkýšů – suchomilka *Helicopsis striata* // Živa Academia Praha. 1980. V. 28(6). 223 p.
3. Stepczak K. Aktualny stan występowania *Helicopsis striata* (O.F. Müller, 1774) w dolinie Odry (Mollusca: Gastropoda) w Polsce // Bad. Fizjogr. Pol. Zach. 1999. V. 46. P. 7–21.
4. Шилейко А.А. Наземные моллюски надсемейства Helicoidea. Фауна СССР. Моллюски. Л.: Наука, 1978. Т.3. Вып. 6. 384 с.
5. Sparks B. W. The former occurrence of both *Helicella striata* (Müller) and *H. geyeri* (Soós) in England // Journal of Conchology. 1953. V. 23. P. 372–378.
6. Снегин Э.А. Использование видов наземных моллюсков в качестве индикаторов реликтовых ценозов // Вестник Житомирского педагогического университета. 2002. Вып. 10. С.128–129.
7. Peakall R., Smouse P. E. GenAlEx V5: Genetic Analysis in Excel. Population genetic software for teaching

and research. Australian National University, Canberra, Australia. 2001. <http://www.anu.edu.au/BoZo/GenAlEx/>.

8. Miller M.P. Tools for population genetic analyses (TFPGA) 1.3. A Windows program for the analysis of allozyme and molecular population genetic data. Department of Biological Sciences Northern Arizona University, Flagstaff, USA. 1997. <http://www.markgeneticssoftware.net>.

9. Матекин П.В. Приспособительная изменчивость и процесс видообразования у среднеазиатских наземных моллюсков семейства Epidae // Зоологический журнал. 1959. Т. 33. Вып. 10. С. 1518–1536.

10. Животовский Л.А. Популяционная биометрия. М.: Наука, 1991. 271 с.

11. Ли Ч. Введение в популяционную генетику. М.: Мир, 1978. 560 с.

12. Nei M. Estimation of average heterozygosity and genetic distance from a small number of individuals // Genetics. 1978. V. 89. P. 583–590.

13. Сычев А.А., Снегин Э.А. Конхологическая изменчивость и полиморфизм изоферментов в популяциях наземного моллюска *Helicopsis striata* юга Среднерусской возвышенности // Биоразнообразие и роль животных в экосистемах. Днепропетровск. 2009. С. 172–173.

14. Снегин Э.А. Оценка состояния популяционных генотипов наземных моллюсков в условиях влияния горно-обогатительных комбинатов на примере *Bradybaena fruticum* Müll (Gastropoda, Pulmonata) // Экологическая генетика. 2010. Т. VIII. № 2. С. 45–55.

15. Иванова Е.В., Снегин Э.А. Анализ генетической структуры популяций *Chondrula tridens* Müller (Mollusca, Gastropoda, Pulmonata) в условиях трансформированных экосистем // Биоразнообразие и роль животных в экосистемах. Днепропетровск. 2007. С. 198–199.

16. Снегин Э.А. Содержание химических элементов в раковинах наземных моллюсков в условиях влияния горно-обогатительных комбинатов // Проблемы региональной экологии. 2009. № 1. С. 22–27.

17. Майр Э. Зоологический вид и эволюция. М.: Мир, 1968. 398 с.

18. Crow J.F., Morton N.E. Measurement of gene frequency drift in small population // Evolution. 1955. V. 9. P. 202–214.

19. Crow J.F., Kimura M. An introduction to population genetics theory. N.Y.: Harpers and Row, 1970. 591 p.

*Работа выполнена при финансовой поддержке программы РНПВШ № 2.2.3.1/9731, РФФИ № 09-04-97513 p\_центр\_a, Министерства образования и науки РФ ГК П 1050.*

**Экотоксиканты и аутоиммунные заболевания человека**

© 2011. В. Ю. Охалкина, д.м.н., профессор,  
Вятский государственный гуманитарный университет,  
e-mail: verona2205@mail.ru

В статье представлен обзор данных литературы, посвящённых проблеме аутоиммунных заболеваний человека и роли загрязнения окружающей среды в развитии и прогрессировании данного вида патологии.

The article reviews the literature on the problem of autoimmune diseases of humans and the role of environmental pollution in the development and progression of this type of pathology.

Ключевые слова: иммунная система, аутоиммунные заболевания, аутоантигены, ксенобиотики

Key words: immune system, autoimmune diseases, auto-antigens, xenobiotics

В настоящее время наряду с общепринятыми критериями здоровья населения (заболеваемость, смертность, оценка физического и функционального состояния организма) всё чаще используются показатели иммунного статуса организма. В силу своей высокой чувствительности иммунная система чутко реагирует на воздействие разнообразных факторов внешней среды, то есть является эффективной индикаторной системой экологически неблагоприятной ситуации.

В последние годы на стыке физиологии, иммунологии и экологии сформировалось новое научное направление – экологическая иммунология, которая изучает особенности функционирования иммунной системы в условиях изменяющейся окружающей среды [1]. В отличие от эпидемиологической иммунологии, она исследует не только распространение заболеваний, обусловленных дефектами или дефицитами иммунитета, но и адаптационные сдвиги в иммунной системе, возникшие под влиянием изменения среды обитания человека и обуславливающие оптимум её функционирования в новых условиях.

Поражение иммунной системы является одним из основных проявлений токсического действия ксенобиотиков на организм человека. Данное свойство токсикантов, получившее название иммунотоксичность, может реализоваться в виде нескольких вариантов: угнетение функций – иммунодепрессия, стимуляция функций – аллергия (сенсibilизация), извращение функций – развитие аутоиммунных реакций против собственных структур организма [2].

Аутоиммунные заболевания (АИЗ) – группа болезней, в основе которых лежит агрессия собственной иммунной системы против неизменённой ткани организма [3]. По данным разных авторов, к настоящему времени насчитывается от 60–80 до 100 вариантов АИЗ с различной клинической картиной, но общими механизмами патогенеза и принципами лечения [4, 5].

АИЗ являются значимой причиной заболеваемости и смертности в промышленно развитых странах, поражая до 8% всего населения, и являются третьей наиболее распространённой категорией болезней после рака и сердечных заболеваний [6, 7]. Из-за проблем в разработке и стандартизации эпидемиологических исследований и ограниченности имеющихся данных этот показатель в действительности может быть существенно выше. Социальная и экономическая значимость АИЗ определяется тем, что большинство из них проявляется в молодом возрасте, имеет хроническое течение и наблюдается на протяжении всей жизни человека.

