



ВЕСТНИК

Института биологии Коми НЦ УрО РАН

ВЕСТНИК ИНСТИТУТА БИОЛОГИИ КОМИ НЦ УрО РАН 2016 № 4 (198)

Лицензия № 19-32 от 26.11.96 КР № 0033 от 03.03.97

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук
Адрес издателя: г. Сыктывкар, ГСП-2, 167982, ул. Коммунистическая, д. 28
Тел.: (8212) 24-11-19; факс: (8212) 24-01-63
E-mail: directorat@ib.komisc.ru; <http://ib.komisc.ru>

Компьютерный набор. Подписано в печать 22.12.2016. Формат 60×90¹/₈. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 4.0. Уч.-изд.л. 4.0 Тираж 170. Заказ № 14(16).

Отпечатано в патентно-информационной группе Института биологии Коми НЦ УрО РАН.
г. Сыктывкар, ГСП-2, 167982, ул. Коммунистическая, д. 28

Журнал включен в базу данных цитирования РИНЦ
Распространяется бесплатно

2016
№ 4 (198)

В номере

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

- Ковалева В.А., Денева С.В., Панюков А.Н.** Микробиологические показатели почвы постагрогенного биоценоза в тундровой зоне 2
- Лодыгин Е.Д., Безносиков В.А., Василевич Р.С.** Изучение элементного состава гуминовых и фульвокислот почв таежных и тундровых ландшафтов 10
- Шамрикова Е.В., Денева С.В., Кубик О.С., Пунегов В.В., Кызъюрлова Е.В. Зуева О.М.** Водорастворимые органические соединения торфяных почв северной части Большеземельской тундры 19
- Яковлева Е.В., Габов Д.Н., Безносиков В.А.** Накопление полициклических ароматических углеводов растениями южной тундры при добыче угля открытым способом 24

ХРОНИКА, СОБЫТИЯ, ФАКТЫ

- Татьяна Николаевна Пыстина 33
- Прошкина Е.Н., Шапошников М.В., Москалев А.А.** Международная научная конференция «Биомедицинские инновации для здорового долголетия» 34

С 2016 г. издается четыре раза в год.

Издается
с 1996 г.

Главный редактор: д.б.н. С.В. Дегтева
Заместители главного редактора: д.б.н. Е.В. Шамрикова, чл.-корр. РАН А.А. Москалев
Ответственный секретарь: Л.Я. Огородовая
Редакционная коллегия: д.т.н. Т.Я. Ашихмина, д.с.-х.н. В.А. Безносиков, д.б.н. В.В. Володин, д.б.н. Т.К. Головкин, д.б.н. М.М. Долгин, к.б.н. В.В. Елсаков, д.б.н. С.В. Загирова, д.б.н. В.Г. Зайнуллин, к.б.н. К.С. Зайнуллина, к.б.н. А.Б. Захаров, к.х.н. Б.М. Кондратенко, к.б.н. С.К. Кочанов, д.б.н. А.Г. Кудяшева, к.б.н. Е.М. Лаптева, к.б.н. Е.Н. Патова, к.б.н. И.Ф. Чадин, к.б.н. Т.П. Шубина, к.б.н. И.И. Шуктомова
Компьютерный дизайн и стилистика: Р.А. Микушев
Компьютерное макетирование и корректура: Е.А. Волкова

УДК 631. 461: 574. 2

**МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОЧВЫ ПОСТАГРОГЕННОГО БИОГЕОЦЕНОЗА
В ТУНДРОВОЙ ЗОНЕ****В.А. Ковалева, С.В. Денева, А.Н. Панюков***Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, Сыктывкар
E-mail: kovaleva@ib.komisc.ru*

Аннотация. Постагрогенная экосистема, представленная в долине р. Воркуты (подзона южных тундр), при прекращении посевов однолетних культур трансформируется через стадию залежи в многолетнее разнотравно-злаковое сообщество, под пологом которого происходит направленное преобразование почвы. Показано, что в почвах постагрогенной экосистемы сохраняются основные закономерности профильного распределения микроорганизмов: для верхних горизонтов почвы характерна высокая численность бактерий и микромицетов с абсолютным доминированием в структуре микробной биомассы мицелиальных грибов. На их долю приходится около 80% общей микробной биомассы. В аллювиальной постагрогенной почве выявлено относительно невысокое видовое разнообразие микромицетов при доминировании грибов рода *Penicillium*. По обилию и частоте встречаемости ведущие позиции занимают виды рода *Cladosporium* и стерильные формы мицелия. Преобладание в верхних горизонтах почвы живых клеток бактерий (85-86% от общего числа клеток) свидетельствует о высокой активности бактериального компонента микробиоценоза в постагрогенной экосистеме, сформировавшейся в долинном ландшафте тундровой зоны на месте бывшего пахотного угодья.

Ключевые слова: тундровая почва, постагрогенная экосистема, микробиоценоз, микробная биомасса

Введение

Современный этап развития сельского хозяйства в России характеризуется значительным сокращением площади сельскохозяйственных угодий. На заброшенных землях начинается постагрогенная сукцессия, которая представляет собой совокупность естественных природных процессов, проявляющихся в «стремлении» экосистемы вернуться в исходное, ненарушенное состояние. Основная часть исследований, опубликованных в последние годы, посвящена демутиациям на заброшенных пахотных угодьях таежной зоны России (Гузэль, 1999; Естественное восстановление..., 2005; Динамика некоторых..., 2009; Динамика сельскохозяйственных..., 2010; Телеснина, 2015). В тундровой зоне уникальным опытом сельскохозяйственного преобразования ландшафтов, не имеющим аналогов ни в России, ни за рубежом, являются агроэкосистемы, созданные во второй половине XX в. в Воркутинском районе Республики Коми (Хантимер, 1974, 1985). После прекращения в конце 90-х гг. прошлого столетия их сельскохозяйственного использования участки пашни, где высевали однолетние культуры (овес, горох) и многолетние травы, стали удобным объектом для изучения постагрогенной трансформации пахотных угодий в тундровой зоне (Экологические основы..., 1991).

Динамика процессов, происходящих в постагрогенной экосистеме, связана с динамикой биологического круговорота, важной составляющей которого является почвенный микробиоценоз. В настоящее время процесс трансформации микробного сообщества постагрогенных почв в тундре

остается практически неизученным. Вместе с тем, изменения таких показателей, как состав микробной биомассы и характер ее распределения по почвенному профилю являются важными характеристиками для выявления основных закономерностей трансформации микробных комплексов почв, этапов постагрогенной сукцессии, оценки устойчивости наземных экосистем в тундровой зоне.

Цель настоящей работы – дать общую характеристику комплекса почвенных микроорганизмов постагрогенной экосистемы, формирующейся на месте возделывания однолетних культур в долинных ландшафтах тундровой зоны европейского Северо-Востока. В соответствии с поставленной целью определены следующие задачи: выявить закономерности профильного распределения численности и биомассы основных групп микроорганизмов; оценить соотношение живых и мертвых клеток бактерий; определить видовое разнообразие микромицетов и выделить доминирующие виды.

Объекты и методы

Исследования проведены в 2014 г. на бывшем пахотном участке, расположенном на юго-востоке Большеземельской тундры в 2 км к северо-западу от г. Воркуты в пределах правобережной пойменной террасы р. Воркуты (Республика Коми, подзона южной тундры). Пробы почв для физико-химических и микробиологических исследований отобраны в августе, характеризовавшемся теплой погодой с ливневыми дождями.

Описание растительности выполнено с использованием общепринятых в геоботанике методов (Корчагин, 1964). Названия сосудистых растений даны в соответствии с системой, предложенной С.К. Черепановым (1995). Основной метод изучения опорных разрезов – традиционный морфологический анализ вертикального профиля почв. Диагностика горизонтов и почв проведена в соответствии с классификацией почв России (Классификация..., 2004; Полевой..., 2008). Аналитическая обработка образцов почв выполнена в Центре коллективного пользования «Хроматография», экоаналитической лаборатории, а также в отделе почвоведения Института биологии Коми НЦ УрО РАН. Величина кислотности почв ($pH_{\text{водн.}}$) определена потенциометрически в водной вытяжке, массовая доля органического углерода ($\omega(C_{\text{общ.}})$) и общего азота ($\omega(N_{\text{общ.}})$) – на CHNS-элементном анализаторе EA 1110 (Carlo Erba, Италия), подвижные формы фосфора и калия – по Кирсанову в модификации ЦИНАО; обменные катионы – по Гедройцу с вытеснением 1 н NH_4Cl и последующим атомно-эмиссионным определением на ICP Spectro Ciros CCD.

Отбор образцов почв для микробиологического анализа выполнен с учетом стерильности из генетических горизонтов почвы. Общее количество клеток бактерий и спор грибов, длина грибного мицелия определены методом люминесцентной микроскопии (Полянская, 1988; Методы..., 1991; Головченко, 1996), численность сахаролитических грибов – на среде Чапека, целлюлозолитических – на среде Гетчинсона с добавлением целлюлозы (Методы..., 1991). Видовая идентификация выделенных штаммов грибов проведена по определителям (Ramirez, 1982; Domsh, 2007). Названия микроскопических грибов даны в соответствии с международной базой данных (<http://www.indexfungorum.org>). Для характеристики структуры комплексов грибов, выявления доминирующих, частых, редких и случайных видов использован показатель частоты встречаемости (Кураков, 2001). Полученные данные обработаны стандартными методами статистического анализа с использованием программ Microsoft Excel и Statistika 6.0.

Результаты и обсуждение

Участок поймы в долине р. Воркуты был включен в сельскохозяйственное производство в 50-х гг. прошлого столетия. Строительство ТЭЦ, возведение водохранилища и плотины выше по течению реки от рассматриваемого участка, осуществленное в эти же годы, способствовало выходу пойменной террасы в окрестностях г. Воркуты из режима ежегодного затопления, что благоприятствовало возможности создания пахотного угодья на аллювиальных пойменных почвах. На рассматриваемом участке поймы в течение 40 лет возделывали преимущественно однолетние куль-

туры – овес (*Avena sativa* L.) и овсяно-гороховую смесь (*Avena sativa* + *Pisum sativum* L.) (Хантимер, 1974, 1985). Его хозяйственное использование в качестве пашни было прекращено в 2001 г. (Панюков, 2009).

В первые годы после снятия агрорежима на участке массово развились трехреберник Гукера (*Tripleurospermum hookeri* L.) с проективным покрытием до 90%, а также некоторые виды, обычные для посттехногенных территорий – лютик северный (*Ranunculus propinquus* L.), жерушник болотный (*Rorippa palustris* L.), злаки мятлик луговой (*Poa pratensis* L.), щучка дернистая (*Deschampsia cespitosa* L.). На 5-6 годы бывший пахотный участок характеризовался наличием практически сомкнутого травостоя с общим проективным покрытием до 90%. В травостое доминирующее положение занимали щучка дернистая (*Deschampsia cespitosa* L.), лисохвост луговой (*Alopecurus pratensis* L.) и кострец безостый (*Bromopus inermis* (Leyss) Holub). К концу первого десятилетия постагрогенной сукцессии на участке оформился крупнозлаковый луг с доминированием костреца безостого, который сохраняется до настоящего времени без явных изменений. Следует отметить, что в формировании травостоя на участке значимую роль играют виды, приуроченные в данном районе именно к пойме. Кроме костреца безостого необходимо выделить лисохвост луговой и виды разнотравья: веронику длиннолистную (*Veronica longifolia* L.), толстореберник альпийский (*Pachipleurum alpinum* L.), дудник лекарственный (*Angelica archangelica* L.) и ряд других. Их присутствие в травостое придает «пойменную» специфику формирующейся постагрогенной экосистеме.

Под оформившимся разнотравно-злаковым сообществом в настоящее время формируется аллювиальная гумусовая глееватая постагрогенная почва, развитая на песчано-супесчаных аллювиальных отложениях, залегающих с глубины 45 см. Строение профиля такой почвы может быть выражено формулой:

$$W \frac{0-2}{2} AY \frac{2-6}{4} AYa \frac{6-20}{14} AYa, g \frac{20-30}{10} \\ Bg \frac{30-45}{15} C \frac{45-111}{66} Cg \frac{111-170}{58}.$$

В соответствии с потенциалом природных факторов почвообразования ранее однородный пахотный горизонт почвы в процессе постагрогенной трансформации дифференцируется на серию подгоризонтов. В верхней гумусо-аккумулятивной части профиля выделяется слой ветоши крупностебельных трав (W), накапливающийся вследствие замедленной в биоклиматических условиях тундры минерализации растительного субстрата. Следующий за ним поверхностный подгоризонт AY мощностью около 4 см пронизан корнями травянистых растений, содержит значитель-

ное количество полуразложившихся органических остатков. Нижележащий подгоризонт АУра сохраняет черты былой агрогенной преобразованности: характеризуется высокой пористостью и хорошо выраженной мелкокомковато-зернистой структурой. Его нижняя часть АУра, g, отличающаяся от вышележащей толщи наличием четких морфологических признаков оглеения, сменяется переходным по гумусу горизонтом Вg с сизыми и ржавыми пятнами на буром фоне, свидетельствующими о частой смене окислительно-восстановительных условий. Срединная часть профиля представлена чередованием прослоек песка и супеси (горизонт С[~]), под которым залегает оглеенный слой песка (горизонт Сg[~]).

Выявленные особенности морфологического строения почвы свидетельствуют о дифференциации профиля по условиям увлажнения. Благодаря хорошей дренированности исследуемого участка поймы и легкому гранулометрическому составу аллювиальных отложений уровень почвенно-грунтовых вод находится за пределами 170-сантиметровой толщи почвенного профиля. Однако за счет капиллярного поднятия в его нижней части отмечается избыточное увлажнение, что обуславливает развитие здесь восстановительных процессов. Недостаток тепла, слабая испаряемость, отсутствие интенсивного иссушения профиля в летний период и уплотнение подгоризонтов АУра, g (20-30 см) и Вg способствуют созданию условий для избыточной влажности, развития процессов оглеения и, следовательно, неблагоприятного газообмена, о чем свидетельствуют грязно-сизые пятна, ржаво-охристые прожилки, приуроченные к этим горизонтам (глубина 20-45 см).

Сравнительно большая для аллювиальных почв Севера мощность гумусированной толщи профиля (около 30 см) обусловлена как длительным сельскохозяйственным использованием данного пойменного участка, связанным с применением технологических приемов возделывания однолетних трав (дискование, регулярное внесение удоб-

рений и известковых материалов), так и биологическими процессами трансформации в постагрогенный период остатков травянистых растений, богатых биогенными элементами. Как видно из табл. 1, именно в новообразованных в процессе реградации пахотного горизонта слоях почвенного профиля (подгоризонты W и АУ) отмечается аккумуляция органического вещества и основных биогенных элементов. Высокие значения отношения С:N в гумусо-аккумулятивном горизонте (табл. 1) свидетельствуют о низкой обогащенности почвенного органического вещества азотом и слабой степени его разложения (Орлов, 1990). С глубиной содержание основных биогенных элементов резко снижается (табл. 1), что позволяет сделать вывод о замкнутости биологического круговорота в постагрогенный период функционирования аллювиальной пахотной почвы в верхних горизонтах профиля.

Нейтральная и близкая к нейтральной реакция среды верхних горизонтов, нехарактерная для целинных пойменных почв, формирующихся в долине р. Воркуты (Почвы..., 1958), является следствием многолетнего внесения известковых материалов в почву пахотного угодья. Даже спустя 15 лет после снятия агрорежима почвенно-поглощающий комплекс постагрогенной почвы сохраняет кислотно-основные свойства, созданные за 40 лет формирования насыщенного катионами кальция и магния пахотного горизонта в процессе окультуривания аллювиальной почвы. Однако, в верхней части профиля (глубина 0-6 см), где в настоящее время идут современные процессы трансформации растительного опада и гумификации, наблюдается тенденция некоторого снижения величины рН водной вытяжки при сохранении достаточно высокого содержания обменных катионов кальция и магния (табл. 1).

Результаты микробиологических исследований показали, что в аллювиальной пахотной почве в постагрогенный период ее функционирования сохраняются основные закономерности профильного распределения микроорганизмов, характер-

Таблица 1

Агрохимические показатели почвы постагрогенной экосистемы

Горизонт	Глубина, см	рН _{водн.}	Подвижные формы		ω(С _{общ.}), %	ω(N _{общ.}), %	С:N	Обменные катионы	
			P ₂ O ₅	K ₂ O				Ca ²⁺	Mg ²⁺
W	0-2	6.1	178.4	157.3	24.1	0.88	27.4	35.1	4.2
АУ	2-6	6.7	136.1	56.9	4.2	0.30	14.0	22.4	2.5
АУра	6-20	7.3	42.7	14.45	2.6	0.15	17.4	17.1	1
АУра, g	20-30	6.9	40.3	7.3	2.6	0.19	13.7	16.5	1
Вg	30-45	6.8	17.6	5.3	0.79	0.082	9.6	9.7	0.9
С [~]	45-111	6.9	20.6	6.2	0.43	0.045	9.6	7.6	0.9
Сg [~]	111-128	6.8	24.7	7.3	0.30	0.035	8.6	4.9	1.6
-"	129-170	6.8	26.5	8.1	0.35	0.038	9.2	3.1	1.4

Примечание: в.с.п. – воздушно-сухая почва.

ные для почв наземных экосистем. Согласно данным люминесцентной микроскопии (табл. 2), максимум численности прокариот, спор микроскопических грибов и их мицелия приходится на верхние слои почвы, где сосредоточена основная масса корней травянистых растений (АУ) и их опад (W). На глубине ниже 6 см от поверхности почвы численность бактерий и спор микромикетов снижается на порядок и более, при этом мицелий микроскопических грибов глубже 20 см не встречается.