Клинические признаки АИЗ существенно различаются и зависят от возраста, пола, географической распространённости, поражения определённого органа или системы [4, 5]. Общими признаками всех АИЗ являются генетическая предрасположенность, прогрессирующее или рецидивирующее течение, сочетание нескольких аутоиммунных процессов у одного больного, возможность воспроизведения на лабораторных животных, обнаружение в крови аутоантител, аутоагрессивных лимфоцитов, отложение в тканях комплексов «анти-

Основные клинические формы аутоиммунных заболеваний

<b>Органоспецифические аутоиммунные заболевания</b>	
Эндокринные заболевания	Хронический тиреоидит (болезнь Хашимото)
	Диффузный токсический зоб (болезнь Грейвса)
	Полигландулярный синдром I и II типа
	Инсулинозависимый сахарный диабет
	Первичная надпочечниковая недостаточность (болезнь Аддисона)
Заболевания кожи	Обыкновенная пузырчатка
	Листовидная пузырчатка
	Гнездная алопеция
	Буллезный эпидермолиз
	Витилиго
Заболевания крови	Гемолитическая анемия
	Пернициозная анемия
	Тромбоцитопеническая пурпура
	Иммунная нейтропения
	Первичный антифосфолипидный синдром
Заболевания нервной системы	Миастения гравис
	Рассеянный склероз
	Демиелинизирующие полинейропатии
	Мультифокальная моторная полинейропатия
	Полинейропатия при моноклональной гаммапатии
Заболевания печени и желчевыводящих путей	Дегенерация мозжечка
	Аутоиммунный гепатит
	Первичный билиарный цирроз
	Первичный склерозирующий холангит
Заболевания желудочно-кишечного тракта	Болезнь Крона
	Болезнь Уиппла
	Целиакия
Заболевания глаз	Ретробульбарный неврит
	Аутоиммунная офтальмопатия
	Увеит
Заболевания почек	Первичные гломерулонефриты и гломерулупатии
	Синдром Гудпасчера
Заболевания лёгких	Идиопатические интерстициальные болезни лёгких (фиброзирующие альвеолиты)
	Саркоидоз
Заболевания сердца	Аутоиммунный миокардит
<b>Органонеспецифические (системные) аутоиммунные заболевания</b>	
Коллагенозы	Системная красная волчанка
	Системная склеродермия
	Дерматомиозит, полиомиозит
	Синдром Шегрена
	Ревматоидный артрит
	Анкилозирующий спондилит
	Болезнь Бехчета
	Смешанное заболевание соединительной ткани
Псориаз	
Васкулиты	Системный некротический васкулит
	Узелковый периартериит
	Синдром Черджа-Стросса
	Гранулематоз Вегенера
	Гигантоклеточный артериит
	Болезнь Кавасаки
	Облитерирующий тромбангиит
	Саркоидоз
Криоглобулинемия	

ген-антитело», терапевтический эффект применения иммунодепрессантов.

К настоящему времени предложено несколько классификаций АИЗ. Общепринятой является классификация, основанная на специфичности образующихся аутоантигенов, согласно которой выделяют органоспецифические и органонеспецифические, или системные, АИЗ [3, 8] (табл.).

Современная концепция аутоиммунитета исходит из того, что умеренный аутоиммунный ответ на свои собственные антигены — это физиологическое явление и необходимое условие нормального функционирования самой иммунной системы, регуляции и синхронизации клеточных функций и морфогенеза. В норме аутоиммунитет ограничен многими регуляторными механизмами. При патологии могут происходить нарушения регуляции аутоиммунного ответа, что приводит к развитию аутоаллергии, то есть АИЗ [8 – 10].

Согласно современным представлениям, АИЗ характеризуются мультифакториальной этиологией [4]. Для развития АИЗ необходима комбинация двух основных групп причин — генетической предрасположенности человека (вклад 30%) и воздействия средовых факторов (вклад 70%) [4].

В пользу того, что генетические факторы служат важной причиной возникновения АИЗ, свидетельствуют семейный характер большинства из них, а также высокий уровень конкордантности заболеваний при сравнении монозиготных и дизиготных близнецов. Конкордантность — степень соответствия физических или клинических данных у близнецовых пар. Близнецовая пара считается конкордантной, если у обоих близнецов проявляется или, наоборот, не проявляется то или иное заболевание или признак.

Ещё одним подтверждением существенного значения генетических факторов в развитии АИЗ являются данные, полученные на лабораторных моделях. В условиях эксперимента АИЗ можно получить спонтанно у животных специально выведенных линий, имеющих идентифицированный генетический дефект, без участия каких-либо других явных инфекционных или токсических пусковых воздействий [4].

Лишь для небольшого числа патологий выявлена связь с дефектом одного конкретного гена. Подавляющее большинство заболеваний имеет полигенный характер нарушений. Теоретически все гены, кодирующие продукты, участвующие в поддержании ауто-

толерантности и регулировании функций иммунной системы (прежде всего гены главного комплекса гистосовместимости), могут быть вовлечены в развитие аутоаллергии [11 – 15].

Индивидуальный гормональный фон организма во многом определяет развитие и течение АИЗ. С данным обстоятельством связывают более высокую частоту встречаемости АИЗ среди женщин, а также развитие патологических процессов в период полового созревания и беременности [16 – 19]. Под действием женских гормонов эстрогенов отмечается угнетение естественной иммуносупрессии, что играет важную роль в патогенезе данной группы болезней.

Однако даже исследования по распространённости АИЗ у монозиготных и дизиготных близнецов убедительно доказывают, что экологические факторы необходимы для развития заболевания. Если бы АИЗ были целиком обусловлены генетическими факторами, то показатель конкордантности у идентичных монозиготных близнецов должен составлять 100%, а у дизиготных близнецов — 50%. Экспериментальные данные показывают, что действительный уровень конкордантности у монозиготных близнецов находится в пределах 10–50%, а у дизиготных — в пределах 2–40% случаев. Низкий уровень конкордантности АИЗ у монозиготных близнецов (менее 50%) служит подтверждением значительной роли средовых этиологических факторов [4].

Многочисленные биотические и абиотические факторы окружающей среды, обычно действуя в комплексе, играют роль модуляторов, способствуя развитию или усугубляя течение патологических иммунных процессов, вызывают мутации генов, кодирующих иммунорегуляторные факторы, изменяют иммунную толерантность и реализацию нормальных иммунных эффекторных механизмов. Поиск таких факторов, а также выяснение характера их действия имеют большое значение для понимания патогенеза АИЗ, а также для улучшения их профилактики и лечения.