Полученные данные по численности бактерий, спор и длины мицелия микромикетов отражают особенности распределения органического вещества в профиле почвы, условий увлажнения и развития глеевых процессов. Благодаря аккумуляции питательных веществ и оптимальной аэрированности основная масса почвенных микроорганизмов сосредоточена в верхней толще корнеобитаемого слоя (до глубины 20 см), где при достаточных запасах продуктивной влаги складываются наиболее благоприятные условия газообмена с атмосферным воздухом. Ухудшение условий функционирования микроорганизмов в переувлажненных горизонтах почв, характеризующихся уплотнением и развитием процессов оглеения, даже при достаточно высоком содержании органических веществ (содержание гумуса около 4.5%), обуславливает не только снижение численности микроорганизмов, но и снижение в составе бактериальной составляющей микробных комплексов доли живых, функционально активных клеток прокариот. В верхних хорошо аэрируемых горизонтах почвы (глубина 0-20 см) доля мертвых клеток не превышает 15% от общего числа бактерий, в оглеенных горизонтах АУра, g и Bg она составляет уже 30-33%, а в нижележащей толще слоистого аллювия – 50%.

Распределение микробной биомассы по профилю почвы согласуется с распределением численности микроорганизмов. Основную роль в структуре микробной биомассы верхних горизонтов почвы играют микроскопические грибы

(табл. 3). На долю их спор и мицелия в слое ветоши (горизонт W), где идут основные процессы трансформации растительного опада, приходится до 80.8% общей микробной биомассы. Вниз по профилю вклад микроскопических грибов в суммарную биомассу микроорганизмов снижается, составляя на глубине 6-20 см 74.9%, а в нижней части гумусированной толщи, где вследствие застоя влаги складываются анаэробные условия и интенсифицируется глеевый процесс, – 42.6-57.1%. В подстилающем слоистом аллювии, микробные комплексы которого характеризуются низкими величинами суммарной биомассы (2.8-3.5 мг/г а.с.п.), на первый план выходят прокариоты, доля которых определяется величинами порядка 48.6-57.1% общей суммарной биомассы микроорганизмов, второй составляющей являются споры микромикетов. Присутствие последних в нижних горизонтах профиля аллювиальной почвы может объясняться возможностью их нисходящей миграции с током влаги по поровому пространству песчано-супесчаной толщи аллювиальных почв, отличающейся значительной порозностью (Лаптева, 2000).

Показатели численности и биомассы микроорганизмов в почве рассмотренной постагрогенной экосистемы, формирующейся в биоклиматических условиях тундры, близки к микробиологическими показателями почв более южных широт (Распределение численности..., 1995; Широких, 2001; Добровольская, 2005; Микробные сообщества..., 2014). По всей видимости, особенности ландшафтных условий – расположение постагрогенного участка в долине реки, специфика растительного сообщества – формирование злаково-разнотравного фитоценоза, хоть и редкое (в годы с максимальным уровнем подъема паводковых вод), но дополнительное поступление элементов питания с паводковым аллювием, близкая к нейтральной реакция среды, а также общий тренд повышения в последние десятилетия среднегодовых температур в регионе (Kaverin, Rastukhov, 2016) способствовали развитию в аллю-

Таблица 2

Численность прокариот, спор грибов и длина грибного мицелия в почве постагрогенной экосистемы, $X \pm \Delta^*$

Горизонт	Глубина, см	Численность бактерий, млрд./г а.с.п.**			Численность спор грибов, млн./г а.с.п.	Длина мицелия грибов, м/г а.с.п.
		Общая	Живые клетки	Мертвые клетки		
W	0-2	2.0±0.2	1.7±1.2	0.3±0.1	22.3±1.3	98.6±22.3
АУ	2-6	1.3±0.2	1.1±0.3	0.2±0.1	18.8±1.2	45.6±11.6
АУра	6-20	0.7±0.2	0.6±0.1	0.1±0.05	3.6±1.1	16.5±5.2
АУра,g	20-30	0.3±0.07	0.2±0.05	0.1±0.05	1.2±0.1	Не обнар.
Bg	30-45	0.1±0.05	0.07±0.05	0.03±0.01	1.2±0.2	Не обнар.
С [~]	45-111	0.1±0.03	0.05±0.01	0.03±0.01	0.8±0.1	Не обнар.
Сg [~]	111-128	0.1±0.02	0.05±0.01	0.05±0.01	0.8±0.07	Не обнар.
-“-	129-170	0.1±0.02	0.05±0.01	0.05±0.01	0.5±0.04	Не обнар.

Примечание: здесь и далее *X – среднее значение, Δ – стандартное отклонение; **а.с.п. – абсолютно сухая почва.

Таблица 3

Распределение биомассы микроорганизмов по почвенному профилю, Х₂Д

Горизонт	Глубина, см	Биомасса, мкг/г а.с.п.			
		Бактерии	Споры грибов	Мицелий грибов	Общая
W	0-2	40.8±12.3	45.3±19.6	126.6±22.3	212.7±21.3
AY	2-6	26.3±13.5	36.7±14.2	65.6±11.6	128.6±14.6
AУра	6-20	14.8±11.4	17.6±2.3	26.6±5.2	59.0±6.3
AУра.g	20-30	6.2±2.1	4.6±1.2	0	10.8±1.2
Bg	30-45	2.1±0.7	2.8±0.8	0	4.9±1.2
C [~]	45-111	1.7±0.5	1.8±0.5	0	3.5±1.2
Cg [~]	111-128	1.6±0.3	1.2±0.4	0	2.8±0.8
-"	129-170	1.6±0.3	1.2±0.3	0	2.8±0.6

Таблица 4

Видовой состав и обилие видов микромицетов в почве постагрогенной экосистемы

Виды	Обилие вида, %
Zygomycota	
<i>Mortierella alpina</i> Peyron	0.5
<i>Mortierella</i> sp.	0.5
<i>Mucor circinelloides</i> Tiegh.	0.9
<i>M. hiemalis</i> Wehmer	1.4
<i>M. racemosus</i> Fresen.	2.3
<i>Mucor</i> sp.	0.5
<i>Umbelopsis isabellina</i> (Oudem.) W. Gams	3.6
<i>U. ramanniana</i> (Moller) W. Gams	7.7
<i>U. vinacea</i> (Dixon.) W. Gams	0.5
Ascomycota	
<i>Aspergillus candidus</i> Link	0.9
<i>Aspergillus ochraceus</i> G. Wilh	0.5
<i>Aureobasidium pullulans</i> (de Bary & Lowenthal) G. Arnaud	0.5
<i>Botrytis pyramidalis</i> (Bonord.) Sacc.	1.8
<i>Cephalosporium</i> sp.	1.4
<i>Cladosporium cladosporioides</i> (Fresen.) G.A. de Vries	20.5
<i>Cl. herbarum</i> (Pers.) Link	13.6
<i>Fusarium</i> sp.	0.5
<i>Geomyces pannorum</i> (Link) Sigler & J.W. Carmich	4.1
<i>Monocillium</i> sp.	0.5
<i>Penicillium camemberti</i> Thom	5.0
<i>P. dierckxii</i> Biourge	0.5
<i>P. funiculosum</i> Thom	0.9
<i>P. implicatum</i> Biourge	1.4
<i>P. kapuscinskii</i> Zaleski; Raper a. Thom	4.6
<i>P. raistrickii</i> G. Sm.	0.5
<i>P. tardum</i> Thom	0.5
<i>P. thomii</i> K.M. Zaleski	1.4
<i>Penicillium</i> sp.	5.5
<i>Torula</i> sp.	0.5
<i>Trichoderma piluliferum</i> J. Webster & Rifai	0.5
<i>T. polysporum</i> (Link) Rifai	0.5
<i>Trichoderma</i> sp.	4.1
Неидентифицированные виды	
<i>Mycelia sterilia</i> светлоокрашенный	8.6
<i>Mycelia sterilia</i> темноокрашенный	3.6

виальной постагрогенной почве функционально активного (с преобладанием живых клеток бактерий), богатого по величине микробной биомассы комплекса микроорганизмов. Избыточный пул микроорганизмов, который, как правило, увеличивается в экосистемах с экстремальными условиями обитания (Звягинцев, 1987), является одной из главных причин устойчивости почвы к неблагоприятным воздействиям как природного, так и антропогенного характера (Полянская, 1997).

В результате детального микологического анализа из почвы исследованной постагрогенной экосистемы выделено 32 вида микроскопических грибов. Большинство из них относится к сахаролитическим грибам. К целлюлозолитикам принадлежит небольшая группа микромицетов, представленная видами рода *Trichoderma* и *Geomyces pannorum*. Большинство зарегистрированных видов относится к анаморфным грибам, которые имеют аскомицетный аффинитет. Среди них доминирующее положение занимает род *Penicillium*, насчитывающий 9 видов. Зигомицеты представлены 9 видами, относящимися к родам *Mucor* (4 вида), *Umbelopsis* (3) и *Mortierella* (2). Остальные роды насчитывают в основном 1-2 вида (табл. 4).

При относительно большом видовом разнообразии рода *Penicillium* обилие их представителей невелико (табл. 4). Наиболее представлены виды *Penicillium camemberti* и *P. kapuscinskii*, которые часто регистрируют в северных почвах. Значительным обилием отличаются также виды рода *Cladosporium*, прежде всего – *Cl. cladosporioides* и *Cl. herbarum*, которые приурочены к почвам, формирующимся под сообществами травянистых растений. Из зигомицетов наибольшим обилием характеризуются виды рода *Umbelopsis*. Обилие также *Mycelia sterilia*, который является типичным доминирующим компонентом тундровых почв (Паринкина, 1989; Кирцидели, 1997; Хабибуллина, 2009).

Большинство обнаруженных видов микромицетов по частоте встре-

Таблица 5

Структура комплекса типичных видов микромицетов почвы постагрогенной экосистемы

Доминирующие (ЧВ* >60%)	Виды	
	Частые (ЧВ 30-60%)	Редкие (ЧВ 10-30%)
<i>Cladosporium cladosporioides</i>	<i>Cladosporium herbarum</i>	<i>Penicillium kapuscinskii</i>
<i>Umbelopsis ramanniana</i>	<i>Penicillium camemberti</i>	<i>Geomyces pannorum</i>
<i>Penicillium</i> sp.	<i>Mycelia sterilia</i> (темноокрашенный)	<i>Cephalosporium</i> sp.
<i>Mycelia sterilia</i> (светлоокрашенный)		<i>Mucor hiemalis</i>
		<i>M. racemosus</i>
		<i>Mucor</i> sp.

Примечание: *ЧВ – частота встречаемости (доля, % числа образцов, в которых был обнаружен данный вид, в общем числе образцов).

чаемости относятся к редким и случайным видам (табл. 5). Доминирующие по обилию виды имели также наибольшую частоту встречаемости, составляя основу комплекса типичных видов микромицетов исследуемой почвы. К доминантам принадлежат *Cladosporium cladosporioides*, *Umbelopsis ramanniana*, *Penicillium* sp. и светлоокрашенная форма стерильного мицелия. К часто встречающимся видам отнесены *Cladosporium herbarum*, *Penicillium camemberti* и темноокрашенный стерильный мицелий. Все эти грибы являются космополитами, обильно спорулирующими и быстрорастущими видами. Вероятно, именно эти свойства обуславливают их перевес в формировании грибных комплексов в сопоставлении с другими таксонами микроскопических грибов.

В целом, анализ данных видового состава микромицетов показал, что их качественное разнообразие по сравнению с микробными комплексами почв таежной зоны Республики Коми невелико. Микоценозы почв, формирующиеся под пологом хвойных лесов, значительно богаче по видовому составу микроскопических грибов (Биологическое разнообразие..., 2005; Экологические принципы..., 2009; Хабибуллина, 2009).

Заключение

В условиях тундровой зоны при прекращении хозяйственного использования «однолетняя» агроэкосистема (посев овса, овсяно-горохой смеси), созданная в пойме р. Воркуты, преобразовалась через стадию залежи в многолетнее разнотравно-злаковое сообщество, под влиянием которого трансформировалась и почва. Установлено, что наибольшая численность микроорганизмов характерна для верхних горизонтов почвы. Численно бактерии преобладают над грибами в сотни раз. Анализ соотношения живых и мертвых клеток бактерий показал, что в верхних горизонтах численность живых клеток выше, что свидетельствует об активности бактериального компонента микробоценоза в почве постагрогенной экосистемы. На количество микробной биомассы влияет не только питательный, но и водно-воздушный режим почвы. В верхних горизонтах почвы доминируют микроскопические грибы, на долю которых приходится около 80% общей микробной биомассы, в нижних – прокариоты. В гумусоаккумулятивном горизонте (глубина 0-20 см) мицелий грибов преобладает над спорами, в более глубоких горизонтах морфобиологическая структура биомассы микромицетов представлена только спорами.

Сообщество почвенных микромицетов характеризуется относительно невысоким видовым разнообразием при доминировании аскомицетов с ведущим положением представителей рода *Penicillium*. По обилию и частоте встречаемости доминируют виды рода *Cladosporium* и стерильные формы мицелия. Комплекс типичных видов представлен видами-космополитами, которые часто встречаются в северных почвах.

Анализируя опыт изучения многолетних сеяных лугов на Крайнем Севере (Особенности природопользования..., 1998; Биологическое разнообразие..., 2005; Экологические принципы..., 2009), можно предположить, что сформированный в процессе постагрогенной сукцессии фитоценоз будет достаточно устойчивым. В сочетании с относительной консервативностью почв как компонентов наземных экосистем это будет препятствовать внедрению видов, типичных для зональной растительности, на последующих этапах постагрогенной сукцессии. Не исключено, что микробное сообщество, находясь в достаточно стабильных почвенных условиях, будет сохранять свои характеристики в течение длительного времени в рамках данной конкретной экосистемы.

Известно, что микробоценозы постагрогенных почв при демуляции теряют признаки «окультуривания» и приобретают признаки, характерные для микробных комплексов ненарушенных почв. Микробиологические характеристики почвы меняются согласно классической схеме восстановительной сукцессии. Для окультуренных почв типичны низкие значения численности, биомассы и видового разнообразия микроорганизмов. В микробоценозах залежей эти показатели возрастают, а в климаксовых сообществах вновь несколько снижаются (Сорокина, 2007; Особенности изменения..., 2012; Телеснина, 2015). Однако схема демуляции, выявленная для таежной зоны, может не соответствовать условиям тундры. В связи с тем, что изучение этого вопроса в тундровой

зоне только начинается, необходимо продолжение исследований почвенных микробных сообществ в постагрогенных экосистемах юго-востока Большеземельской тундры.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Комплексной программы УрО РАН № 15-12-4-45 «Функционирование и эволюция экосистем криолитозоны европейского северо-востока России в условиях антропогенных воздействий и изменения климата».

ЛИТЕРАТУРА

Биологическое разнообразие и продуктивность антропогенных экосистем Крайнего Севера / А. Н. Панюков, Н. С. Котелина, И. Б. Арчегова, Ф. М. Хабибуллина. – Екатеринбург, 2005. – 120 с.

Головченко, А. В. Сезонная динамика численности и биомассы микроорганизмов по профилю почвы / А. В. Головченко, Л. М. Полянская // Почвоведение. – 1996. – № 10. – С. 1227-1233.

Гузэль, Н. И. Изменения почвенного покрова при зарастании бывших сельскохозяйственных земель на Карельском перешейке / Н. И. Гузэль // Материалы по изучению русских почв. – 1999. – № 1. – С. 10-13.

Динамика некоторых свойств постагрогенных почв южной тайги в связи с особенностями смены растительности / А. С. Владыченский, В. М. Телеснина, К. А. Румянцев, С. И. Филимонова // Вестн. Московского ун-та. – Сер. 17. Почвоведение. – 2009. – № 1. – С. 3-11.

Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв / Д. И. Люри, С. В. Горячкин, Н. А. Караваяева, Е. А. Денисенко, Т. Г. Нефедова. – М. : ГЕОС, 2010. – 412 с.

Добровольская, Т. Г. Особенности таксономического состава бактериальных комплексов торфяников разного генезиса / Т. Г. Добровольская, О. С. Кухаренко, А. В. Головченко // Болота и биосфера : материалы 4-й научной школы. – Томск, 2005. – С. 169-174.

Естественное восстановление микробиологических свойств дерново-подзолистой почвы в условиях залежи / С. Н. Сазанов, Н. А. Манучарова, М. В. Горленко, М. М. Умаров // Почвоведение. – 2005. – № 5. – С. 575-580.

Звягинцев, Д. Г. Почва и микроорганизмы / Д. Г. Звягинцев. – М. : Наука, 1987. – 245 с.

Кирцидели, И. Ю. Почвенные микромицеты архипелага Северная Земля / И. Ю. Кирцидели // Микология и фитопатология. – 1997. – Т. 34. – Вып. 6. – С. 1-6.

Классификация и диагностика почв России. – Смоленск : Ойкумена, 2004. – 343 с.

Корчагин, А. А. Полевая геоботаника / А. А. Корчагин. – М.-Л. : Наука, 1964. – 532 с.

Кураков, А. В. Методы определения и характеристики комплексов микроскопических грибов наземных экосистем: учебно-методическое пособие / А. В. Кураков. – М. : Макс Пресс, 2001. – 92 с.

Лаптева, Е. М. Микробиота аллювиальных почв средней тайги / Е. М. Лаптева, Ф. М. Хабибуллина,

Ю. П. Пелихова. – Сыктывкар, 2000. – 32 с. – (Сер. науч. докл. Коми науч. центр УрО РАН, Вып. 426).

Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Д. Г. Звягинцева. – М. : МГУ, 1991. – 304 с.

Микробные сообщества подзолистых почв на вырубках среднетаежных еловых лесов / Ю. А. Виноградова, Е. М. Лаптева, Е. М. Перминова, С. С. Анисимов, А. Б. Новаковский // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – Т. 16. – № 5. – С. 74-80.

Орлов, Д. С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации / Д. С. Орлов. – М. : МГУ, 1990. – 325 с.

Особенности изменения структуры микробной биомассы почв в условиях залежи / Л. М. Полянская, Н. И. Суханова, К. В. Чакмазян, Д. Г. Звягинцев // Почвоведение. – 2012. – № 7. – С. 792-798.

Особенности природопользования и перспективы природовосстановления на крайнем севере России / Н. С. Котелина, И. Б. Арчегова, Г. Г. Романов, Л. П. Турубанова. – Екатеринбург: УрО РАН, 1998. – 148 с.

Панюков А. Н. Однолетние агрофитоценозы в тундровой зоне – создание и трансформация / А. Н. Панюков // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2009. – № 4(15). – С. 39-42.

Паринкина, О. М. Микрофлора тундровых почв / О. М. Паринкина. – Л. : Наука, 1989. – 159 с.

Полевой определитель почв. – М. : Почвенный ин-т им. В. В. Докучаева, 2008. – 182 с.

Полянская, Л. М. Изменение состава микробной биомассы в почве при окультуривании / Л. М. Полянская, С. М. Лукин, Д. Г. Звягинцев // Почвоведение. – 1997. – № 2. – С. 206-212.

Почвы Коми АССР. – М. : Изд-во АН СССР, 1958. – 199 с.

Распределение численности и биомассы микроорганизмов по профилям зональных типов почв / Л. М. Полянская, В. В. Гейдебрехт, А. Л. Степанов, Д. Г. Звягинцев // Почвоведение. – 1995. – № 3. – С. 322-328.

Сорокина, О. А. Влияние сосняков разного возраста на биологическую активность залежных почв среднего Приангарья / О. А. Сорокина, Н. Д. Сорокин // Почвоведение. – 2007. – № 5. – С. 627-634.

Телеснина, В. М. Постагрогенная динамика растительности и свойств почвы в ходе демулационной сукцессии в южной тайге / В. М. Телеснина // Лесоведение. – 2015. – № 4. – С. 293-306.

Хабибуллина, Ф. М. Почвенная микобиота естественных и антропогенно нарушенных экосистем северо-востока европейской части России: дис. ... доктора биол. наук: 03.00.16 / Ф. М. Хабибуллина. – Сыктывкар, 2009. – 364 с.

Хантимер, И. С. Залужение – основа обеспечения кормами молочного животноводства в тундре / И. С. Хантимер // Сообщества Крайнего Севера и человек. – М. : Наука, 1985. – С. 115-133.

Хантимер, И. С. Сельскохозяйственное освоение тундры / И. С. Хантимер. – Л. : Наука, 1974. – 227 с.

Черепанов, С. К. Сосудистые растения России и сопредельных государств / С. К. Черепанов. – СПб : Мир и семья-95, 1995. – 992 с.

Широких, А. А. Профильное распределение численности и биомассы микроорганизмов в дерново-подзолистых почвах Кировской области / А. А. Широких, И. Г. Широких, Л. М. Полянская // Почвоведение. – 2001. – № 7. – С. 845-851.

Экологические основы управления продуктивностью агрофитоценозов восточноевропейской тундры / И. Б. Арчегова, Н. С. Котелина, Л. К. Грунина, Г. Г. Романова, Л. П. Турубанова, Е. С. Братенкова. – Л. : Наука, 1991. – 152 с.

Экологические принципы природопользования и природовосстановления на Севере / И. Б. Арчегова, Е. Г. Кузнецова, И. А. Лиханова, А. Н. Панюков, Ф. Х. Хабибуллина, Г. Г. Осадчая. – Сыктывкар, 2009. – 176 с.

Domsh, K. H. Compendium of soil fungi / K. H. Domsh, W. Gams, T.-H. Anderson // IHW-Verlag Eching. – 2007. – 672 p.

Kaverin, D. Ground temperature and active layer monitoring at southern permafrost limit (Northeast European Russia) [Электронный ресурс] / D. Kaverin, A. Pastukhov // XI International Conference on Permafrost: Book of Abstracts. – Potsdam, 2016 – Режим доступа: <https://www.conftool.pro/icop2016/index.php?page=adminPapersBro>.

Ramirez, C. Manual and atlas of the Penicillia / C. Ramirez // Amsterdam-N.-Y.-Oxford : Elsevier Biomedical Press, 1982. – 874 p.

MICROBIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF SOIL OF POSTAGROGENIC BIOGEOCOENOSIS IN TUNDRA

V. A. Kovaleva, S.V. Deneva, A. N. Panjukov

Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktывkar

Summary. In the tundra zone, the post-agrogenic ecosystem transformed to a fallow after the annual crops cultivation was stopped. After 10 years period, forb-grass meadow with specific soil and microbial community occurred at the model site. The authors studied number of microorganisms in the soil and soil microorganisms community composition and structure in the post-agrogenic ecosystems. The results showed that the most of microorganisms occurred in the upper soil horizons. The number of bacteria was hundred times higher than fungi. Analysis of the bacteria live/dead cells ratio showed that the most of bacteria is in active state. Fungi biomass was higher than bacteria; soil fungi represented 80% of the total biomass. Mycelium was found only down to 20 cm depth. Below this depth, only fungal spores were found. The genus *Penicillium* dominated in the species composition of fungi. By abundance and frequency of occurrence, species of the genus *Cladosporium* and sterile forms of mycelium dominated. Complex of typical soil fungi species was represented by cosmopolite species common in the northern soils.

Key words: tundra soil, post-agrogenic ecosystem, microbial community, microbial biomass

**ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ГУМИНОВЫХ И ФУЛЬВОКИСЛОТ
ПОЧВ ТАЕЖНЫХ И ТУНДРОВЫХ ЛАНДШАФТОВ****Е.Д. Лодыгин, В.А. Безносиков, Р.С. Василевич***Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, Сыктывкар
E-mail: soil99@mail.ru*

Аннотация. Проведено систематическое изучение элементного состава препаратов гуминовых (ГК) и фульвокислот (ФК) почв разных климатических зон Республики Коми. ГК почв таежной зоны в большей степени обогащены азотом, а ФК – кислородом по сравнению с тундровыми почвами. Структура ГК и ФК тундровых почв характеризуется наличием развитой алифатической части макромолекул и низкой степенью ароматичности.

Ключевые слова: почва, гуминовые и фульвокислоты, элементный состав, тайга, тундра

Введение

Элементный состав гумусовых веществ (ГВ) – одна из важнейших характеристик, которая используется в качестве показателя уровня гумификации, окисленности ГК и ФК и для косвенной оценки степени их конденсированности. ГК и ФК являются группами высокомолекулярных соединений, характеризующихся нестехиометричностью состава, нерегулярностью строения, гетерогенностью структурных элементов и полидисперсностью макромолекул.

ГК и ФК являются неотъемлемой частью гумуса, участвующего в обеспечении устойчивости экосистем через реализацию их различных экологических функций. Они играют существенную роль в круговороте веществ и потоке энергии, влияют на рост и развитие живых организмов, связанных с почвой, выступают как регулятор почвенных процессов. ГК и ФК, в том числе и их элементный состав, во времени (Дергачева, 2011; Трансформация..., 2012; Элементный..., 2012) отражают в структуре и свойствах особенности био-климатической обстановки, в которой они формируются (Абакумов, 2009; Завьялова, 2011; Могузова, 2012).

Д.С. Орлов (1974) показал, что распределение углерода в ГК и ФК одного типа почв аппроксимируется законом нормального распределения, причем коэффициенты варьирования зависят от типа почвы. Им были установлены средние значения содержания углерода в гумусовых кислотах главных типов почв. Эти данные позволили сделать вывод, что ГК и ФК – не случайная смесь органических соединений, и их состав зависит от условий почвообразования. Однако, помимо углерода, водорода, кислорода, азота и серы в состав всех выделенных препаратов гумусовых кислот входит и неорганическая часть, состоящая из зольных элементов (преимущественно ионов металлов, оксидов кремния и алюминия).

Для познания свойств ГВ, обеспечивающих выполнение ими экосистемных функций, требуется расширение знаний об элементном составе этих компонентов гумуса современных почв раз-

личных природных зон и почвенных провинций в разнообразных экологических условиях (Некрасова, 2013; Максимова, 2014).

Цель работы – выявить закономерности элементного состава гуминовых и фульвокислот в естественных почвах таежной и тундровой зон европейского северо-востока России.

Объекты и методы

Объектами исследований послужили почвы южной тайги: дерново-подзолистые (Umbric Albeluvisols) (World reference base..., 2006); средней тайги: типичные подзолистые (Haplic Albeluvisols) и торфянисто-подзолисто-глееватые (Stagnic Histic Albeluvisols); северной тайги: глееподзолистые (Stagnic Albeluvisols), торфянисто-подзолисто-глееватые; южной тундры: тундровые поверхностно-глеевые (Stagnic Cambisols), торфянисто-тундровые глеевые (Histic Gleysols) и торфяно-тундровые глеевые (Histic Cryosols). Материал собран на территории Республики Коми (рис. 1). При отборе почвенных образцов был использован маршрутный метод, позволяющий учитывать закономерности формирования почвенного покрова в ландшафтах: от водораздела (автоморфные почвы) до геохимически подчиненных ландшафтов – понижений (гидроморфные почвы) в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-83 (2008) и ГОСТ 17.4.4.02-84 (2008). Характеристика климата районов исследования приведена в табл. 1 (Атлас по климату..., 1997).

Исследования в подзоне южной тайги проводили на Летском стационаре отдела почвоведения Института биологии Коми НЦ УрО РАН. Согласно почвенно-географическому районированию, данная территория относится к Летскому округу дерново-подзолистых почв Среднерусской провинции (Атлас почв..., 2010). Разрез дерново-подзолистой почвы расположен в 1 км к северо-западу от дер. Крутотыла Прилузского р-на на пологом склоне увала западной экспозиции в березово-осиново-еловом лесу. Координаты разреза: 59°38'0.0" с.ш., 49°21'36.5" в.д. Абсолютная высота над уровнем моря около 180 м. Уклоны

не превышают 0.02. Колебания отметок нано- и микрорельефа на плакоре не превышают 23 см, на склоне – 20 см, размеры и глубины их незначительно увеличиваются в ложбине за счет пристволовых бугорков и ветровальных нарушений. В травяно-кустарничковом покрове обычны черника миртолистная (*Vaccinium myrtillus* L.), косяника каменистая (*Rubus saxatilis* L.), грушанка (*Pyrola* L.), кислица обыкновенная (*Oxalis acetosella* L.). Напочвенный покров из зеленых мхов развит слабо.

Исследования почв, широко распространенных в подзоне средней тайги, проведены на Максимовском стационаре отдела почвоведения Института биологии. Согласно почвенно-географическому районированию, данная территория относится к Сысольскому округу типичных подзолистых и торфянисто-подзолисто-глееватых почв Сысола-Вычегодской провинции (Путеводитель..., 2002). Разрез типичной подзолистой почвы заложен в 8 км к западу от Сыктывкара на вершине водораздельного холма, абсолютная высота над уровнем моря составляет 170 м, на гребне микроповышения высотой около 1.5 м. Координаты разреза: 61°39'44.6" с.ш., 50°41'10.4" в.д. Березово-еловый лес чернично-зеленомошный. Разрез торфянисто-подзолисто-глееватой почвы заложен в 74 м от разреза типичной подзолистой почвы. Координаты разреза: 61°39'42.4" с.ш., 50°41'08.4" в.д. Абсолютная высота над уровнем моря около 160 м. Березово-еловый долгомошно-сфагновый лес. Вблизи разреза – сфагновый покров.

Исследования почв в подзоне северной тайги проведены в 3 км к западу от пос. Троицко-Печорск. Согласно почвенно-географическому районированию, данная территория относится к Ижма-Печорскому округу подзолов иллювиально-гумусово-железистых, торфянисто- и торфяно-подзолисто-глеевых иллювиально-гумусовых, глееподзолистых и болотно-подзолистых почв Тимано-Печорской провинции (Атлас почв..., 2010). Изученный ряд почв располагается на плоской вершине водораздельного увала.

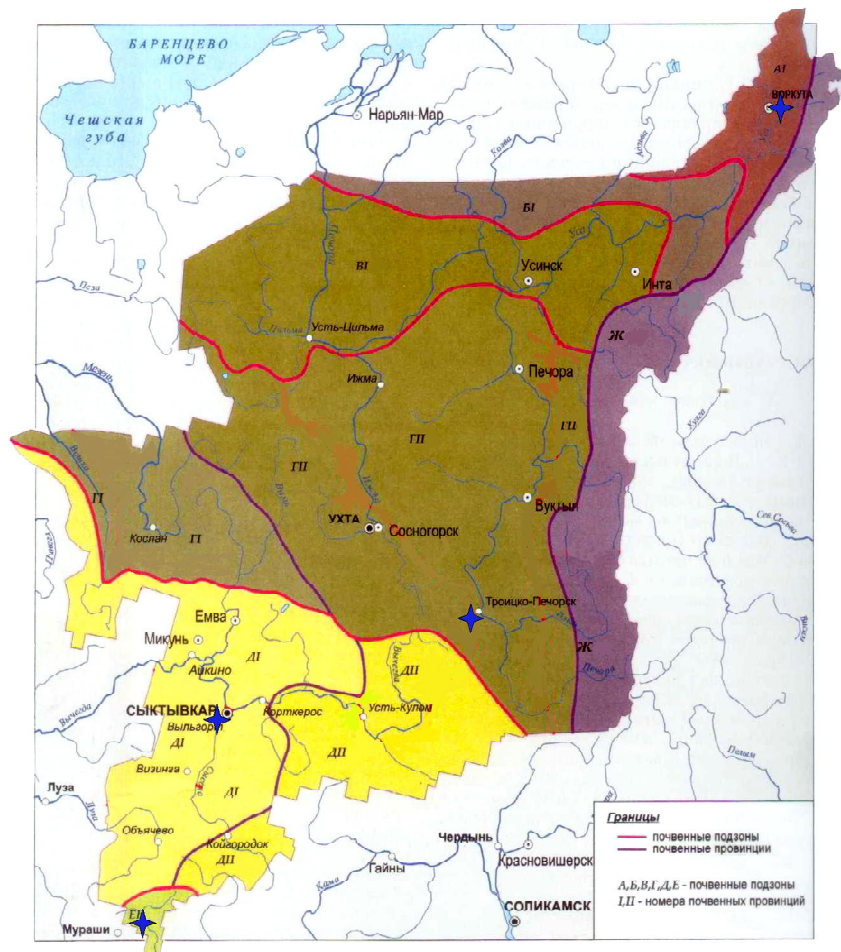


Рис. 1. Места расположения точек пробоотбора (◆): А – подзона южной тундры; А1 – Большеземельская провинция. Б – подзона лесотундры; Б1 – Канино-Печорская провинция. В – подзона крайнесеверной тайги; В1 – Печора-Усинская провинция. Г – подзона северной тайги: Г1 – Мезень-Тиманская провинция, Г2 – Тимано-Печорская провинция. Д – подзона средней тайги: Д1 – Сысола-Вычегодская провинция, Д2 – Вычегодская провинция. Е – подзона южной тайги: Е1 – Среднерусская провинция. Ж – Уральская горная провинция.

Таблица 1
Климатические условия районов исследования

Параметры климата	Южная тайга	Средняя тайга	Северная тайга	Южная тундра
Среднегодовая температура воздуха, °С	+1.3	+0.5	-1.1	-5.5
Средняя температура воздуха, °С:				
самого теплого месяца (июль)	+17.0	+16.7	+16.0	+13.4
самого холодного месяца (январь)	-14.3	-15.3	-17.8	-20.1
Продолжительность периода со среднесуточной температурой, дней:				
выше 0 °С	202	190	175	125
выше 5 °С	151	140	135	90
выше 10 °С	110	100	92	43
Глубина промерзания почвы, см	43	89	101	139
Мощность снежного покрова, см	61	60	64	74
Годовая сумма осадков, мм	622	560	590	548
в том числе в летний период, мм	218	195	201	172

Глееподзолистые почвы, формирующиеся под еловыми зеленомошными лесами, занимают периферическую часть вершины. Под еловыми долгомошными и сфагново-долгомошными лесами ближе к центру увала развиваются торфянисто-подзолисто-глееватые почвы. Разрез глееподзолистой почвы заложен на вершине плоского межручейного увала. Координаты разреза: 62°41'21.0" с.ш., 56°08'59.1" в.д. Абсолютная высота над уровнем моря около 140 м. Ельник чернично-зеленомошный, в травяно-кустарничковом покрове доминирует черника, в напочвенном покрове – зеленые мхи. Разрез торфянисто-подзолисто-глеевой почвы расположен в 60 м от участка с глееподзолистой почвой на пологом слабо дренированном привершинном склоне увала. Координаты разреза: 62°41'23.0" с.ш., 56°08'58.2" в.д. Абсолютная высота над уровнем моря около 140 м. Ельник сфагново-долгомошный, в травяно-кустарничковом ярусе доминируют брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.), хвощ (*Equisetum* L.), осока шаровидная (*Carex globularis*), морошка (*Rubus chamaemorus* L.), в напочвенном покрове присутствуют в небольшом количестве гипновые мхи.