Нельзя не отметить, что чрезвычайно важное влияние на развитие АИЗ оказывают биотические факторы внешней среды, провоцирующие каскад патологических реакций с участием иммунной системы. В экспериментах на лабораторных моделях показано, что разнообразные инфекционные агенты самостоятельно могут вызывать АИЗ [20 – 23]. Зачастую несколько различных микроорганизмов приводят к развитию одних и тех же клинических аутоиммунных синдромов, что свидетель-

ствует о наличии у них сходных механизмов воздействия на иммунную систему.

Несомненным фактом является то, что самые разнообразные ксенобиотики, находящиеся в компонентах окружающей среды, играют важнейшую роль в индукции и прогрессировании АИЗ. В развитии подобного рода патологии ведущее значение не всегда принадлежит исходным соединениям, чаще продуктам их превращения в организме. Общий универсальный путь окислительного метаболизма ксенобиотиков с участием нейтрофилов служит источником реактивных метаболитов соединений, которые могут нарушать регуляцию и функционирование иммунной системы в достаточной степени, чтобы вызвать АИЗ.

Значительный вклад в изучение роли экотоксикантов в развитии АИЗ человека внесли экспериментальные исследования, проводимые на модельных лабораторных животных. Существует большая группа моделей индуцированных АИЗ, которые получают на животных, подвергшихся воздействию определённых химических веществ. При этом установлена прямая связь между введением того или иного токсиканта и развивающейся формой заболевания [24]. Прекрасным примером такого рода моделей являются АИЗ, индуцированные воздействием соединений тяжёлых металлов (ТМ) [24]. Аппликация ртути разными путями и в различных формах (в частности, подкожное введение хлорида ртути) вызывает у мышей образование широкого спектра аутоантител к компонентам ядра клетки и развитие заболевания, сходного с системной красной волчанкой человека [24 – 27].

Воздействие на подверженных спонтанному развитию аутоиммунной патологии линейных мышей химическими агентами, в отношении которых известно, что они провоцируют развитие АИЗ у нормальных животных, может существенно изменить течение заболевания. В некоторых случаях подобные экзогенные химические агенты приводят к сокращению сроков развития болезни, а в других – придают спонтанному заболеванию некоторые черты, свойственные ксенобиотик-индуцированным процессам. Так, экспозиция ртутью ускоряет формирование спонтанного заболевания у мышей линии BXS<sup>B</sup>, а её введение мышам линии (NZBxNZW) F1 вызывает расширение спектра образующихся аутоантител [28].

Эти наблюдения позволяют предположить, что воздействие экзогенных провоцирующих факторов, во-первых, необходимо для индукции, а во-вторых, существенно влияет

на экспрессию генетически запрограммированного заболевания.

С. А. Куценко [2] указывает, что теоретически можно выделить три ведущих механизма инициации химическими веществами аутоиммунной патологии:

Прямое действие токсиканта на иммунокомпетентные клетки. В результате этого возможны угнетение активности Т-лимфоцитов супрессоров, усиление активности Т-лимфоцитов хелперов, поликлональная активация В-лимфоцитов, нарушение регуляции секреции цитокинов. Так, лекарственный препарат метилдопа, взаимодействуя с Т-лимфоцитами супрессорами, провоцирует развитие аутоиммунной анемии у человека; некоторые металлы (например, ртуть) вызывают неспецифическую стимуляцию поликлональных В-лимфоцитов.

Высвобождение аутоантигенов. Многие ксенобиотики нарушают целостность биологических структур организма и способствуют выходу в кровь тканевых антигенов, с которыми в норме клетки иммунной системы не контактируют. Длительное воздействие некоторых металлов (ртути, золота, марганца, кобальта и т.д.), вызывая хронический воспалительный процесс в тканях, провоцирует развитие аутоиммунных реакций.

Модификация собственных антигенов. Ксенобиотики, взаимодействуя с макромолекулами тканей, могут изменять их конформацию, формировать в них новые антигенные детерминанты, вызывать экспрессию «скрытых» антигенных детерминант. В итоге эти структуры перестают распознаваться иммунной системой как «свои». Примером является действие препарата дигидролазина и соединений ртути на ядерные структуры клетки.

Накопленные эпидемиологические данные свидетельствуют о более высокой распространённости АИЗ в регионах, отличающихся повышенными уровнями химического загрязнения [29]. Установлена значительная роль в возникновении АИЗ ухудшения качества воздуха с накоплением в организме оксидов углерода, азота, серы, углеводов, пылевых частиц, ТМ [29, 30]. Доказано негативное влияние на формирование АИЗ загрязнённой питьевой воды, поскольку существующие современные методики очистки не позволяют освободить её от хлорированных производных бензольного ряда, фенолов, нитратов [31].

Рост в последние годы распространённости индуцированных ТМ аутоиммунных и аллергических заболеваний связывают не толь-



ко с экологическим неблагополучием, но также с широким применением металлов в составе сплавов в стоматологии, внедрением препаратов золота в ревматологическую практику, использованием различных полупроводниковых материалов в бытовой технике. Избыток токсичных и дефицит физиологически необходимых микроэлементов служат отправной точкой либо сопутствуют развитию патологии [32].

Известно, что химические элементы не являются полноценными антигенами, поэтому их иммуотропный эффект неспецифичен [2, 32, 33]. Эффекты многих ТМ обладают сходством и взаимозаменяемостью, а их иммунотоксическое действие зависит от дозы и времени экспозиции [34]. Как правило, ТМ формируют аутоаллергию по типу гиперчувствительности замедленного типа. Хроническое воздействие субтоксических доз ТМ приводит как к индукции образования специфических аутоантигенов, так и неспецифической активации иммунной системы [35, 36]. Вызываемые ими патологические процессы отличаются агрессивностью и системностью, трудно поддаются традиционному лечению, склонны к прогрессированию и нередко связаны с бытовым или профессиональным анамнезом [34].

Хорошо известно об иммунотоксических свойствах ртути, соединения которой даже в очень низких дозах нарушают регуляцию синтеза цитокинов, продукцию интерферонов макрофагами, угнетают клеточный иммунный ответ [36 – 40]. Основным механизмом воздействия соединений ртути связывают с повреждением ядерных структур клеток (главным образом, белка фибрилларина), вследствие чего они приобретают свойства аутоантигенов и на них развивается Т-клеточный иммунный ответ [41 – 43].

Введение солей ртути экспериментальным животным в течение 3-х недель вызывает атрофию тимуса, подавление пролиферации Т-лимфоцитов хелперов, поликлональную активацию В-клеток и образование аутоантител к коллагену, ДНК, миелопероксидазе и ряду других белковых соединений. По данным некоторых авторов [44], способность к развитию АИЗ под влиянием ртути и кадмия генетически обусловлена. Хронические экспозиции малыми дозами ртути у людей могут приводить к такой аутоиммунной патологии, как волчаночно-подобные синдромы, дерматиты, мембранозный гломерулонефрит, склеродермоподобные поражения, пемфигус [45].