Исследования тундровых почв проведены в Воркутинском районе Республики Коми в Большеземельской тундре на участках с распространением массивно-островной многолетней мерзлоты. Согласно почвенно-географическому районированию, данная территория относится к Воркутинскому округу тундровых поверхностно-глеевых, торфянисто- и торфяно-тундровых глеевых мерзлотных почв Большеземельской провинции (Атлас почв..., 2010). Территория представляет собой полого-увалистую равнину, покрытую чехлом покровных пылеватых суглинков мощностью менее 10 м (Безносиков, 2012). Разрез тундровой поверхностно-глеевой почвы заложен на пологом склоне моренного увала Нерусовой-мусюр. Координаты разреза: 67°31'57.5" с.ш., 64°07'8.5" в.д. Абсолютная высота над уровнем моря около 220 м. Ивняково-ерниковая моховая мелкобугорковатая тундра, в растительном покрове преобладают гипновые мхи с примесью политриховых, брусника, редко встречаются осоки (*Carex* sp.), единично – экземпляры березы карликовой (*Betula nana* L.). Разрез торфянисто-тундровой глеевой почвы заложен на средней части юго-западного склона, уклон 3°. Координаты разреза: 67°35'26.6" с.ш., 64°09'54.3" в.д. Абсолютная высота над уровнем моря около 150 м. Мохово-лишайниковый покров, политриховые и сфагновые мхи, лишайники, водяника черная (*Empetrum nigrum* L.), багульник (*Ledum* sp.), по бугоркам – морошка, голубика обыкновенная (*Vaccinium uliginosum* L.). Микрорельеф бугорковатый, бугры высотой до 40 см, диаметром до 1.5 м. Межбугорковое понижение. Разрез торфяно-тундровой глеевой почвы заложен на средней части юго-западного склона, уклон 3°, в 100 м к югу от разре-

за торфянисто-тундровой глеевой почвы. Координаты разреза: 67°35'23.5" с.ш., 64°09'53.1" в.д. Абсолютная высота над уровнем моря около 140 м. Разрез заложен на бугорке.

Содержание углерода, азота и водорода в препаратах ГК и ФК определяли газохроматографически на элементном анализаторе EA-1110 (Carlo Erba, Италия) в соответствии с аттестованными методиками количественного химического анализа (Методика выполнения..., 2009; Кондратенко, 2011) в ЦКП «Хроматография» Института биологии Коми НЦ УрО РАН. Зольность препаратов ГК определяли по ГОСТ 11306-83 (1995), кислород – по разнице между 100% и суммой массовой (мольной) долями углерода, азота и водорода. Статистическую обработку данных проводили с использованием прикладных программ Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Данные элементного состава гуминовых кислот изученных почв показывают (табл. 2 и 3), что для них характерна высокая обуглероженность по сравнению с фульвокислотами. В ГК мольная доля (x) углерода составляет 32.2-42.9%, в ФК – 26.4-37.5 (рис. 2), x(O) в ГК варьирует от 12.5 до 22.0%, ФК – 24-42%.

По содержанию углерода препараты ГК и ФК можно разделить на две группы: 1) с пониженной x (C) до 37% для ГК и до 31% – для ФК; 2) с повышенной x (C) – свыше 37% для ГК и свыше 31% – для ФК. В первую группу входят, как правило, ГК элювиальных горизонтов, во вторую – органогенных и иллювиальных. Изменение элементного состава препаратов ФК по профилю обусловлено вымыванием их низкоуглеродистых молекул из органогенных горизонтов.

Изменение мольной доли кислорода в ГК по профилю не имеет ярко выраженной закономерности. Для ФК установлено увеличение содержания кислорода по профилю как таежных, так и тундровых почв, что обусловлено лучшей растворимостью кислородобогащенных гидрофильных молекул ФК и их миграцией в нижележащие минеральные горизонты.

Содержание азота в гуминовых кислотах в среднем в два раза выше, чем в фульвокислотах, что подтверждают результаты химического анализа и атомное отношение C/N: для ГК – 8.6-31.2, ФК – 13.3-64.3. В профильном распределении азота в препаратах ГК и ФК отмечается тенденция к его снижению. Гуминовые и фульвокислоты дерново-подзолистых почв в большей степени обогащены азотом по сравнению с другими исследованными почвами.

Для изображения состава трехкомпонентных систем Дж. Гиббсом был предложен равносторонний треугольник, на который нанесена координатная сетка в виде линий, параллельных сторонам треугольника (рис. 2). Вершина треугольни-

Таблица 2

Распределение и элементный состав гуминовых кислот почв

Горизонт	Глубина, см	Содержание, %				Атомные отношения			(H/C) _{исп} *	Степень окисленности (ω)
		C	H	O	N	H/C	O/C	C/N		
Южная тайга										
Дерново-подзолистая почва										
A0Адер.	0-4	<u>53.5±1.7</u> 38.3±1.2	<u>4.5±0.4</u> 39±4	<u>38±4</u> 20.2±2.4	<u>4.37±0.29</u> 2.68±0.18	1.01	0.53	14.3	1.72±0.05	+0.04
A2'	4-15	<u>54.1±1.7</u> 39.0±1.2	<u>4.4±0.4</u> 38±4	<u>36±4</u> 19.4±2.3	<u>5.7±0.4</u> 3.53±0.24	0.97	0.50	11.0	1.64±0.05	+0.02
A2"	15-28	<u>56.1±1.8</u> 39.3±1.3	<u>4.7±0.4</u> 40±4	<u>33±4</u> 17.2±2.0	<u>6.4±0.4</u> 3.83±0.26	1.01	0.44	10.3	1.60±0.05	-0.14
A2B	28-43	<u>48.9±1.6</u> 35.8±1.1	<u>4.3±0.4</u> 38±4	<u>40±5</u> 22.0±2.6	<u>6.6±0.4</u> 4.15±0.28	1.06	0.61	8.6	1.88±0.06	+0.17
Средняя тайга										
Типичная подзолистая почва										
A0	0-5	<u>54.5±1.7</u> 35.6±1.1	<u>5.7±0.5</u> 45±4	<u>36±4</u> 17.8±2.1	<u>3.45±0.23</u> 1.96±0.13	1.25	0.50	18.4	1.92±0.06	-0.25
A1A2h	5-7	<u>53.8±1.7</u> 35.2±1.1	<u>5.7±0.5</u> 45±4	<u>37±4</u> 18.0±2.1	<u>3.78±0.25</u> 2.12±0.14	1.27	0.51	16.6	1.96±0.06	-0.25
A2'	7-10	<u>52.9±1.7</u> 36.5±1.2	<u>5.0±0.5</u> 42±4	<u>39±5</u> 20.3±2.4	<u>2.79±0.19</u> 1.65±0.11	1.14	0.56	22.1	1.89±0.06	-0.02
A2"	18-35	<u>53.7±1.7</u> 36.3±1.2	<u>5.3±0.5</u> 43±4	<u>39±8</u> 20±4	<u>2.0±0.4</u> 1.16±0.21	1.18	0.54	31.2	1.91±0.06	-0.09
Торфянисто-подзолисто-глееватая почва										
O1	0-8	<u>52.6±1.7</u> 34.5±1.1	<u>5.7±0.5</u> 45±4	<u>38±5</u> 18.9±2.3	<u>3.24±0.22</u> 1.82±0.12	1.30	0.55	18.9	2.03±0.06	-0.20
A2hg	12-20	<u>58.8±1.9</u> 32.2±1.0	<u>8.2±0.8</u> 54±5	<u>30±4</u> 12.5±1.5	<u>2.62±0.18</u> 1.23±0.08	1.68	0.39	26.2	2.20±0.07	-0.91
A2g'	20-28	<u>56.8±1.8</u> 33.0±1.1	<u>7.3±0.7</u> 51±5	<u>33±4</u> 14.3±1.7	<u>3.20±0.21</u> 1.60±0.11	1.55	0.43	20.7	2.12±0.06	-0.68
A2g"	28-37	<u>55.1±1.8</u> 35.2±1.1	<u>6.0±0.6</u> 46±4	<u>36±4</u> 17.0±2.0	<u>3.36±0.23</u> 1.84±0.12	1.31	0.48	19.1	1.96±0.06	-0.34
Северная тайга										
Глееподзолистая почва										
A0	0-5	<u>58.0±1.9</u> 38.5±1.2	<u>5.4±0.5</u> 43±4	<u>33±4</u> 16.2±1.9	<u>3.97±0.27</u> 1.26±0.15	1.12	0.42	17.1	1.68±0.05	-0.27
A2g'	5-10	<u>59.5±1.9</u> 37.5±1.2	<u>6.1±0.6</u> 46±4	<u>30±4</u> 14.0±1.7	<u>4.8±0.3</u> 2.58±0.17	1.23	0.37	14.5	1.73±0.05	-0.48
A2g"	10-16	<u>54.2±1.7</u> 35.6±1.1	<u>5.6±0.5</u> 44±4	<u>34±4</u> 16.8±2.0	<u>6.0±0.4</u> 3.40±0.23	1.25	0.47	10.5	1.88±0.06	-0.30
A2B	16-35	<u>54.1±1.7</u> 37.7±1.2	<u>4.8±0.5</u> 41±4	<u>37±4</u> 19.5±2.3	<u>3.73±0.25</u> 2.23±0.15	1.07	0.52	16.9	1.77±0.05	-0.04
Торфянисто-подзолисто-глееватая почва										
O1	0-10	<u>57.2±1.8</u> 38.4±1.2	<u>5.3±0.5</u> 43±4	<u>34±4</u> 17.1±2.0	<u>3.47±0.23</u> 1.99±0.13	1.11	0.45	19.2	1.71±0.05	-0.22
O2	10-12	<u>51.6±1.7</u> 35.9±1.1	<u>5.0±0.5</u> 41±4	<u>41±8</u> 21±4	<u>2.6±0.5</u> 1.53±0.28	1.15	0.59	23.4	1.95±0.06	-0.04
A2hg	12-15	<u>49.7±1.6</u> 32.9±1.1	<u>5.6±0.5</u> 45±4	<u>42±5</u> 20.7±2.5	<u>3.02±0.20</u> 1.72±0.11	1.36	0.63	19.2	2.20±0.07	-0.10
A2g	15-20	<u>53.0±1.7</u> 36.1±1.2	<u>5.2±0.5</u> 42±4	<u>39±5</u> 19.8±2.4	<u>3.04±0.20</u> 1.77±0.12	1.17	0.55	20.4	1.91±0.06	-0.07
A2Bg	20-25	<u>54.7±1.7</u> 36.8±1.2	<u>5.3±0.5</u> 43±4	<u>37±8</u> 19±4	<u>2.6±0.5</u> 1.49±0.27	1.16	0.51	24.8	1.85±0.06	-0.13
A2Bg	35-40	<u>61.2±2.0</u> 42.9±1.4	<u>4.6±0.4</u> 39±4	<u>31±4</u> 16.1±1.9	<u>3.61±0.24</u> 2.17±0.15	0.91	0.38	19.8	1.41±0.04	-0.15
Южная тундра										
Тундровая поверхностно-глеевая почва										
A0	0-5	<u>53.2±1.7</u> 36.8±1.2	<u>5.0±0.5</u> 41±4	<u>38±5</u> 19.5±2.3	<u>4.23±0.28</u> 2.51±0.17	1.12	0.53	14.7	1.83±0.05	-0.06
A0Ah	5-10	<u>58.1±1.9</u> 37.6±1.2	<u>5.7±0.5</u> 45±4	<u>31±4</u> 14.9±1.8	<u>5.4±0.4</u> 2.98±0.20	1.18	0.40	12.6	1.72±0.05	-0.39

Горизонт	Глубина, см	Содержание, %				Атомные отношения			(H/C) _{исп} *	Степень окисленности (ω)
		C	H	O	N	H/C	O/C	C/N		
G	10-28	58.9±1.9	5.7±0.5	30±4	5.4±0.4	1.17	0.38	12.8	1.68±0.05	-0.41
		38.0±1.2	44±4	14.5±1.7	2.98±0.20					
Торфянисто-тундровая глеевая почва										
O	0-14	55.1±1.8	5.3±0.5	36±4	3.74±0.25	1.15	0.49	17.2	1.81±0.05	-0.18
		37.1±1.2	43±4	18.1±2.2	2.16±0.14					
G	17-25	55.5±1.8	5.3±0.5	34±4	5.0±0.3	1.14	0.46	13.0	1.76±0.05	-0.22
		37.3±1.2	43±4	17.2±2.1	2.88±0.19					
Торфяно-тундровая глеевая почва										
O	0-26	54.7±1.7	5.6±0.5	36±4	4.04±0.27	1.22	0.49	15.8	1.88±0.06	-0.24
		36.1±1.2	44±4	17.7±2.1	2.28±0.15					
Gf	28-40	56.1±1.8	5.8±0.5	33±4	4.6±0.3	1.25	0.45	14.2	1.85±0.06	-0.36
		36.1±1.2	45±4	16.1±1.9	2.55±0.17					

Примечание: $*(H/C)_{исп} = (H/C) + 2 \times (O/C) \times 0.67$ (Орлов, 1985); над чертой – массовая доля, под чертой – мольная доля (x); все расчеты приведены на абсолютно сухие и обеззоленные препараты.

ка $x(C)$ отвечает 100% мольной доли атомов углерода, линия 9-9 отвечает 90% и т.д. Аналогично вершина $x(H)$ отвечает 100% мольной доли атомов водорода, линия 1-1' – 90%. Поскольку в состав ГК и ФК входят более трех различных атомов, то вершина треугольника $x(O+N)$ отвечает 100% мольной доли оставшихся элементов (в основном кислорода и азота), линия 1-9' – 90%. Любая точка на площади треугольника однозначно определяет состав молекул ГК и ФК. Диаграмма построена с использованием Tri-plot для MS Excel (Graham, 2000).

Обособленное положение ФК на диаграмме позволяет предположить, что механизм их образования из растительных остатков несколько иной, чем для ГК. Графико-статистический анализ и данные табл. 2 демонстрирует более высо-

кую окисленность ФК по сравнению с ГК, что указывает на развитие O,N-замещенных алифатических фрагментов.

Анализ элементного состава препаратов гуминовых кислот показал, что ГК дерново-подзолистой почвы наиболее гумифицированы – об этом свидетельствуют их низкие значения атомных соотношений $(H/C)_{исп}$ и высокие величины O/C , $C_{ГК}/C_{ФК}$. Для ГК из почв средней и северной тайги при переходе от органогенных горизонтов к минеральным, начала характерно увеличение значения $(H/C)_{исп}$, что обусловлено поступлением в эти горизонты миграционноспособных ГК с высоким содержанием кислородсодержащих функциональных групп. При рассмотрении элементного состава ГК из более глубоких горизонтов наблюдается их дальнейшая гумификация, со-

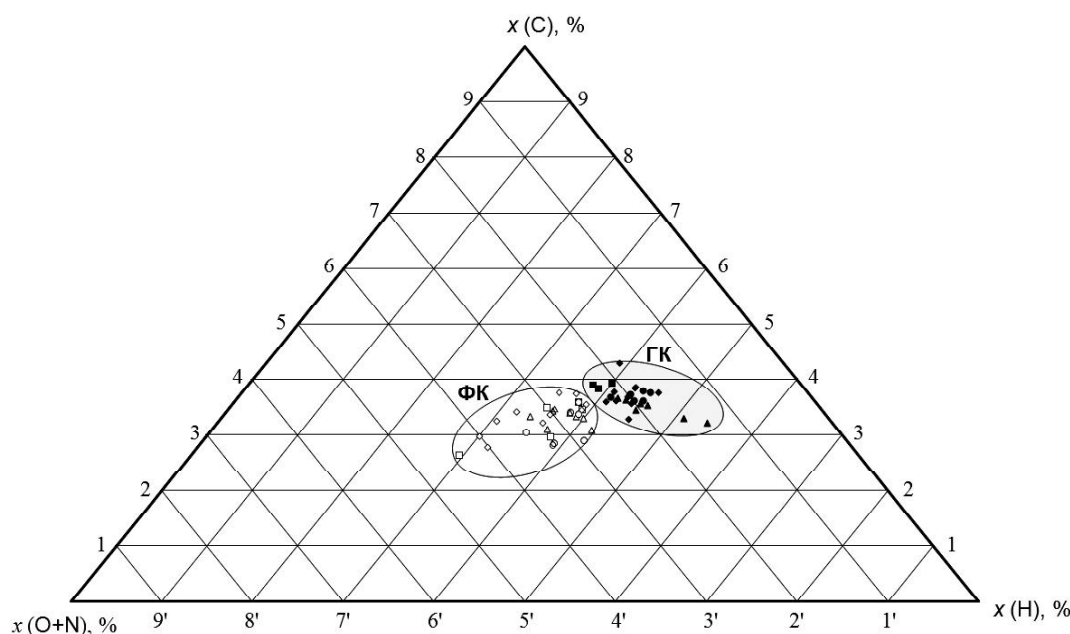


Рис. 2. Диаграмма элементного состава гуминовых и фульвокислот почв южной (ГК■, ФК□), средней (ГК▲, ФК△), северной тайги (ГК◆, ФК◇) и южной тундры (ГК●, ФК○).

Таблица 3

Распределение и элементный состав фульвокислот почв

Горизонт	Глубина, см	Содержание, %				Атомные отношения			(H/C) _{исп}	Степень окисленности (ω)
		C	H	O	N	H/C	O/C	C/N		
Южная тайга										
Дерново-подзолистая почва										
A0Адер.	0-4	<u>47.8±1.5</u> 34.6±1.1	<u>3.85±0.26</u> 39±4	<u>44±5</u> 24±2.8	<u>3.85±0.26</u> 2.39±0.16	1.13	0.69	14.5	2.05±0.06	+0.24
A2'	4-15	<u>44.8±1.4</u> 34.9±1.1	<u>3.7±0.3</u> 35±3	<u>49±10</u> 28±6	<u>2.9±0.5</u> 1.9±0.3	0.99	0.81	18.1	2.08±0.06	+0.63
A2"	15-28	<u>30.2±1.0</u> 26.4±0.8	<u>2.83±0.26</u> 29.6±2.8	<u>65±13</u> 42±9	<u>2.1±0.4</u> 1.59±0.29	1.12	1.61	16.6	3.27±0.10	+2.09
A2B	28-43	<u>39.2±1.3</u> 29.7±1.0	<u>4.1±0.4</u> 38±4	<u>53±6</u> 30±4	<u>3.45±0.23</u> 2.24±0.15	1.27	1.02	13.3	2.63±0.08	+0.77
Средняя тайга										
Типичная подзолистая почва										
A0	0-5	<u>45.6±1.5</u> 33.3±1.1	<u>4.5±0.4</u> 39±4	<u>48±10</u> 26±5	<u>2.3±0.4</u> 1.42±0.26	1.17	0.78	23.4	2.22±0.07	+0.39
A1A2h	5-7	<u>45.3±1.4</u> 33.0±1.1	<u>4.5±0.4</u> 40±4	<u>49±10</u> 27±5	<u>1.21±0.22</u> 0.76±0.14	1.20	0.81	43.7	2.28±0.07	+0.42
A2'	7-10	<u>44.9±1.4</u> 34.3±1.1	<u>4.0±0.4</u> 36±3	<u>50±10</u> 29±6	<u>0.93±0.17</u> 0.61±0.11	1.06	0.84	56.3	2.18±0.07	+0.62
A2"	18-35	<u>45.2±1.4</u> 34.7±1.1	<u>3.9±0.4</u> 36±3	<u>50±10</u> 29±6	<u>0.82±0.15</u> 0.54±0.10	1.04	0.83	64.3	2.15±0.06	+0.62
Торфянисто-подзолисто-глееватая почва										
O1	0-8	<u>45.6±1.5</u> 33.9±1.1	<u>4.2±0.4</u> 38±4	<u>48±10</u> 27±5	<u>2.4±0.4</u> 1.54±0.28	1.12	0.79	22.0	2.17±0.07	+0.45
A2hg	12-20	<u>41.8±1.3</u> 33.3±1.1	<u>3.6±0.3</u> 34±3	<u>53±11</u> 32±6	<u>1.7±0.3</u> 1.18±0.21	1.02	0.95	28.2	2.29±0.07	+0.88
A2g'	20-28	<u>40.2±1.3</u> 31.0±1.0	<u>4.0±0.4</u> 37±3	<u>54±11</u> 31±6	<u>1.36±0.24</u> 1.90±0.16	1.19	1.02	34.5	2.55±0.08	+0.85
A2g"	28-37	<u>43.4±1.4</u> 30.8±1.0	<u>4.9±0.5</u> 42±4	<u>50±10</u> 26±5	<u>2.1±0.4</u> 1.30±0.23	1.35	0.86	23.7	2.50±0.07	+0.36
Северная тайга										
Глееподзолистая почва										
A0	0-5	<u>49.1±1.6</u> 35.5±1.1	<u>4.5±0.4</u> 39±4	<u>44±9</u> 24±5	<u>2.7±0.5</u> 1.7±0.3	1.10	0.67	21.3	2.00±0.06	+0.24
A2g'	5-10	<u>49.8±1.6</u> 37.4±1.2	<u>4.1±0.4</u> 37±3	<u>44±9</u> 25±5	<u>2.2±0.4</u> 1.44±0.26	0.98	0.66	26.0	1.86±0.06	+0.34
A2g"	10-16	<u>48.5±1.6</u> 37.5±1.2	<u>3.7±0.3</u> 35±3	<u>45±9</u> 26±5	<u>2.5±0.4</u> 1.63±0.29	0.92	0.70	23.0	1.86±0.06	+0.48
A2B	16-35	<u>47.2±1.5</u> 34.5±1.1	<u>4.4±0.4</u> 39±4	<u>46±9</u> 25±5	<u>2.6±0.5</u> 1.62±0.29	1.12	0.73	21.4	2.10±0.06	+0.34
Торфянисто-подзолисто-глееватая почва										
O1	0-10	<u>43.9±1.4</u> 33.6±1.1	<u>3.9±0.4</u> 36±3	<u>49±10</u> 28±6	<u>2.7±0.5</u> 1.8±0.3	1.08	0.84	19.1	2.21±0.07	+0.61
O2	10-12	<u>41.3±1.3</u> 32.1±1.0	<u>3.8±0.4</u> 36±3	<u>53±11</u> 31±6	<u>1.58±0.28</u> 1.05±0.19	1.11	0.97	30.5	2.41±0.07	+0.82
A2hg	12-15	<u>33.0±1.1</u> 27.8±0.9	<u>3.16±0.29</u> 32±3	<u>63±13</u> 40±8	<u>1.03±0.19</u> 0.74±0.13	1.15	1.42	37.4	3.06±0.09	+1.70
A2g	15-20	<u>38.8±1.2</u> 32.5±1.0	<u>3.05±0.28</u> 30.7±2.9	<u>57±12</u> 36±7	<u>1.27±0.23</u> 0.91±0.16	0.94	1.10	35.7	2.42±0.07	+1.26
A2Bg	20-25	<u>34.7±1.1</u> 29.7±1.0	<u>2.94±0.27</u> 30.2±2.8	<u>61±13</u> 39±8	<u>1.25±0.23</u> 0.92±0.17	1.02	1.32	32.3	2.78±0.08	+1.62
A2Bg	35-40	<u>41.9±1.3</u> 34.2±1.2	<u>3.3±0.3</u> 32±3	<u>53±11</u> 32±6	<u>2.1±0.4</u> 1.48±0.27	0.94	0.94	23.1	2.20±0.07	+0.95
Южная тундра										
Тундровая поверхностно-глеевая почва										
A0	0-5	<u>49.1±1.6</u> 35.8±1.1	<u>4.4±0.4</u> 38±4	<u>44±9</u> 24±5	<u>2.4±0.4</u> 1.47±0.27	1.07	0.68	24.3	1.98±0.06	+0.28
A0Ah	5-10	<u>38.1±1.2</u> 30.4±1.0	<u>3.6±0.3</u> 35±3	<u>56±12</u> 34±7	<u>1.9±0.3</u> 1.29±0.23	1.14	1.11	23.6	2.63±0.08	+1.09

Горизонт	Глубина, см	Содержание, %				Атомные отношения			(Н/С) _{исп}	Степень окисленности (ω)
		С	Н	О	N	Н/С	О/С	С/N		
G	10-28	37.4±1.2	4.3±0.4	56±11	2.4±0.4	1.37	1.12	18.6	2.88±0.09	+0.87
		28.2±0.9	39±4	32±6	1.52±0.27					
Торфянисто-тундровая глеевая почва										
O	0-14	46.3±1.5	4.4±0.4	48±10	1.8±0.3	1.15	0.77	30.7	2.19±0.07	+0.39
		33.8±1.1	39±4	26±5	1.10±0.20					
G	17-25	38.3±1.2	4.4±0.4	55±11	2.1±0.4	1.38	1.08	21.0	2.82±0.08	+0.78
		28.5±0.9	39±4	31±6	1.36±0.24					
Торфяно-тундровая глеевая почва										
O	0-26	45.9±1.5	4.3±0.4	48±10	2.2±0.4	1.12	0.78	23.9	2.16±0.06	+0.44
		34.0±1.0	38±4	26±5	1.42±0.26					
Gf	28-40	41.0±1.3	5.0±0.5	52±11	1.9±0.3	1.45	0.95	25.1	2.73±0.08	+0.46
		29.0±1.0	42±4	28±6	1.16±0.21					

Примечание: * (Н/С)_{исп} = (Н/С) + 2×(О/С)×0.67 (Орлов, 1985); над чертой – массовая доля, под чертой – мольная доля (x); все расчеты приведены на абсолютно сухие и обеззоленные препараты.

проводящаяся декарбонизацией и уменьшением доли углеводных и аминокислотных фрагментов в структуре ГК, что приводит к уменьшению величин соотношения (Н/С)_{исп}. Увеличение степени гидроморфизма в таежных почвах сопровождается увеличением значений (Н/С)_{исп}, что обусловлено более низкой микробиологической активностью болотно-подзолистых почв (Хабидулина, 2014), которая способствует лучшей сохранности углеводных и аминокислотных фрагментов в структуре ГК. Анализ элементного состава ГК тундровых почв выявил уменьшение по профилю значений (Н/С)_{исп} во всех почвах, что свидетельствует об увеличении доли ароматических фрагментов в структуре ГК минеральных горизонтов. Статистически достоверных различий в значениях (Н/С)_{исп} ГК тундровых почв разной степени гидроморфизма не установлено.

Расчет степени окисленности показал, что практически все исследованные ГК слабо восстановлены (ω от -0.91 до -0.02). Исключение составили ГК дерново-подзолистых почв, величина степени окисленности достигает +0.17. ФК представляют собой более окисленные соединения, и показатель их степени окисленности варьирует от +0.24 до +2.09. Результаты исследований показали, что наиболее окисленными являются ГВ минеральных горизонтов изучаемых почв, что обуславливает миграцию окисленных (и, как следствие, более водорастворимых) ФК вниз по профилю. Высокая восстановленность препаратов ГК и ФК органических горизонтов определяется постоянным поступлением свежих органических остатков и их слабой гумификацией в специфических биоклиматических условиях Севера.

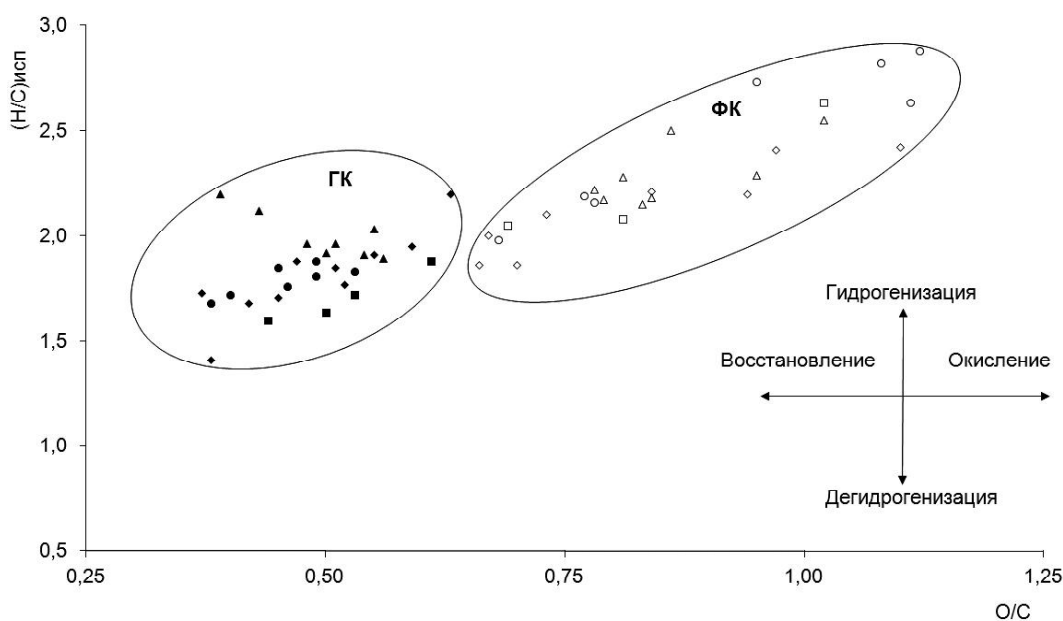


Рис. 3. Атомные соотношения элементов в препаратах гуминовых и фульвокислот почв южной (ГК■, ФК□), средней (ГК▲, ФК△), северной тайги (ГК◆, ФК◇) и южной тундры (ГК●, ФК○).

Один из наиболее широко распространенных методов, применяемых для численного описания строения гумусовых кислот с целью выявления закономерностей их образования и трансформации, является построение диаграмм Д. ван Кревелена. Способ основывается на графическом представлении данных в координатах $H/C_{исп} - O/C$ и служит удобным приемом для демонстрации вклада процессов окисления и конденсации в изменение элементного состава препаратов (Kleinhempel, 1970). На основании диаграммы Д. ван Кревелена (рис. 3) установлено, что процесс гумификации растительных остатков вызывает снижение величин как соотношения $H/C_{исп}$, так и O/C , т.е. сопровождается увеличением доли ароматических структур в молекулах гумусовых кислот. Графико-статистический анализ демонстрирует более высокую окисленность и низкую обуглероженность ФК по сравнению с ГК, что указывает на значительную замещенность ароматических колец и развитие боковых алифатических цепей. Полученные нами результаты в целом согласуются с известными данными как для тундровых почв Аляски (Characterization..., 2001), так и для подзолистых и болотно-подзолистых почв центра Русской равнины (Humic..., 1997; Кечайкина, 2011).

Заключение

Впервые получен массив данных по элементному составу препаратов гумусовых веществ таежных и тундровых почв разного генезиса и проведен сравнительный анализ этих результатов на европейском северо-востоке России. Полученные данные в совокупности со структурно-функциональными параметрами ГВ позволили выявить закономерности гумусообразования почв, обусловленные низкой скоростью разложения растительных остатков, включением относительно больших количеств лабильных углеводных, аминокислотных и метоксильных групп в структуру ГВ. Показано, что в профильном распределении азота в препаратах ГК и ФК отмечается тенденция к его снижению. Гуминовые и фульвокислоты дерново-подзолистых почв в большей степени обогащены азотом по сравнению с другими исследованными почвами.

Установлено, что усиление степени гидроморфизма в таежных почвах сопровождается увеличением значений $(H/C)_{исп}$, что определяется более низкой микробиологической активностью болотно-подзолистых почв, которая способствует лучшей сохранности углеводных и аминокислотных фрагментов в структуре ГК. Анализ элементного состава ГК тундровых почв выявил уменьшение по профилю значений $(H/C)_{исп}$ во всех почвах, что свидетельствует об увеличении доли ароматических фрагментов в структуре ГК минеральных горизонтов. Статистически достовер-

ных различий в значениях $(H/C)_{исп}$ ГК тундровых почв разной степени гидроморфизма не установлено.

Графико-статистический анализ демонстрирует более высокую окисленность и низкую обуглероженность ФК по сравнению с ГК, что указывает на значительную замещенность ароматических колец и развитие боковых алифатических цепей.

Работа выполнена в рамках госзадания (№ Гр 115020910065) и Программы УрО РАН № 15-2-4-5 (№ гос. рег. 115082010009).

ЛИТЕРАТУРА

Абакумов, Е. В. Элементный состав и структурные особенности гуминовых веществ молодых подзолов, формирующихся на отвалах песчаного карьера / Е. В. Абакумов // Почвоведение. – 2009. – № 6. – С. 666-673.

Атлас по климату и гидрологии Республики Коми. – М. : Дрофа; ДиК, 1997. – 116 с.

Атлас почв Республики Коми / И. В. Забоева, А. И. Таскаев, Г. В. Добровольский, В. А. Безносиков, Г. Я. Елькина, Д. А. Каверин, Е. Д. Лодыгин, Н. Г. Оберман, Е. М. Лаптева, Г. В. Русанова, Е. Д. Никитин, И. Б. Арчегова, Е. В. Жангуров, А. Н. Панюков, А. В. Пастухов, И. А. Лиханова, Г. А. Симонов, Г. Г. Мажитова, Г. М. Втюрин, В. Г. Казаков, В. В. Елсаков, Л. Н. Рыбин, В. В. Мокиев, Б. М. Кондратенко ; ред. Г. В. Добровольский, А. И. Таскаев, И. В. Забоева. – Сыктывкар, 2010. – 356 с.

Безносиков, В. А. Фракционно-групповой состав гумуса криогенных поверхностно-глеевых и гидроморфных почв Большеземельской тундры / В. А. Безносиков, Е. Д. Лодыгин // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 3: Биология. – 2012. – Вып. 1. – С. 107-120.

ГОСТ 11306-83. Торф и продукты его переработки. Методы определения зольности. Утвержден Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 21.09.1983 № 4465 (Измененная редакция. Изм. № 1). – М. : Изд-во стандартов, 1995. – 7 с.

ГОСТ 17.4.3.01-83. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. Утвержден Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 21.12.1983 № 6393. – М. : ФГУП Стандартиформ, 2008. – 3 с.

ГОСТ 17.4.4.02-84. Охрана природы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического и гельминтологического анализа. Утвержден Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 19.12.1984 № 4731. – М. : ФГУП Стандартиформ, 2008. – 7 с.

Дергачева, М. И. Гумусовые вещества как источник информации о природной среде формирования / М. И. Дергачева // Изв. аграрной науки. – 2011. – Т. 9. – № 2. – С. 57-61.

Завьялова, Н. Е. Влияние приемов землепользования на трансформацию гуминовых кислот дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы Предуралья / Н. Е. Завьялова, В. А. Кончиц // Почвоведение. – 2011. – № 1. – С. 103-110.

Кечайкина, И. О. Постагrogenная трансформация органического вещества дерново-подзолистых почв / И. О. Кечайкина, А. Г. Рюмин, С. Н. Чуков // Почвоведение. – 2011. – № 10. – С. 1-14.