Установлена значительная роль бериллия в развитии аутоиммунных процессов при воздействии в концентрациях, превышающих естественные фоновые [32, 46]. Этот металл вызывает заболевания органов дыхания и кожных покровов. Несмотря на то, что бериллий является промышленным ядом и бытовые поражения им редки, не стоит забывать, что он широко применяется в производстве люминесцентных ламп. Бериллий оказывает системное действие на гуморальный иммунный ответ, что приводит к стимуляции продукции иммуноглобулинов классов М и G. Данное соединение опасно из-за его тропности к лимфатической системе и медленной элиминации из организма (период полувыведения более 10 лет). Сходное иммунотоксическое влияние оказывают соединения циркония [32, 45, 46].

Одну из приоритетных ролей в этиологии АИЗ играет никель. Пагубное воздействие никеля и его соединений на организм людей достигло столь опасной величины, что есть основания говорить о глобальном никелевом токсикозе. Ни один химический элемент или соединение не обладают таким же, как никель, комплексом отрицательных воздействий на здоровье при чрезмерном поступлении в организм и его кумуляции. Развивающаяся защитная сенсibilизация постепенно приводит к развитию тяжёлых аутоиммунных реакций, прежде всего в тех органах, где металл накапливается и реализует свои цитотоксические, мутагенные, аллергенные свойства. Аутоаллергическая реакция усиливается за счёт повреждения никелем надпочечников, что приводит к дефициту глюкокортикоидных гормонов, играющих важную роль в регуляции иммунных реакций и воспалительных процессов. Кроме прямого цитотоксического действия металла, он может также оказывать опосредованный катализом эффект в сочетании с уреазой, расщепляющей мочевины и другие азотистые соединения (аллоксан, вапор и др.) [47 – 50].

Никелевые дерматозы являются первым сигнальным симптомом выработавшейся гиперчувствительности организма. Аллергия на никель, которая проявляется зудом или появлением на коже волдырей при контакте со сплавами этого металла, распространена с 30-х годов прошлого века (время начала широкого распространения никельсодержащей марганитовой продукции) [47, 48].

Среди многих заболеваний, вызванных никелевым токсикозом, особое внимание следует уделить сахарному диабету. Уже более ста лет известно, что поджелудочная железа спо-

собна накапливать в себе никель [51 – 53]. Эта же особенность характерна для мозга, лёгких, эндокринных органов и др.

Пристальное внимание в последние годы уделяется аутоиммунной патологии, вызываемой солями золота. Подобные соединения широко применяются в ревматологии для лечения тяжёлых форм ревматоидного артрита. В экспериментах на животных было показано, что в патогенезе аутоиммунных поражений, индуцированных солями золота, основное значение имеют генерализованная пролиферация лимфоцитов, системное отложение в тканях комплексов «антиген – антитело», образование аутоантител к структурам ядра. Основной формой патологии является поражение почек, нередкой бывает также тромбоцитопения и ряд других аутоиммунных процессов [33, 35, 54, 55]. Сходные клинические проявления отмечаются и при хронической экспозиции солями серебра [55].

После широкого внедрения платиносодержащих каталитических нейтрализаторов в автомобилях отмечается существенное загрязнение окружающей среды соединениями платины. При хронической аппликации гексахлорплатината восприимчивым мышам линии В10.S наблюдалось образование аутоантител к нуклеоплазматическим антигенам и повреждение активных сайтов транскрипции РНК [56].

Нарушение эффектов иммунной системы ТМ может иметь самые неблагоприятные эффекты для здоровья людей. Кадмий и свинец – приоритетные экологические и профессиональные токсиканты. Сами не являясь причиной аутоаллергии, они служат ко-стимуляторами для системной пролиферации Т-лимфоцитов, резко усиливают адаптивный иммунный ответ на неродственные антигены, способствуют развитию аллергических и аутоиммунных заболеваний [57].

Существуют данные, что такие химические вещества, как винилхлорид, кремневая пыль, анилиновые красители, ароматические углеводороды (бензол, толуол), хлорированные алифатические углеводороды (трихлорэтилен, перхлорэтилен), эпоксидная смола, силикон (протезы груди), зачастую приводят к развитию склеродермоподобных состояний [51].

Среди прочих провоцирующих факторов АИЗ обсуждается роль производственных вредностей (поливинилхлориды, асбест, хром, пестициды), токсических и мутагенных добавок в продуктах питания (нитраты, нитри-

ты, стимуляторы роста, антибиотики), лекарственных препаратов [29, 58].

При изучении влияния хлороорганических пестицидов на развитие аутоиммунных процессов в опытах на мышах восприимчивых линий было выявлено, что механизм их действия связан с эстрогеноподобным эффектом, который обуславливает подавление нормальных механизмов иммуносупрессии и чрезмерную активацию иммунной системы [59, 60].

Хлордан – инсектицид, который в 1950–1970-е годы широко использовался в сельском хозяйстве для защиты растений от вредителей, а в последующем применялся исключительно как термитоцид. Исследования 27 человек, подвергшихся в течение предшествующих 10 лет действию технического хлордана в быту или в связи с профессиональными обязанностями, показали, что, по сравнению с контрольной группой, у них были выявлены значительные нарушения регуляторных процессов в иммунной системе, а также повышение титров аутоантител [61].

Имеются данные о модифицирующем влиянии на процессы аутоантителообразования другого известного соединения – гербицида бромоксирила (3,5-дибромо-4-гидроксибензонитрила) [62, 63]. Существует ряд указаний, что аутоиммунные процессы могут индуцироваться пентахлорфенолом (антисептик, применяемый для защиты древесины от грибкового поражения) [64], гексахлорбензолом [65], нефтепродуктами [66].

У пациентов, которые подверглись воздействию асбеста, развиваются не только заболевания дыхательной системы (силикоз), но и некоторые иммунологические нарушения. В частности, силикоз может сочетаться с таими АИЗ, как системная склеродермия, ревматоидный артрит, системная красная волчанка. Кремнезём-индуцированные аутоиммунные нарушения могут быть объяснены ко-стимулирующим действием данного соединения [67, 68].

Значительное внимание уделяется влиянию на развитие АИЗ различных лекарственных препаратов, широко используемых в повседневной жизни людей [69, 70]. Экспериментальным путём доказана способность прокаида, циклоспорина и гидралазина индуцировать развитие системной красной волчанки, пенициллина – миастении гравис, метилдопа – гемолитической анемии [71, 72].

Широко применяемый в дерматологии при лечении вульгарных угрей антибиотик тетрациклинового ряда миноциклин явля-

ется причиной развития такой аутоиммунной патологии, как сывороточная болезнь, лекарственно-индуцированная волчанка, аутоиммунный гепатит, системные васкулиты. Механизм его действия связывают с нарушением естественного процесса апоптоза (запрограммированной клеточной гибели) повреждённых и дефектных клеток организма, служащих впоследствии источником аутоантигенообразования [73 – 76].

Особая опасность экотоксикантов связана с тем, что загрязнение окружающей среды химическими соединениями оказывает воздействие на детей начиная с внутриутробного периода посредством влияния на организм матери. Интенсивное накопление ксенобиотиков происходит уже в плаценте, многие из них проникают в кровоток плода и накапливаются в его органах, предопределяя склонность к развитию в будущем различных аллергических и аутоиммунных патологий [77].

Таким образом, загрязнение окружающей среды играет огромную и ещё недооценённую роль в развитии такой социально значимой патологии человека, как различные аутоиммунные заболевания. Понимание механизмов воздействия на организм ксенобиотиков, приводящих к развитию многообразных нарушений в иммунной системе, необходимо для разработки эффективных профилактических и терапевтических мер, направленных на решение данной проблемы.

### Литература

1. Корнев А.В. Ворота для химической атаки – иммунитет // Территория и планирование. 2006. № 1 (3). С. 13–15.
2. Кудченко С.А. Основы токсикологии. Учебное пособие. СПб.: Фолиант, 2004. 720 с.
3. Хаитов Р.М., Игнатьева Г.А., Сидорович И.Г. Иммунология. М.: Медицина, 2000. 432 с.
4. Encyclopedia of life sciences. John Wiley & Sons, 2007. doi: 10.1002/9780470015902.a0020193. www.els.net.
5. Rose N.R. Mechanisms of autoimmunity // Semin. Liver Dis. 2002. V. 22. P. 387–394.
6. Cooper G.S., Stroehla B.C. The epidemiology of autoimmune diseases // Autoimmun Rev. 2003. V. 2. № 3. P. 191–125.
7. Jacobson D.L., Gange S., Rose N.R. Epidemiology and estimated population burden of selected autoimmune diseases in the United States // Clin. Immunol. Immunopathol. 1997. V. 84. № 3. P. 223–243.
8. Пономарев В.В. Аутоиммунные заболевания: настоящее и будущее. Практикующему неврологу // Международный неврологический журнал. 2008. 6 (22).
9. Autoantibodies and Autoimmunity: Molecular Mechanisms in Health and Disease / Ed. by K. Michael Pollard. Verlag Gmbh & Co. KGaA, Weinheim, 2006. 156 p.
10. Карпин В.А. Частный анализ хронического патологического процесса: аутоиммунные болезни // Успехи современного естествознания. 2005. № 6. С. 21–24.
11. Klein J. The natural history of the major histocompatibility complex. New York: Wiley & Sons, 1987. 346 p.
12. Hill A.V. Immunogenetics and genomics // Lancet. 2001. V. 357. P. 2037–2041.
13. Larsen C.E., Alper C.A. The genetics of HLA-associated disease // Curr. Opin. Immunol. 2004. V. 16. № 5. P. 660–667.
14. Хаитов Р.М., Алексеев Л.П. Физиологическая роль главного комплекса гистосовместимости // Иммунология. 2001. № 3. С. 4–12.
15. Дедов И.И., Хаитов Р.М., Алексеев Л.П., Болдырева М.Н. Новые возможности генотипирования в прогнозировании вероятности развития аутоиммунных заболеваний // Проблемы эндокринологии. 2007. Т. 53. № 1. С. 40–42.
16. Da Silva J.P. Sex hormones, glucocorticoids and autoimmunity: facts and hypotheses // Ann. Rheum. Dis. 1995. V. 54. P. 6–16.
17. Klein S.L. The effects of hormones on sex differences in infection: from genes to behavior // Neurosci. Biobehav. Rev. 2000. V. 24. P. 627–638.
18. Whitacre C.C. Sex differences in autoimmune disease // Nature Immunol. 2001. V. 2. P. 777–780.
19. Fairweather D., Rose N.R. Women and autoimmune diseases // Emerg. Infect. Dis. 2004. V. 10. № 11. P. 321–331.
20. Fairweather D., Kaya Z., Shellam G.R., Lawson C.M., Rose N.R. From infection to autoimmunity // J. Autoimmun. 2001. V. 16. P. 175–186.
21. Fairweather D., Lawson C.M., Chapman A.J. Wild isolates of murine cytomegalovirus induce myocarditis and antibodies that cross-react with virus and cardiac myosin // Immunology. 1998. V. 94. P. 263–270.
22. Wolfgram L.J., Beisel K.W., Herskowitz A. Variations in the susceptibility of *Coxsackievirus* B3-induced myocarditis among different strains of mice // J. Immunol. 1986. V. 136. P. 1846–1852.
23. Neu N., Susan W., Rose N.R. Coxsackievirus-induced myocarditis in mice: cardiac myosin autoantibodies do not cross-react with the virus // Clin. Exp. Immunol. 1987. V. 69. P. 566–574.
24. Reuter R., Tessars G., Vohr H.-W., Gleichmann E., Lührmann R. Mercuric chloride induced autoantibody against U3 small nuclear ribonucleoprotein in susceptible mice // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1989. V. 86. P. 237–241.
25. Hultman P., Bell L.J., Eneström S., Pollard K.M. Murine susceptibility to mercury. I. Autoantibody profiles and systemic immune deposits in inbred, congenic and intra-H-2 recombinant strain // Clin. Immunol. Immunopathol. 1992. V. 65. P. 98–109.