Кондратенко, Б. М. Методика измерений содержания водорода в твердых объектах методом газовой хроматографии на элементном анализаторе EA 1110 (CHNS-O) : свидетельство об аттестации методики измерений / Б. М. Кондратенко, Е. В. Ванчикова, А. Г. Естафьева ; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. – № 88-17641-116-2011, дата выдачи свидетельства 2011, ФР.1.31.2011. 10016.

Максимова, Е. Ю. Зольный состав верхних горизонтов и основные биологические параметры почв тольяттинского островного бора и их изменение в результате действия лесных пожаров / Е. Ю. Максимова, Е. В. Абакумов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 3: Биология. – 2014. – Вып. 1. – С. 132-143.

Методика выполнения измерений содержания углерода и азота в твердых объектах методом газовой хроматографии на элементном анализаторе EA 1110 (CHNS-O) : свидетельство об аттестации методики измерений ; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. – № 88-17641-94-2009, дата выдачи свидетельства 2009, ФР.1.31.2014.17663, с изменением № 1 от 16.01.2014.

Мотузова, Г. В. Сравнительная характеристика гуминовых кислот пахотных почв таежной, степной и полупустынной зон / Г. В. Мотузова, Х. М. Дерхам, А. А. Степанов // Почвоведение. – 2012. – № 11. – С. 1171-1180.

Некрасова, О. А. Элементный состав гуминовых кислот южнотаежных почв Среднего Урала и прилегающих территорий / О. А. Некрасова // Вестник КрасГАУ. – 2013. – № 3. – С. 23-28.

Орлов, Д. С. Гумусовые кислоты почв / Д. С. Орлов. – М. : Изд-во МГУ, 1974. – 335 с.

Путеводитель научной почвенной экскурсии / Лесная зона (сезонно-промерзающие почвы) / Г. М.

Втюрин, И. В. Забоева, В. А. Безносиков, Г. А. Симонов, В. Г. Казаков, Г. Я. Елькина, Е. М. Лаптева, Е. Д. Лодыгин, Ф. М. Хабибуллина, Е. В. Шамрикова. – Сыктывкар : Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, 2002. – 100 с.

Трансформация гуминовых кислот погребенных почв / Л. В. Багаутдинова, А. Г. Рюмин, И. О. Кечайкина, С. Н. Чуков // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 3: Биология. – 2012. – Вып. 2. – С. 92-108.

Хабибуллина, Ф. М. Микромицеты подзолистых и болотно-подзолистых почв в подзоне средней тайги на северо-востоке европейской части России / Ф. М. Хабибуллина, Е. Г. Кузнецова, И. З. Васенева // Почвоведение. – 2014. – № 10. – С. 1228-1234. – DOI: 10.7868/S0032180X14100049.

Элементный состав гуминовых кислот целинных черноземов разных условий формирования / М. И. Дергачева, О. А. Некрасова, Д. И. Васильева, В. П. Фадеева // Вестник ОГУ. – 2012. – № 10 (146). – С. 87-93.

Characterization of soil organic matter fractions of tundra soils in arctic Alaska by Carbon-13 nuclear magnetic resonance spectroscopy / X. Y. Dai, C. L. Ping, R. Candler, L. Haumaier, W. Zech // Soil Sci. Soc. Am. J. – 2001. – V. 65. – P. 87-93.

Graham, D. J. Graphical representation of particle shape using triangular diagrams: an Excel spreadsheet method / D. J. Graham, N. G. Midgley // Earth Surface Processes and Landforms. – 2000. – V. 25. – № 13. – P. 1473-1477.

Humic substances from podzols under Oak Forest and a Cleared Forest Site I. Isolation and Characterization / A. J. Simpson, B. E. Watt, C. L. Graham, M. H. B. Hayes // Humic Substances, Peats and Sludges. Health and Environmental Aspects / eds. M. H. B. Hayes, W. S. Wilson. – Woodhead Publ. Ltd., 1997. – P. 73-82. – DOI: 10.1016/B978-1-85573-805-8.50010-0.

Kleinhempel D. Ein Beitrag zur Theorie des Huminstoffzustandes // Albrecht-Thaer-Archiv. – 1970. – N 14(1). – P. 3-14.

World reference base for soil resources: A framework for international classification, correlation and communication. – Rome : FAO, 2006. – 128 p.

THE STUDY OF THE ELEMENTAL COMPOSITION OF HUMIC AND FULVIC ACIDS OF SOILS OF TAIGA AND TUNDRA LANDSCAPES

E.D. Lodygin, V.A. Beznosikov, R.S. Vasilevich

Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar

Abstract. A systematic study of the elemental composition of preparations of humic (HAs) and fulvic acids (FAs) of soils of different climatic zones of the Republic of Komi. HAs of taiga soils are more enriched in nitrogen and FAs – oxygen compared with tundra soils. The structure of HAs and FAs of tundra soils is characterized by the presence of a developed part of the aliphatic macromolecules and low degree of aromaticity.

Key words: soil, humic and fulvic acids, elemental composition, taiga, tundra

ВОДОРАСТВОРИМЫЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ ТОРФЯНЫХ ПОЧВ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ БОЛЬШЕЗЕМЕЛЬСКОЙ ТУНДРЫ

Е.В. Шамрикова, С.В. Денева, О.С. Кубик, В.В. Пунегов, Е.В. Кызьюрова, О.М. Зуева
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, Сыктывкар
E-mail: shamrik@ib.komisc.ru

Аннотация. Изучены растворимые органические соединения торфяных почв побережья Баренцева моря. Определено девять кислот и семь углеводов. Установлено, что содержание общего углерода органических соединений, экстрагируемого водой, составляет 0.2-0.5 г/дм³, низкомолекулярных углеводов – 1-24, кислот – 6 мг/дм³. Массовая доля углерода идентифицированных соединений составляет менее 4% от общего углерода органических соединений вытяжек.

Ключевые слова: торфяные почвы, Арктика, водные и КСl-вытяжки из почв, низкомолекулярные органические кислоты и углеводы

Введение

Российская Федерация имеет самую длинную в мире береговую линию. Исследования почвоведов в прибрежных зонах арктических морей единичны и их результаты не дают полного представления о генезисе и свойствах почв. В отношении растворимых органических соединений данные почвы не исследованы в принципе. Однако именно береговые зоны Арктики в первую очередь оказываются ареной экосистемных конфликтов, связанных с трансформацией климата, продвижением в высокие широты бореальных видов и усиливающимся антропогенным влиянием на природные комплексы.

Фактором, определяющим образование почв прибрежных территорий, является регулярное подтопление солеными водами. Это обстоятельство определяет изменение миграционной способности органических соединений, так как степень их экстракции зависит от концентрации электролита. Изучение подвижности органических соединений почв в зависимости от ионной силы раствора актуально и для выявления источников потенциальной кислотности почв.

Сведения о составе низкомолекулярных органических соединений в водных и солевых вытяжках почв прибрежных арктических территорий отсутствуют. Основной массив данных касается почв, развивающихся в условиях таежного (Wu, 2010; Артемкина, 2011; Clemente, 2011; Liquid..., 2011; Исследование..., 2012; Водорастворимые..., 2013 и др.), в меньшей степени – тундрового почвообразования (Водорастворимые..., 2013, 2015). Среди ведущих методов анализа индивидуальных компонентов почв – ВЭЖХ, капиллярный электрофорез, а также газовая хроматография и хромато-масс-спектрометрия (ГХ/МС) с предварительной дериватизацией нативных соединений. В отношении состава и содержания тех или иных компонентов данные противоречивы. Неоднозначность результатов анализа растворов из почв определяют различные факторы, среди них метод определения и пробоподготовка объектов исследования (Strobel, 2001; Качественный..., 2011), способ получения раствора (Караванова, 2009; Шамрикова, 2011), а также высокое простран-

ственно-временное варьирование данной характеристики (Wu, 2010).

Целью работы явилось определение состава растворимых органических соединений торфяных почв побережья Баренцева моря.

Материалы и методы

Район исследований располагается в прибрежной части Хайпудырской губы Баренцева моря. Территория входит в подзону северных гипоарктических тундр (Юрцев, 1966). В качестве объектов исследования выбраны почвы тундровых экосистем, широко распространенные в данной подзоне: торфяная олиготрофная мерзлотная и торфяно-глеезем криогенно-ожелезненный мерзлотный (Классификация..., 2004). Согласно Международной Реферативной базе почвенных ресурсов (World Reference..., 2014), почвы диагностированы как Cryic Fibric Histosols Dystric и Histic Reductaquic Cryosol Thixotropic. Точки отбора образцов: 68°20'05.7" с.ш., 59°33'21.9" в.д. и 68°16'58.9" с.ш., 59°54'49.5" в.д. соответственно, высота – 8 м над уровнем моря.

Химический анализ почв выполняли общепринятыми методами (табл. 1). Массовую долю общего углерода органических соединений в твердой фазе почв определяли на CHNS-элементном анализаторе EA 1110 (Carlo Erba, Италия). Элементный состав объектов определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой SPECTRO ARCOS. Разложение проб органогенных горизонтов почв выполняли методом микроволнового вскрытия с использованием СВЧ-минерализатора «Минотавр-2» (Россия, ООО «Люмэкс»).

Вытяжки из почв готовили в соотношении 1:25. Массовую концентрацию общего углерода органических соединений водных $\rho(C_{OC-H_2O})$ и солевых $\rho(C_{OC-KCl})$ вытяжек определяли методом высокотемпературного каталитического окисления на анализаторе общего углерода TOC V_{CRH} (ГОСТ..., 2009) по разности общего содержания углерода и углерода неорганических соединений. Низкомолекулярные органические соединения в вытяжках идентифицировали методами газовой хроматографии и хромато-масс-спектрометрии,

Характеристика химических свойств почв

Горизонт	pH _{H2O}	pH _{KCl}	Обменные катионы				Валовый состав				
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺	C _{общ} *	Ca	Mg	Al	Fe
			n(1/z X ^{z+})/m**, ммоль/кг				%				
Торфяная эвтрофная мерзлотная											
O	3.87	2.80	73	89	38.3	55.0	43.4	0.18	0.15	0.15	0.17
T1	3.96	2.73	111	110	43.3	36.7	44.7	0.19	0.12	0.11	0.13
T2	3.98	2.91	73	43	58.3	20.0	44.4	0.20	0.07	0.23	1.50
T _l	4.04	3.03	73	31	68.3	15.0	46.8	0.29	0.08	0.35	0.79
Торфяно-глеезем криогенно-ожелезненный мерзлотный											
O	3.80	2.84	61	55	47.8	38.9	40.3	0.20	0.11	0.18	0.17
T1	3.93	2.91	85	86	42.5	17.5	40.9	0.25	0.12	0.12	0.12
T2	4.43	3.51	100	71	80.0	15.0	31.0	0.28	0.16	0.83	1.40
G _{ст. тикс}	5.51	3.59	40	37	16.5	0.3	0.37	–	–	–	–
G1	5.48	3.97	18	37	5.7	0.2	0.39	–	–	–	–
G2	5.53	4.13	59	43	3.0	0.3	0.75	–	–	–	–
G _l	5.92	4.40	24	15	0.7	0.3	0.46	–	–	–	–

Примечание. *C_{общ} – общий углерод органических соединений, **n(1/z X^{z+})/m – количество вещества эквивалента в единице массы почвы.

относительная погрешность измерения составляет $\pm \delta \leq 3\%$ (Исследование водных..., 2012).

Исследования проводили в Центре коллективного пользования «Хроматография», действующем на базе Института биологии Коми НЦ УрО РАН, а также в экоаналитической лаборатории, отделах почвоведения и Ботанический сад.

Обсуждение результатов

Исследуемые объекты характеризуются высокой кислотностью (pH_{H2O} 3.8-4.4, pH_{KCl} 2.7-3.5). Отношение активностей протонов в вытяжках из образцов почв, рассчитанных по экспериментальным значениям pH, составляет $\frac{a(H^+)_{KCl}}{a(H^+)_{H2O}} = 2-60$ (рис. 1).

Массовые концентрации общего углерода органических соединений водных вытяжек $\rho(C_{OC-H2O})$ изучаемых объектов равны 0.2-0.5 г/дм³, что сопоставимо с ранее полученными данными по поч-

вам тайги и южной гипоарктической тундры Республики Коми (Водорастворимые..., 2013, 2015; Влияние разнообразия..., 2014). При использовании солевого раствора отмечена тенденция к понижению содержания общего углерода KCl-вытяжек $\rho(C_{OC-KCl})$ относительно этого показателя в водных экстрактах, поскольку расхождение средних значений элемента двух выборок незначимо.

В среднем отношение $\frac{\rho(C_{OC-KCl})}{\rho(C_{OC-H2O})} = 0.9$ (рис. 1).

Среди индивидуальных соединений идентифицировано девять кислот и семь углеводов (табл. 2). Массовые концентрации этих компонентов в изучаемых объектах сопоставимы со значениями, полученными для почв тайги и южной тундры, и в основном невысокие. Массовая доля углерода идентифицированных соединений составляет менее 4% от общего углерода органических соединений вытяжек.

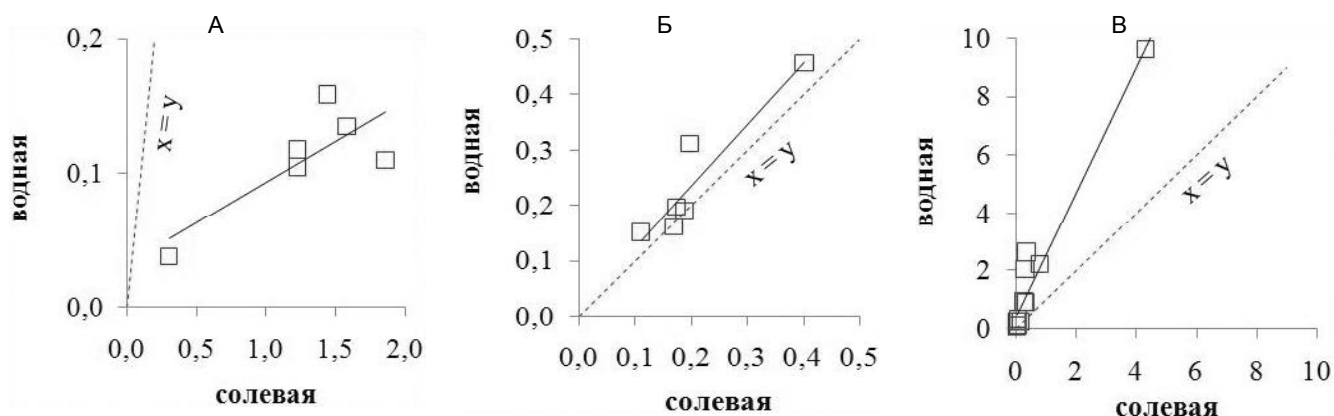


Рис. 1. Взаимосвязь концентраций компонента в солевой (ось абсцисс) и водной (ось ординат) вытяжках из почв: активность ионов водорода, ммоль/дм³ (А); массовые концентрации общего углерода органических соединений, г/дм³ (Б); углерода низкомолекулярных органических соединений, мг/дм³ (В).

Таблица 2

Низкомолекулярные органические соединения почв, экстрагируемые водой и раствором хлорида калия

Класс соединений	Водная вытяжка	KCl-вытяжка
Кислоты	2-оксипропановая (молочная), 2-оксибутандикарбоновая (яблочная), 2,3,4-триоксибутановая, 2,3,4,5-тетраоксипентановая (рибонная)	—
	2-оксизтановая (2-оксиуксусная, гликолевая), 3-оксибутановая (3-оксимасляная), пентановая (валериановая), бутандионовая (янтарная), 2,3-диоксипропановая (глицериновая)	—
Углеводы	Галактоза, арабиноза, рибоза, глюкоза, сахароза Ксилопираноза, тураноза	—

Вне зависимости от генезиса почв суммарные массовые концентрации углеводов (ρ_y) и кислот (ρ_k) характеризуются тесной линейной связью: $\rho_y = 2.39\rho_k + 0.23$ ($r = 0.93$, $n = 25$). Более информативным показателем по сравнению с абсолютным значением является отношение массовых концентраций водорастворимых углеводов к кислотам ($k = \rho_y/\rho_k$). Все изучаемые в данной работе объекты можно объединить в одну группу с относительно высоким значением $k \geq 3.9$, в нее же попадают четыре образца многолетнемерзлой породы (Водорастворимые..., 2015). Возможно, рост k связан с особенностями функционирования организмов в экстремальных условиях. По сведениям О.В. Зеленского (Зеленский, 1977), ткани растений Крайнего Севера содержат повышенное содержание углеводов, в первую очередь растворимых. Этот факт авторы связывают с физиологической адаптацией растений. Подстилки почв тайги и южной гипоарктической тундры, а также сезонно талый слой торфяных мерзлотных почв северной лесотундры характеризуются более низкими значениями данного показателя. В этой связи отношение массовых концентраций растворимых углеводов к кислотам, определенных методом ГХ/МС, можно рассматривать как интегральный индекс, отражающий совокупность биохимических свойств организмов, обуславливающих их способность обитать на данной территории, а также условия, определяющие пути трансформации органических остатков. В наиболее жестких климатических условиях за счет накопления углеводов этот показатель выше, вероятно, в связи с адаптацией организмов к низкотемпературному стрессу.