26. Pollard K.M., Chan E.K., Rubin R.L., Tan E.M. Monoclonal autoantibodies to nuclear antigens from murine graft-versus-host disease // *Clin. Immunol. Immunopathol.* 1987. V. 44. P. 31–40.
27. Gelpi C., Rodrigues-Sanchez J.L., Martinez M.A. Murine graft vs host disease a model for study of mechanism that generate autoantibodies to RNP // *J. Immunol.* 1988. V. 140. P. 4160–4166.
28. Rofler R., Dixon F.J., Theofilopoulos A.N. Genetic basis for autoantibody production in murine models of systemic autoimmunity // *Contrib. Microbiol. Immunol.* 1989. V. 11. P. 206–230.
29. Principles and methods for assessing autoimmunity associated with exposure to chemicals (Environmental health criteria 236). WHO. 2006. 334 p.
30. Рассеянный склероз и другие демиелинизирующие заболевания / Под ред. Е.И. Гусева, И.А. Завалишина, А.Н. Бойко. М.: Миклош, 2004. 540 с.
31. Пономарев В.В. Редкие неврологические синдромы и болезни. СПб.: Фолиант, 2005. 216 с.
32. Кудрин А.В., Скальный А.В., Жаворонков А.Е. Иммунофармакология микроэлементов. М.: КМК, 2000. 537 с.
33. Bigazzi P.E. Autoimmunity and heavy metals // *Lupus.* 1994. V. 3. № 6. P. 449–453.
334. Алексеев С.В., Янушанец О.И., Храмов А.В., Серпов В.Ю. Элементный дисбаланс у детей Северо-Запада России. СПб.: СПбГПМА, 2001. 128 с.
35. Rowley B., Monestier M. Mechanisms of heavy metal-induced autoimmunity // *Mol. Immunol.* 2005. V. 42. № 7. P. 833–838.
36. Bagenstose L.M., Salgame P., Monestier M. Cytokine regulation of a rodent model of mercuric chloride-induced autoimmunity // *Environ Health Perspect.* 1999. V. 107. № 5. P. 807–810.
37. Haggqvist B., Hultman P. Effects of deviating the Th2-response in murine mercury-induced autoimmunity towards a Th1-response // *Clin. Exp. Immunol.* 2003. V. 134. № 2. P. 202–209.
38. Vas J., Monestier M. Immunology of mercury // *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 2008. V. 1143. P. 240–267.
39. Silva I.A., Nyland J.F., Gorman A., Perisse A., Ventura A.M., Santos E.C.O., de Souza J.M., Burek C.L., Rose N.R., Silbergeld E.K. Mercury exposure, malaria, and serum antinuclear/antinucleolar antibodies in amazon populations in Brazil: a cross-sectional study // *Environ. Health.* 2004. V. 3. P. 1–11.
40. Contrino J., Kosuda L.L., Marucha P., Kreutzer D.L., Bigazzi P.E. The in vitro effects of mercury on peritoneal leukocytes (PMN and macrophages) from inbred brown Norway and Lewis rats // *Int. J. Immunopharmacol.* 1992. V. 14. № 6. P. 1051–1059.
41. Kosuda L.L., Hosseinzadeh H., Greiner D.L., Bigazzi P.E. Role of RT6+ T lymphocytes in mercury-induced renal autoimmunity: experimental manipulations of «susceptible» and «resistant» rats // *J. Toxicol. Environ. Health.* 1994. V. 42. № 3. P. 303–321.
42. Chen M., Rockel T., Steinweger G., Hemmerich P., Risch J., von Mikecz A. Subcellular recruitment of fibrillar to nucleoplasmic proteasomes: implications for processing of a nucleolar autoantigen // *Mol. Biol. Cell.* 2002. V. 10. P. 3576–3587.
43. Vas J., Mattner J., Richardson S., Ndonge R., Gaughan J.P., Howell A., Monestier M. Regulatory roles for NKT cell ligands in environmentally induced autoimmunity // *J. Immunol.* 2008. V. 181. № 10. P. 6779–6788.
44. Häggqvist B., Hultman P. Murine metal-induced systemic autoimmunity: baseline and stimulated cytokine mRNA expression in genetically susceptible and resistant strains // *Clin. Exp. Immunol.* 2001. V. 126. № 1. P. 157–164.
45. Abréu Vélez A.M., Warfvinge G., Herrera W.L., Abréu Vélez C.E., Montoya M.F., Hardy D.M., Bollag W.B., Hashimoto K. Detection of mercury and other undetermined materials in skin biopsies of endemic pemphigus foliaceus // *Am. J. Dermatopathol.* 2003. V. 25. № 5. P. 384–391.
46. Ребров В.Г., Громова О.А. Витамины и микроэлементы. М.: Алев-В, 2003. 648 с.
47. Мачарадзе Д.Ш. Контактный дерматит на металл (никель) // *Лечащий врач.* 2005. № 4.
48. Ревякина В.А. Аллергия на металл // *АиФ. Здоровье.* 2003. № 14(451).
49. Шудин В.В. Никель и аутоиммунная патология // *Окулист (Санкт-Петербург).* 2004. № 7-8.
50. Сидоренко Г.И., Ицкова А.И. Никель. Гигиенические аспекты охраны окружающей среды. М.: Медицина, 1980. 176 с.
51. Скальный А.В., Рудаков И.А. Биоэлементы в медицине. М.: Оникс 21 век, 2004. 272 с.
52. Шудин В.В. Причины диабета найдены. Симферополь: Бизнес-Информ, 2007. 216 с.
53. Шудин В.В. Новые аспекты этиологии и эпидемиологии аутоиммунного сахарного диабета // *Врач-аспирант (Воронеж).* 2006. № 5 (14). С. 445–453.
54. Bigazzi P.E. Metals and kidney autoimmunity // *Environ. Health Perspect.* 1999. V. 107. № 5. P. 753–765.
55. Havarinasab S., Pollard K.M., Hultman P. Gold- and silver-induced murine autoimmunity--requirement for cytokines and CD28 in murine heavy metal-induced autoimmunity // *Clin. Exp. Immunol.* 2009. V. 155. № 3. P. 567–576.
56. Chen M., Hemmerich P., von Mikecz A. Platinum-induced autoantibodies target nucleoplasmic antigens related to active transcription // *Immunobiology.* 2002. V. 206. № 5. P. 474–483.
57. Carey J.B., Allshire A., van Pelt F.N. Immune modulation by cadmium and lead in the acute reporter antigen-popliteal lymph node assay // *Toxicol Sci.* 2006. V. 91. № 1. P. 113–122.
58. Чиркин В.В., Карандашов В.И., Палеев Ф.Н. Иммунореабилитация. М. 2003. 400 с.