Перечень низкомолекулярных кислот и углеводов в KCl-вытяжках всех объектов меньше по сравнению с водными вытяжками (табл. 1). В солевой раствор переходят те компоненты, содержание которых в водных вытяжках существенно. Так, органические кислоты, экстрагируемые раствором KCl, в водных вытяжках составляют 42-94, углеводы – более 90% от общего содержания соединений соответствующих классов. Отношение массовых концентраций углерода низкомолекулярных соединений $\rho(C_{HC})$ в соответствующих

вытяжках $\frac{\rho(C_{HC-KCl})}{\rho(C_{HC-H_2O})} = 0.5 < 1$, что ниже

отношения концентраций общего углерода органических соединений соответствующих вытяжек (рис. 1). Данный факт свидетельствует о том, что использование солевого раствора снижает раство-

римость органических соединений по сравнению с водной экстракцией, однако снижение эффективности экстракции неодинаково.

Существенное уменьшение экстрагируемости низкомолекулярных органических веществ может быть связано с эффектом «высаливания». Механизм данного процесса заключается в том, что при введении электролита разрушаются гидратные оболочки вокруг молекул растворенного вещества, что уменьшает его сродство к воде – гидрофильность. Система приходит в псевдоравновесное состояние (перенасыщенный раствор) и способствует выделению вещества из раствора, т.е. препятствует его растворению. Учитывая, что доля низкомолекулярных компонентов в составе общего углерода органических соединений невелика, существенного снижения общего углерода в солевых вытяжках из почв по сравнению с водными вытяжками не отмечено. Таким образом, вероятно, экстрагируемость относительно более высокомолекулярной фракции органического вещества изучаемых объектов в меньшей степени зависит от ионной силы раствора.

Далее оценили источники обменной кислотности изучаемых почв. Идентифицированные нами низкомолекулярные органические кислоты имеют $pK_a > 3.8$ и не способны обеспечивать столь

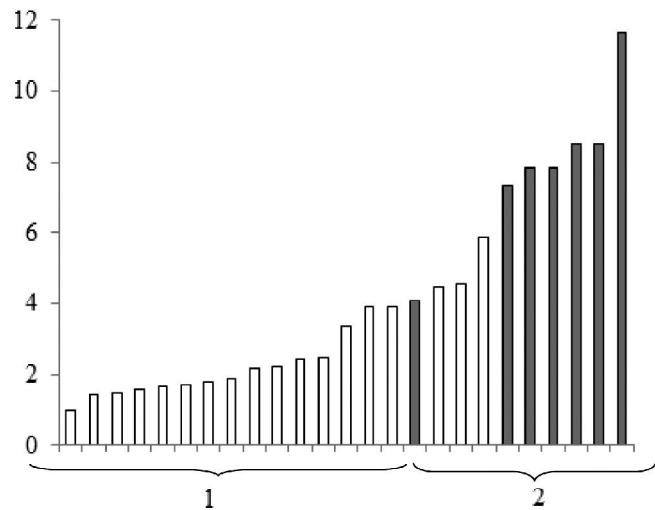


Рис. 2. Значения отношений массовых концентраций углеводов к кислотам, идентифицированным в почвах: 1 – подстилки почв тайги, южной гипоарктической тундры, образцы сезонно-талых слоев торфяных мерзлотных почв северной лесотундры (Влияние разнообразия..., 2014; Водорастворимые..., 2015), 2 – исследуемые объекты (выделено цветом), образцы многолетнемерзлотной толщи торфяных мерзлотных почв северной лесотундры.

низкие экспериментальные значения рН солевых вытяжек. Предполагаем, что протоны в солевом экстракте могут появиться в результате реакции обмена при вытеснении их из твердой фазы катионами калия. При этом источником таких протонов могут быть кислоты, характеризующиеся разной силой – от сильнокислотных до слабокислотных. Перейдя в раствор H^+ , вне зависимости от того, в состав какой по силе кислоты матрицы он входил, в жидкой фазе соответствует протону сильной соляной кислоты, диссоциирующей необратимо ($HCl \rightarrow H^+ + Cl^-$) и не имеющей константы кислотности. Таким образом, все протоны, перешедшие в KCl -вытяжки за счет реакции катионного обмена, – протоны сильной кислоты. Оценить вклад реакции катионного обмена в общую кислотность почв на данном этапе не представляется возможным.

Косвенным подтверждением этого факта является близость двух показателей. Первый показатель – активность протонов, рассчитанная по экспериментальным значениям pH_{KCl} и характеризующая наиболее сильнокислотные компоненты вытяжки, образовавшиеся при диссоциации кислот при равновесном значении рН. Второй показатель – обменная кислотность (Шамрикова, 2010), определяемая титрованием вытяжки до рН 8.2 по методу А.В. Соколова, дополнительно учитывающая и более слабокислотные центры. Сопоставление этих двух показателей правомерно, так как используется одна и та же методика измерения (табл. 1). Равенство указанных показателей является особенностью изучаемых объектов, поскольку для большинства почв активность протонов, найденная по значениям pH_{KCl} , существенно ниже этого показателя, определенного титрованием.

Значительное содержание протонов в твердой фазе, способных к обмену с ионами калия, является, в том числе, следствием низкого количества ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} , способных нейтрализовать соединения кислой природы. Это подтверждает анализ элементного состава изучаемых объектов – массовая доля данных элементов в валовом составе не превышает 0.3% (табл. 1), что сопоставимо с результатами исследования химических свойств верхних слоев торфа олиготрофных участков болот таежной зоны Карелии (Елина, 1984). В подстилках автоморфных суглинистых почв тайги и тундры эти показатели выше на порядок и более и составляют соответственно 2-9 и 1-2%, значения pH_{KCl} также существенно выше (Атлас почв..., 2010). Таким образом, одной из причин столь высокой кислотности изучаемых объектов может быть низкое содержание основных катионов, участвующих в нейтрализации соединений кислой природы.

Иными органическими соединениями, содержащими сильнокислотные группы, могут быть такие низкомолекулярные органические кислоты, как щавелевая ($pK_{a1} = 1.27$), малеиновая ($pK_{a1} = 1.92$), лимонная ($pK_{a1} = 3.06$), а также наиболее сильнокислотные группы растворимых фульвокислот (ФК). В составе ФК методом рК-спектроскопии выявлено наличие карбоксильных

групп со значениями $pK_a = 2.98$ (Лодыгин, 1999). При этом вопрос, насколько можно переносить результаты изучения препаратов ФК, выделенных из твердой фазы торфянисто-подзолисто-глееватой почвы при жесткой обработке, на высокомолекулярные соединения, переходящие в водную вытяжку из органогенных горизонтов, требует специального изучения.

Появление на поверхности высокомолекулярных соединений (ВМС) сильнокислотных карбоксильных групп может быть отчасти связано с изменением их конформации при увеличении ионной силы раствора. Известно, что изменение формы является стадией, предшествующей высаливанию ВМС. Конформация соединений возникает и поддерживается за счет множества ионных и водородных связей, а также гидрофобных взаимодействий и определяет способность к отдаче протона функциональных групп кислот. Предполагается, что молекула фульвокислоты – гибкая, имеет вытянутую неправильную или червеобразную форму. Изменение ионной силы раствора вызывает разрыв одних слабых связей и образование других, что приводит к небольшим перемещениям отдельных участков цепи и появлению на поверхности новых, способных к ионизации функциональных групп, на что указывалось ранее (Davis, 1981; Sposito, 1977).

Заключение

На примере почв побережья Баренцева моря установлено, что повышение ионной силы раствора обеспечивает снижение эффективности экстракции общего углерода органических соединений объектов в 1.2 раза, низкомолекулярных кислот и углеводов, определенных методом ГХ/МС – в среднем в 3 раза. Влияние морской воды в зоне подтопления может вызывать понижение мобильности органических соединений, особенно их низкомолекулярной фракции.

Предложено рассматривать отношение массовых концентраций растворимых низкомолекулярных углеводов к кислотам, определенных методом ГХ/МС, как интегральный индекс, отражающий совокупность биохимических свойств организмов, обуславливающих их способность обитать на данной территории, а также условия, определяющие пути трансформации органических остатков.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН «Пространственно-временные закономерности формирования торфяных почв на европейском северо-востоке России и их трансформации в условиях меняющегося климата и антропогенного воздействия» (Гр. 115020910065), а также проекта РФФИ № 16-34-00237 мол_а «Водорастворимые органические соединения: диагностика современных процессов в почвах уязвимых экосистем (на примере арктических маршей)».

ЛИТЕРАТУРА

Артемкина, Н. А. Низкомолекулярные органические кислоты в почвенных водах лесов Кольско-

го полуострова в условиях воздушного промышленного загрязнения / Н. А. Артемкина, Т. Т. Горбачева, Н. В. Лукина // Почвоведение. – 2011. – № 4. – С. 21-29.

Атлас почв Республики Коми / Под ред. Г. В. Добровольского, А. И. Таскаева, И. В. Забоевой. – Сыктывкар : КРТ, 2010. – 356 с.

Влияние разнообразия биоты на состав низкомолекулярных водорастворимых органических соединений почв южной тундры / Е. В. Шамрикова, О. С. Кубик, В. В. Пунегов, И. В. Груздев // Почвоведение. – 2014. – № 3. – С. 295-303. DOI: 10.7868/S0032180X14030101.

Водорастворимые низкомолекулярные органические кислоты в автоморфных суглинистых почвах тундры и тайги / Е. В. Шамрикова, И. В. Груздев, В. В. Пунегов, Ф. М. Хабибуллина, О. С. Кубик // Почвоведение. – 2013. – № 6. – С. 691-697. DOI: 10.7868/S0032180X13060099.

Водорастворимые органические кислоты торфяных мерзлотных почв юго-востока Большеземельской тундры / Е. В. Шамрикова, Д. А. Каверин, А. В. Пастухов, Е. М. Лаптева, О. С. Кубик, В. В. Пунегов // Почвоведение. – 2015. – № 3. – С. 288-295. DOI: 10.7868/S0032180X15030107.

ГОСТ Р 52991-2008. Вода. Методы определения содержания общего и растворенного органического углерода. – М : Изд-во стандартов, 2009. – 12 с.

Елина Г. А. Структурно-функциональная организация и динамика болотных экосистем Карелии / Г. А. Елина, О. Л. Кузнецов, А. И. Максимов. – Л. : Наука, 1984. – 128 с.

Зеленский, О. В. Эколого-физиологические аспекты изучения фотосинтеза / О. В. Зеленский. – Л. : Наука, 1977. С. 25-60.

Исследование водных вытяжек из подзолистых почв Республики Коми на содержание индивидуальных органических соединений / Е. В. Шамрикова, И. В. Груздев, В. В. Пунегов, Е. В. Ванчикова, А. А. Ветошкина // Почвоведение. – 2012. – № 10. – С. 1068-1076.

Караванова, Е. И. Химический состав растворов макро- и микропор поверхностных горизонтов некоторых почв ЦЛГПБЗ / Е. И. Караванова, Е. А. Тимофеева // Почвоведение. – 2009. – № 12. – С. 1456-1463.

Качественный анализ водных вытяжек из подзолистых почв Республики Коми на содержание органических соединений хромато-масс-спектрометрическим методом / Е. В. Шамрикова, И. В. Груздев, В. В. Пунегов, Е. В. Ванчикова, А. А. Ветошкина // Вода: химия и экология. – 2011. – № 11. – С. 58-63.

Классификация и диагностика почв России / Авторы и составители: Л. Л. Шишов, В. Д. Тонко-

ногов, И. И. Лебедев, М. И. Герасимова. – Смоленск : Ойкумена, 2004. – 342 с.

Лодыгин, Е. Д. Оценка кислотно-основных свойств торфянисто-подзолисто-глееватой почвы методом рК-спектроскопии / Е. Д. Лодыгин, Е. В. Шамрикова // Почва, экология, общество : тезисы докладов Докучаевских молодежных чтений. – СПб., 1999. – С. 33.

Шамрикова, Е. В. Варьирование показателей кислотно-основного состояния автоморфных суглинистых почв таежной и тундровой зон Республики Коми / Е. В. Шамрикова, В. Г. Казаков, Т. А. Соколова // Почвоведение. – 2011. – № 6. – С. 699-712.

Шамрикова, Е. В. Кислотность KCl-вытяжек из органометных горизонтов почв: источники, возможные равновесия / Е. В. Шамрикова // Почвоведение. – 2010. – № 7. – С. 811-818.

Юрцев, Б. А. Гипоарктический ботанико-географический пояс и происхождение его флоры / Б. А. Юрцев. – М. : Наука, 1966. – 94 с.

Clemente, J. S. Association of specific organic matter compounds in size fractions of soils under different environmental controls / J. S. Clemente, A. J. Simpson, M. J. Simpson // Organic Geochemistry. – 2011. – V. 42. – P. 1169-1180.

Davis, H. Titration of fulvic acid fractions II. Chemical changes at high pH / H. Davis, J. B. Mott // J. Soil Sci. – 1981. – V. 32. – P. 393-397.

Hamer, U. Priming effects in different soil types induced by fructose, alanine, oxalic acid and catechol additions / U. Hamer, B. Marschner // Soil Biology & Biochemistry. – 2005. – V. 37. – P. 445-454.

Liquid extraction of low molecular mass organic acid and hydroxamate siderophores from boreal forest soil / T. Ali, D. Bylund, S. Esen, U. Lundstrom // Soil Biology & Biochemistry. – 2011. – V. 43. – P. 2417-2422.

Sposito, G. Titration Studies on the Polynuclear Poliacidic Nature of Fulvic Acid Extracted from Sewage Sludge Soil Mixtures / G. Sposito, K. M. Holtzclaw // Soil Sci. Soc. Amer. Journal. – 1977. – V. 41. – № 2. – P. 330-336.

Strobel, B. W. Influence of vegetation on low-molecular-weight carboxylic acids in soil solution – a review / B. W. Strobel // Geoderma. – 2001. – V. 99. – P. 169-198.

World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps: 3rd ed. – Rome : FAO, 2014. – 203 p.

Wu, Y. Dissolved Organic Waters at Level II Monitoring Plots in Norway: Short- and Long-Term Variations / Y. Wu, N. Clarke, J. Mulder // Water Air Soil Pollut. – 2010. – V. 205. – P. 273-288.

SOLUBLE ORGANIC COMPOUNDS OF PEAT SOILS OF THE NORTHERN PART OF THE BOLSHEZEMELSKAYA TUNDRA

E.V. Shamrikova, S.V. Deneva, O.S. Kubik, V.V. Punegov, E.V. Kyzurova, O.M. Zueva
Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktывkar

Abstract. Dissolved organic compounds of peaty soils of the Barents Sea coast were compared. Nine acids and seven carbohydrates were determined. Content of the total organic compounds carbon extracted by water varied in the range 0.1-0.5 g/dm³, low-molecular carbohydrates – 1-24, acids – 6 mg/dm³. The mass fraction of carbon of the identified compounds was less than 4% of the total organic carbon of the extracts.

Key words: peat soils, the Arctic, water and KCl-extracts from soils, low-molecular organic acids and carbohydrates

НАКОПЛЕНИЕ ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ РАСТЕНИЯМИ ЮЖНОЙ ТУНДРЫ ПРИ ДОБЫЧЕ УГЛЯ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ

Е.В. Яковлева, Д.Н. Габов, В.А. Безносиков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, Сыктывкар
E-mail: kaleeva@ib.komisc.ru

Аннотация. Методом высокоэффективной жидкостной хроматографии проведено определение содержания полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в почвах и растениях полосы южной тундры в условиях аэротехногенного воздействия. Выявлены закономерности аккумуляции полиаренов растениями на фоновом участке и в зоне действия угольной шахты открытого типа. Установлено, что в почвах и растениях фонового и аэротехногенно загрязненного участков, как и в угле, основную долю ПАУ составляют низкомолекулярные полиарены. Определены наибольшие кратности превышения содержания тяжелых ПАУ, что связано с их минимальным содержанием на фоновых участках. Показано, что содержание бенз[а]пирена в растениях изменялось аналогично изменению суммарного содержания ПАУ. Наибольшая массовая доля ПАУ в растениях кустарниковой тундры сосредоточена в *Pleurozium schreberi*. Вклад растений верхнего яруса в суммарное накопление ПАУ растениями незначителен, при этом распределение полиаренов по органам модельных растений неравномерное и определяется их биоморфологическими особенностями и уровнем загрязнения.

Ключевые слова: полициклические ароматические углеводороды, угледобывающая промышленность, тундра, почва, растения

Введение

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) представляют собой органические соединения бензольного ряда, различающиеся по числу бензольных колец и особенностям их присоединения (Клар, 1971). ПАУ образуются в природных экосистемах и их компонентах, включая почвы, в результате биогеохимической трансформации органического вещества, а также имеют антропогенное происхождение (как результат неполного сгорания органических материалов). Это способствует постоянному присутствию данных соединений в объектах окружающей среды. Известно, что одним из главных исходных продуктов для образования ПАУ служат нефть, нефтепродукты, угли, горючие газы, используемые в качестве химического сырья и топлива на промышленных предприятиях и транспорте.

Выделено 10 соединений ПАУ, проявляющих повышенную канцерогенную, мутагенную и токсичную активность и потенциально опасных для животных и человека, такие как бенз[а]антрацен, бенз[б]флуорантен, бенз[а]пирен (БП), дибенз[а, h]антрацен, индено[1,2,3-cd]пирен (Nadala, 2004). Сажа, каменноугольный деготь, минеральные масла, в составе которых обнаружены большие количества ПАУ, давно признаны для человека канцерогенами, вызывающими у работающих с ними опухоли кожи и респираторного тракта. Установлено, что 60% глобальной эмиссии бенз[а]пирена приходится на процессы, связанные со сжиганием угля (Ровинский, 1988).