59. Sobel E.S., Gianini J., Butfiloski E.J., Croker B.P., Schiffenbauer J., Roberts S.M. Acceleration of autoimmunity by organochlorine pesticides in (NZB x NZW)F1 mice // *Environ Health Perspect.* 2005. V. 113. № 3. P. 323–328.
60. Sobel E.S., Wang F., Butfiloski E., Croker B., Roberts S.M. Comparison of chlordecone effects on autoimmunity in (NZB x NZW) F1 and BALB/c mice // *Toxicology.* 2006. V. 218. № 2-3. P. 81-89.
61. McConnachie P.R., Zahalsky AC. Immune alterations in humans exposed to the termiticide technical chlordane // *Arch. Environ. Health.* 1992. V. 47. № 4. P. 295–301.
62. Semchuk K.M., Rosenberg A.M., McDuffie H.H., Cessna A.J., Pahwa P., Irvine D.G. Antinuclear antibodies and bromoxynil exposure in a rural sample // *J. Toxicol. Environ. Health A.* 2007. V. 70. № 7 P. 638–657.
63. Semchuk K.M., McDuffie H.H., Senthilselvan A., Dosman J.A., Cessna A.J., Irvine D.G. Factors associated with detection of bromoxynil in a sample of rural residents // *J. Toxicol. Environ. Health A.* 2003. V. 66. № 2. P.103–132.
64. McConnachie P.R., Zahalsky A.C. Immunological consequences of exposure to pentachlorophenol // *Arch Environ Health.* 1991. V. 46. № 4. P. 2492–53.
65. Dahlgren J., Takhar H., Anderson-Mahoney P., Kotlerman J., Tarr J., Warshaw R. Cluster of systemic lupus erythematosus (SLE) associated with an oil field waste site: a cross sectional study // *Environ Health.* 2007. V. 6. № 8. P. 23–25.
66. Ezendam J., Staedtler F., Pennings J., Vandebriel R.J., Pieters R., Harleman J.H., Vos J.G. Toxicogenomics of subchronic hexachlorobenzene exposure in Brown Norway rats // *Environ. Health Perspect.* 2004. V. 112. № 7. P. 782–791.
67. Otsuki T., Maeda M., Murakami S., Hayashi H., Miura Y., Kusaka M., Nakano T., Fukuoka K., Kishimoto T., Hyodoh F., Ueki A., Nishimura Y. Immunological effects of silica and asbestos // *Cell Mol. Immunol.* 2007. V. 4. № 4. P. 261–268.
68. Cowie R.L. Silica-dust-exposed mine workers with scleroderma (systemic sclerosis) // *Chest.* 1987. V. 92. P. 260–262.
69. Choquet-Kastylevsky G., Vial T., Descotes J. Drug allergy diagnosis in humans: possibilities and pitfalls // *Toxicology.* 2001. V. 158. P. 1–10.
70. Pichler W.J. Drug-induced autoimmunity // *Curr. Opin. Allergy Clin. Immunol.* 2003. № 3. P. 249–253.
71. Brik R., Tenenbaum G., Blank M., Shoenfeld Y., Barzilai D., Bloch K., Vardi P. D-penicillamine-induced autoantibodies in a mouse model // *Clin. Exp. Rheumatol.* 1995. V. 13. № 4. P. 483–488.
72. Damoiseaux J.G. Cyclosporin A-induced autoimmunity in the rat: central versus peripheral tolerance // *Int. J. Immunopathol. Pharmacol.* 2002. V. 15. № 2. P. 81–87.
73. Eichenfield A.H. Minocycline and autoimmunity // *Curr. Opin. Pediatr.* 1999. V. 11. № 5. P. 447–456.
74. Elkayam O., Yaron M., Caspi D. Minocycline-induced autoimmune syndromes: an overview // *Semin Arthritis Rheum.* 1999. V. 28. № 6. P. 392–397.
75. Van Steensel M.A. Why minocycline can cause systemic lupus – a hypothesis and suggestions for therapeutic interventions based on it // *Med. Hypotheses.* 2004. V. 63. № 1. P. 31–34.
76. Marzo-Ortega H., Baxter K., Strauss R.M., Drysdale S., Griffiths B., Misbah S.A., Gough A., Cunliffe W.J., Emery P.Br. Is minocycline therapy in acne associated with antineutrophil cytoplasmic antibody positivity? A cross-sectional study // *J. Dermatol.* 2007. V. 156. № 5. P. 1005–1009.
77. Артемьева Е.К., Сетко Н.П., Сапрыкин В.Б., Беккер И.П. Функциональные особенности системы «мать–плод–дети» в условиях антропогенного загрязнения среды обитания // *Микроэлементы в медицине.* 2004. Т. 5. Вып. 4. С. 1–3.

**НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«МОЛОДЫЕ УЧЁНЫЕ В РЕШЕНИИ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ НАУКИ»  
г. ВЛАДИКАВКАЗ**

10 мая 2011 года, сколько волнений и тревог. Садимся в г. Кирове на поезд «Пермь – Москва». Далее остановка в Москве и поездка в поезде «Москва – Владикавказ». Ночью с 12-го на 13 мая пересекли границу с Северным Кавказом. С нетерпением ждали вида гор. Погода пасмурная. Час остановки в Беслане, и потом Владикавказ. Нас и других гостей конференции разместили в молодёжном центре «Барс» в п. Верхний Фиагдон (рис. 1). Посёлок располагается в месте, которое имеет неописуемую красоту. Чтобы понять красоту Кавказских гор, нужно там побывать!



**Рис. 1.** Посёлок Верхний Фиагдон

Открытие конференции состоялось 14 мая в зале ЮНЕСКО – корпус филологического факультета Северо-Осетинского государственного университета (СОГУ) им. К. Л. Хетагурова (рис. 2), г. Владикавказ. С приветственным словом выступил председатель совета молодых учёных при главе Республики Северная Осетия-Алания В. А. Морозов.



**Рис. 2.** Корпус филологического факультета Северо-Осетинского государственного университета им. К. Л. Хетагурова

Всего в конференции приняло участие около 130 человек из различных регионов России. На пленарном заседании было заслушано 4 доклада. Н. С. Марзанов (ВНИИ животноводства Россельхозакадемии, пос. Дубровицы) представил для обсуждения доклад о научно-политических действиях в вопросах биоразнообразия, экосистемных услуг и благосостояния людей. А. Г. Кусраев (ВНЦ РАН и РСО-Алания, г. Владикавказ) доложил о работе Владикавказского научного центра РАН и РСО-А с молодёжью. В докладе К. В. Алексеева (НИИ фармакологии им. В. В. Закусова РАМН, г. Москва) был изложен опыт внедрения результатов исследований в практическую деятельность наукоёмкого производства. В. С. Авдеенко (Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова, г. Саратов) описал тенденции и перспективы деятельности молодых учёных РФ.

Во второй половине дня, после замечательно кофе-брейка, начали работу несколько секций: естественных и инженерно-технических, медико-биологических и сельскохозяйственных, гуманитарных наук, фармации и экономики. Наши доклады были заслушаны на секции «Естественные и инженерно-технические науки»: Ю. Н. Зыкова «Развитие цианобактерии *Nostoc linckia* и бактерий-спутников при действии никеля и нефтепродуктов»; А. И. Фокина «Изменение структурных особенностей цианобактерий и концентрации ионов никеля в растворе после экспозиции культуры с ионами токсиканта». Всего на секции выступили с докладами 24 человека. Большинство исследований лежит в области усовершенствования деталей инженерного оборудования, а также создания карт сейсмической опасности на территории Северной Осетии-Алании. Несколько работ представлено по созданию математических моделей воздушных потоков. К разработкам в области фундаментальной математики относились четыре работы. Все доклады были представлены на высоком научном уровне. Работа секций проходила в доброжелательной атмосфере, выступающим задавали много вопросов. По окончании работы секций состоялось торжественное закрытие конференции, каждому докладчику вручили диплом участника.

15 мая в ходе экскурсии по СОГУ мы посетили «День открытых дверей» химико-технологического факультета. Перед абитуриентами, их родителями и гостями выступила декан химико-технологического факультета Л. М. Кубалова.

Во время пребывания в п. Верхний Фиагдон нам посчастливилось познакомиться с учителями

местной школы. Вечером, несмотря на тяжёлый трудовой день, педагоги приняли нас с кавказским радушием и гостеприимством. Наслаждались мятным чаем и осетинскими пирогами, мы рассказывали друг другу о традициях, обычаях, проблемах.

Наша поездка оставила в памяти удивительное впечатление. Хочется отметить необыкновенное гостеприимство, доброту осетинского народа. Выражаем признательность и благодарность председателю конференции В. А. Морозову, заместителю председателя совета молодых учёных А. М. Кумаритову, профессору С. Г. Козыреву, директору школы № 1 п. Верхний Фиагдон А. Б. Хадарцевой, учителю химии той же школы З. В. Кабалоеву, декану химико-технологического факультета СОГУ

Л. М. Кубаловой, профессору кафедры общей и неорганической химии СОГУ д.х.н. Дзерановой К. Б., начальнику отдела по работе с учащимися и воспитанию молодежи министерства по делам молодёжи, физической культуры и спорта РСО-Алания В. Л. Теблоеву, В. Т. Таказову.

Всем молодым учёным советуем принять участие в Третьей международной научно-практической конференции молодых учёных в г. Владикавказе, которая состоится в 2012 году.

*А. И. Фокина, к.б.н., ст. преподаватель кафедры химии Вятского государственного гуманитарного университета,  
Ю. Н. Зыкова, аспирант Вятской государственной сельскохозяйственной академии*

### ИНДУЦИРОВАННЫЙ МУТАГЕНЕЗ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕГО В СЕЛЕКЦИИ РАСТЕНИЙ (Г.П. Дудин, В.Н. Лысиков). Киров: Вятская ГСХА, 2009. 208 с.

В конце 2009 г. вышла из печати монография известных отечественных генетиков Г.П. Дудина и В. Н. Лысикова «Индукцированный мутагенез и использование его в селекции растений». Данное издание представляет собой удачное сочетание изложения основных положений классической генетики и характеристики мутагенных факторов, применяемых в настоящее время, в том числе и методических разработок, предложенных авторами монографии.

Актуальность и своевременность издания данной книги несомненна, так как одной из самых острых проблем нашего времени является продовольственная проблема. Её решение напрямую связано с достижениями генетики и селекции по выведению новых, высокопродуктивных сортов растений. Авторы считают, что к числу современных путей развития селекции следует отнести внедрение экспериментального мутагенеза с применением ионизирующего излучения (рентгеновского и гамма-излучения), лазеров, а также новых мутагенных и супермутагенных соединений.

Изложению экспериментального материала в книге предшествуют главы «Материальная основа наследственности и изменчивости» и «Мутационная изменчивость и типы мутаций». В 1-ой главе на основе последних научных данных рассматриваются вопросы строения клетки, способов её деления и основы молекулярной генетики. Во 2-ой главе описана история изучения мутагенеза, приведены классификации типов мутаций. Обе главы написаны на уровне лучших образцов учебной литературы и представляют собой удач-

ное учебное пособие для студентов, изучающих основы генетики.

3-4 главы посвящены особенностям радиационного, химического и лазерного мутагенеза. Приводится детальный анализ изменений в генетическом аппарате клеток, которые возникают при действии мутагенных факторов. Анализируя имеющиеся в литературе данные, авторы книги делают вывод о том, что степень воздействия мутагенов на наследственные механизмы растений зависит от многих факторов, включая конкретные условия среды в момент воздействия мутагена, видовые и индивидуальные различия биологии конкретных клеток, которые обуславливают различную чувствительность организма. Г. П. Дудин был одним из разработчиков лазерного метода мутагенеза. Он впервые установил мутагенное действие лучей лазера на новый объект – ячмень. Кроме того, было показано, что предпосевное облучение семян ячменя повышает их энергию прорастания и всхожесть, продуктивность растений, сокращает период вегетации. Г. П. Дудин выдвинул идею о связи лазерного света и возбуждения фитохромов. Это приводит к изменению проницаемости мембран для фитогормонов, которые также обладают хорошо выраженным мутагенным действием. Наибольшая частота и спектр наследственных изменений ячменя получены Г. П. Дудиным именно при обработке растений красным лазерным облучением в момент их максимальной насыщенности фитогормонами. Поэтому среди гипотез о действии лазерного облучения на генетический материал растений авторы монографии наиболее обоснованной счи-

## БИБЛИОГРАФИЯ

тают гипотезу воздействия лучей лазера через фитохромную систему растений с последующим изменением внутриклеточной среды (в первую очередь баланса фитогормонов).

И в завершении монографии в главе 6 «Использование мутаций в селекции растений» подчёркивается, что мутанты могут служить не только в качестве нового исходного материала, но и для улучшения уже имеющихся селекционных сортов. Методика экспериментального индуцированного мутагенеза, значительно ускоряя естественный спонтанный мутагенез, увеличивает шансы селекционера в борьбе за создание скороспелых, высокоурожайных, высококачественных, устойчивых к болезням и вредителям сортов сельскохозяйственных растений.

К сожалению, потенциальные возможности экспериментального мутагенеза в России исполь-

зуются далеко не полностью. Для того чтобы наша страна в полной мере обладала способностью обеспечить своих граждан продуктами питания, не зависеть от импорта, получать стабильно высокие урожаи, необходима кропотливая, постоянная селекционная работа с привлечением тех современных методов, которые описаны в монографии. И если молодые талантливые люди после прочтения этой книги загорятся идеей посвятить свою жизнь и работу выведению новых сортов, цель книги будет достигнута.

*Л. И. Домрачева, д.б.н., профессор  
каф. ботаники, физиологии растений  
и микробиологии им. Э. А. Штиной  
Вятской ГСХА*