Современные данные о накоплении полиаренов растениями в основном касаются вопросов ремедиации загрязненных почв. В настоящее время поглощение ПАУ из почвы и атмосферы наиболее изучено для культурных растений, для

дикорастущих – сведения немногочисленны (Загрязнение почвенно-растительного..., 2012; Закономерности биоаккумуляции..., 2012). Наряду со сведениями о поглощении растениями полиаренов из почвы (Contamination of polycyclic..., 2014), имеются данные об отсутствии такого поглощения (Содержание бенз[а]пирена..., 1979). Некоторые авторы утверждают, что накопление полиаренов в надземных органах растений происходит в основном из атмосферы, а не из почвы. Эксперименты по выращиванию риса как в тепличных (Studies on the sources..., 2009), так и в естественных (Accumulation and..., 2004) условиях показали тесную корреляцию содержания полиаренов в воздухе и в надземной биомассе. Анализ литературы позволяет констатировать, что накопление полиаренов растениями зависит от их видовой принадлежности. Из почвы растения накапливают преимущественно легкие полиарены. Данные литературы тесно согласуются с данными, полученными нами для разных видов растений таежной и тундровой зон (Закономерности биоаккумуляции..., 2012).

Отметим, что при оценке экологического состояния экосистем тундровой зоны мало внимания уделяют определению уровня загрязнения растительности в районах, подверженных воздействию угледобывающей промышленности. Так, были проведены комплексные исследования уровня загрязненности Печорского бассейна (в том числе Воркутинского района) в рамках которых было оценено содержание тяжелых металлов и ПАУ в донных осадках тундровых озер (Multiple indicators..., 2009). Мы располагаем ограниченной информацией о накоплении ПАУ в почвах тундровой зоны. Например, содержание бенз[а]пирена в черте г. Воркуты (полоса южных тундр)

выше ПДК, а максимальные превышения достигают 80 ПДК (Дымов, 2013). Однако такие высокие значения определяет именно влияние городской среды, по ним нельзя судить об уровне загрязнения тундровых экосистем.

Исследования загрязнения полиаренами растительного покрова архипелага Шпицберген в районе пос. Баренцбург показали, что основным его источником являются аэрозоли, поступающие в окружающую среду с выбросами ТЭЦ. Авторами выявлено, что наиболее показательным индикатором аэрозольного загрязнения ПАУ воздуха является сообщество мхов с круглогодичным вегетационным периодом (Загрязнение почвенно-растительного..., 2012).

Тундровые экосистемы отличаются низкой устойчивостью к разного рода воздействиям. Определение содержания полиаренов в растениях тундровой зоны, находящихся под аэротехногенным влиянием угледобывающей промышленности, с целью оценки состояния тундровых фитоценозов является актуальной задачей современных экологических исследований.

Материалы и методы исследования

Исследования были проведены в Большеземельской тундре (Воркутинский район, Республика Коми), где распространена массивно-островная многолетняя мерзлота. Территория представляет собой полого-увалистую равнину в северной части Печорской низменности (бассейн верховьев р. Усы и ее притоков – рек Воркуты и Сейды), сложенную сильно дислоцированными палеозойскими породами, перекрытыми толщей наносов ледникового происхождения. Почвообразующие породы – четвертичные верхнеплейстоценовые гляциальные и флювиогляциальные отложения. В окрестностях Воркуты это покровные пылеватые суглинки мощностью менее 10 м, подстилаемые мореной (Атлас почв..., 2010). Район исследования относят к умеренно континентальной атлантико-арктической климатической области, Воркутинскому климатическому району, его характеризуют суровая зима и относительно прохладное лето. Среднегодовая температура воздуха по метеостанции г. Воркуты составляет 5,8 °С. Среднегодовое количество осадков – 550-600 мм (Атлас Республики Коми..., 1997). Исследования проводили в полосе южных тундр (Грибова, 1980). Зональный тип сообществ в данном районе – кустарниковые тундры. Наибольшее распространение имеют разные варианты ерниковых и ивняковых кустарниковых тундр, а также плоскобугристые болота. Характерной чертой растительного покрова является мозаичность, быстрая пространственная смена растительных группировок и, соответственно, изменчивость и комплексность их распределения (Атлас почв..., 2010).

В районе исследования распространены тундровые поверхностно-глеевые, торфянисто- и тор-

фяно-тундровые глеевые почвы. Их морфологические особенности – это наличие поверхностной торфяной подстилки (10-30 см) и четко выраженного глеевого тиксотропного горизонта. Верхняя граница многолетней мерзлоты, служащая водупором, залегает на глубине 55-80 см. Иллювиальная толща малой мощности, почвенный профиль слабо дифференцирован. Деформация почвенного профиля вызвана перемещением насыщенных влагой почвогрунтов при оттаивании и замерзании. Почвы характеризуются замедленным биологическим круговоротом и низкой биологической продуктивностью. Органогенные горизонты, верхняя часть иллювиальной и криогенной зон являются геохимическими барьерами. Почвы кислые. Гранулометрический состав – тяжелый суглинок (Безносиков, 2012).

Для определения содержания ПАУ в органогенных горизонтах тундровых поверхностно-глеевых почв и растениях нижнего и верхнего ярусов кустарниковой тундры отбирали растения на фоновом участке (урочище Нерусовой-мусюр) и в районе действия угольной шахты «Юнь-Яга» с открытым способом добычи угля в 0,5 км от предприятия в северо-восточном направлении. На каждом участке для отбора растений нижнего яруса были заложены три пробных площадки (Родин, 1968). На каждой из них размером 100×50 см проводили пробоотбор почв органогенного горизонта и всех растений. После отбора растения взвешивали. У кустарничков отдельно анализировали корни, стебли и листья; у трав – надземную и подземную части. Для отбора растений верхнего яруса (ива шерстистая – *Salix lanata* L. и береза карликовая – *Betula nana* L.) на каждом участке были заложены три пробных площадки размером 500×500 см (Торлопова, 2003). На каждой из них пробоотбор проводили из пяти растений, формируя смешанный образец. Корни, стволы, ветви, листья и кору кустарников отбирали и анализировали отдельно. Образцы почв и растений высушивали при комнатной температуре (20-25 °С) в течение месяца, измельчали и анализировали на содержание полиаренов.

В ходе проведения исследований на фоновом участке было отобрано 12 видов растений следующих групп – кустарники: *Salix lanata* и *Betula nana*; травянистые растения: *Festuca ovina* L. (овсяница овечья), *Deschampsia caespitosa* L. (щучка дернистая), *Pyrola rotundifolia* L. (грушанка круглолистная); кустарнички: *Vaccinium myrtillus* L. (черника), *V. vitis-idaea* L. (брусника), *V. uliginosum* L. (голубика) и *Empetrum nigrum* L. (водяника черная); мхи: *Pleurozium schreberi* Brid., *Polytrichum commune* L. и *Dicranum undulatum* Ehrh и два вида лишайников: *Lobaria linita* (Ach.) Rabenh. и *Cladonia gracilis* (L.) Willd. На загрязненном участке выявлено 10 видов растений – кустарники: *Salix lanata* и *Betula nana*; травянистые растения: *Festuca ovina*, *Deschampsia caes-*

pitosa, Pyrola rotundifolia, Chamaenerion angustifolium L. (иван-чай узколистный); кустарнички: *Vaccinium vitis-idaea, V. uliginosum*; мхи: *Pleurozium schreberi, Polytrichum commune*. Лишайники на загрязненных участках отсутствовали.

В основу определения ПАУ в почвах положены методики US EPA 8310, ПНД Ф 16.1:2:2.2:3.39-03 (ПНД Ф 16.1:2:2. 2:3. 39-03., 2012), а также методики, описанные в научных работах (Закономерности формирования..., 2008). Для контроля точности использовали Standard Reference Material 1944 «New York/New Jersey Waterway Sediment» (National Institute of Standards & Technology, USA). Методика выделения углеродородных компонентов нефти из растений опубликована нами ранее (Биоаккумуляция полициклических..., 2008). Для контроля точности определения содержания ПАУ в растениях в нашем исследовании применяли стандартный образец Certified reference material BCR-683 (European commission community bureau of reference). Качественное и количественное определение содержания ПАУ в почвах и растениях осуществляли методом обращенно-фазовой ВЭЖХ в градиентном режиме и спектрофлуориметрическим детектированием («Люмахром», фирма «Люмэкс», Россия). Идентификацию ПАУ проводили по времени удерживания и сравнения спектров флуоресценции выходящих из колонки компонентов со спектрами стандартных ПАУ. Статистическую обработку для оценки достоверности расхождений средних арифметических значений накопления полиаренов в почвах и растениях на фоновом и загрязненных участках проводили при помощи t-критерия Стьюдента ($P = 0.95$). Для проведения кластерного анализа использовали программу Statistica-6 (StatSofting, USA). При построении дендрограммы сходства для объедине-

ния данных применяли метод Варда, в качестве способа определения сходства использовали евклидово расстояние.

Результаты и обсуждение

В ходе работы был проведен химический анализ угля шахты Юнь-Яга. В составе угля обнаружено 14 структур ПАУ (табл. 1): нафталин, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, бенз[а]антрацен, хризен, бензо[б]флуорантен, бензо[к]флуорантен, бенз[а]пирен, дибенз[а, h]антрацен, бенз[ghi]перилен и инденопирен. В угле шахты «Юнь-Яга» значительно преобладали легкие полиарены, такие как нафталин, флуорен и фенантрен. В меньшей степени были представлены пирен, хризен, бенз[б]флуорантен, бенз[а]пирен, бенз[ghi]перилен и инденопирен.

В почвах фоновых и загрязненных участков соответственно были идентифицированы 14 структур ПАУ: нафталин, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, хризен, бенз[а]антрацен, бензо[б]флуорантен, бензо[к]флуорантен, бенз[а]пирен, бенз[ghi]перилен, дибенз[а, h]антрацен и инденопирен.

В составе ПАУ в почвах на фоновых и загрязненных участках значительную часть представляли легкие полиарены, их доля составляла 83-91% общей суммы ПАУ в почвах. На фоновом и загрязненном участках на нафталин, флуорен и фенантрен, преобладавшие в выбросах, приходилось 48 и 70% суммарного содержания ПАУ соответственно. Общее содержание полиаренов на загрязненных участках превышало фоновые значения в 4 раза. Наибольшие кратности превышения (в 4-8 и 4-9 раз) были отмечены для легких (нафталин, флуорен, фенантрен) и тяжелых (дибенз[а, h]антрацен и инденопирен) ПАУ соответственно. Именно эти полиарены, за исключением

Таблица 1

Содержание полиаренов в угле и почвах фонового и загрязненного участков, нг/г

ПАУ	Фоновый участок, почва			Загрязненный участок, шахта «Юнь-Яга»					
	Размах	Медиана	Среднее значение	Почва			Уголь		
				Размах	Медиана	Среднее значение	Размах	Медиана	Среднее значение
Нафталин	25.7-32.8	26.5	27.6	196.2-290.3	216.0	226.3	1612.4-1746.0	1642.6	1667.0
Флуорен	29.2-52.5	42.9	43.0	148.8-230.3	165.5	177.0	1225.8-1343.4	1266.0	1278.4
Фенантрен	34.8-51.2	37.7	40.7	162.5-245.5	197.7	196.2	861.3-1039.7	915.8	938.9
Антрацен	1.5-4.9	2.5	3.0	5.7-12.0	8.7	8.8	55.3-96.7	73.8	75.3
Флуорантен	0.0-37.2	29.2	21.6	40.2-86.4	53.0	60.5	54.0-75.6	68.0	65.9
Пирен	26.0-37.8	31.1	31.6	46.8-86.0	63.9	63.8	77.4-112.2	106.4	98.7
Бенз[а]антрацен	4.3-8.4	7.0	6.8	7.9-14.9	10.8	11.1	28.4-33.3	32.6	31.5
Хризен	9.5-19.4	15.6	14.7	17.0-46.5	34.3	33.2	375.0-435.6	389.4	400.0
Бенз[б]флуорантен	11.3-18.7	14.0	14.4	21.1-42.4	33.5	31.5	65.2-108.7	98.3	90.7
Бенз[к]флуорантен	3.8-6.2	5.7	5.3	4.3-9.7	6.2	6.9	9.9-11.9	10.1	10.6
Бенз[а]пирен	4.5-10.3	8.2	7.8	3.1-12.9	7.6	7.5	49.9-72.9	62.3	61.7
Дибенз[а, h]антрацен	0.0-1.4	0.0	0.5	1.1-9.5	4.3	4.3	10.2-16.9	14.8	14.0
Бенз[ghi]перилен	5.9-11.8	7.3	8.0	2.4-11.4	5.3	6.5	99.7-108.0	106.4	104.7
Индено[1,2,3-cd]пирен	0.0-9.0	3.6	4.0	7.7-21.0	18.4	16.3	213.7-242.3	230.0	228.7
ΣПАУ	207.9-247.0	231.0	229.6	699.1-1084.4	811.0	849.9	4855.1-5248.4	5094.2	5065.9

дибенз[а, h]антрацена, преобладали в угле. Кратности превышения для остальных ПАУ были ниже и составляли 2-3 раза. Повышенное содержание хризена в выбросах шахты приводит к увеличению его содержания в почве в два раза по сравнению с фоновым участком. Повышенные содержания легких полиаренов в угле не приводили к резкому увеличению их содержания в почвах загрязненного участка. Такое явление может быть обусловлено высокой скоростью разложения легких полиаренов в почве. Культуры различных микроорганизмов могут эффективно трансформировать исключительно низкомолекулярные ПАУ, в то время как высокомолекулярные полиарены они окисляют слабо или не окисляют совсем (Белых, 2009; Effects of nutrient..., 2005). Легкие ПАУ, поступившие с угольной пылью в почву, могли подвергнуться частичной или полной трансформации, что снижало их содержание в почве.

В растениях фонового и загрязненного участков ПАУ также представлены преимущественно легкими структурами, такими как нафталин, флуорен и фенантрен – их доля в общей сумме ПАУ в растениях составляет 76-99% (табл. 2). Это хорошо согласуется с данными литературы. Так, в растениях мятлика обыкновенного (*Poa trivialis* L.), растущих вдоль шоссе, выявлены только легкие полиарены (Polycyclic aromatic..., 2000). Более растворимые в воде низкомолекулярные ПАУ имеют лучший доступ в клетку (Шурбор, 2000). Высокое содержание ПАУ в растениях, вероятно, связано с тем, что легкие ПАУ являются необходимыми компонентами организма растений, участвующими в процессах обмена веществ. Физиологически активные соединения (витамины, гормоны) имеют в молекуле 2-3-ядерные структуры нафталинового и фенантренового типа. Природное сходство низкомолекулярных ПАУ с витаминами и гормонами также может оказывать определенное стимулирующее воздействие на проницаемость клеточных мембран (Ровинский, 1988).

Следует отметить, что на фоновом участке наибольшее содержание ПАУ было отмечено в талломах лишайника *Cladonia gracilis* и травянистых растениях – *Deschampsia caespitosa* и *Festuca ovina*. Лишайники отличаются способностью к биоаккумуляции и высокой чувствительностью к загрязнителям (A fast extraction..., 2006). Отсутствие лишайников на загрязненном участке, по-видимому, обусловлено повышенными концентрациями полиаренов в окружающей среде. Многолетние травянистые растения имеют мощную корневую систему, что способствует поглощению полиаренов из почвы. Мхи *Pleurozium schreberi* и *Polytrichum commune* характеризовались близкими значениями содержания как легких, так и тяжелых полиаренов. Среди кустарничков наибольшие количества полиаренов обнаружены у

Таблица 2

Суммарное содержание легких и тяжелых полиаренов в разных видах растений и лишайников, нг/г

Вид растений, лишайников	Фоновый участок						Загрязненный участок, шахта «Юнь-Яга»					
	Σ легких полиаренов			Σ тяжелых полиаренов			Σ легких полиаренов			Σ тяжелых полиаренов		
	Размах	Медиана	Среднее значение	Размах	Медиана	Среднее значение	Размах	Медиана	Среднее значение	Размах	Медиана	Среднее значение
<i>Betula nana</i>	165.0-217.3	184.4	188.9	4.8-7.9	7.8	6.8	319.4-421.8	321.1	354.1	7.8-34.8	12.7	18.5
<i>Salix lanata</i>	150.9-2036.8	168.4	174.4	1.0-1.8	1.2	1.3	194.4-354.5	205.8	251.5	9.7-19.2	17.4	15.4
<i>Pyrola rotundifolia</i>	280.4-390.3	288.8	319.8	21.9-29.7	23.1	24.9	884.5-1092.6	981.8	986.3	20.0-27.0	24.4	23.8
<i>Festuca ovina</i>	686.4-843.1	753.1	760.9	22.2-30.7	23.2	25.3	1041.6-1318.7	1180.14	1180.14	279.2-411.8	345.51	345.51
<i>Deschampsia caespitosa</i>	1088.2-1316.8	1096.7	1167.2	21.1-25.8	24.2	23.7	1464.8-1747.5	1603.15	1603.15	382.8-490.9	436.84	436.84
<i>Chamenerion angustifolium</i>	0.0-0.0	0.0	0.0	0.0-0.0	0.0	0.0	837.6-906.4	872.02	872.0	219.8-222.9	221.3	221.3
<i>Vaccinium uliginosum</i>	175.3-230.2	208.6	204.7	7.0-9.1	7.2	7.8	298.6-415.0	310.0	341.2	75.7-126.2	82.8	94.9
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	623.6-719.6	671.6	671.6	18.6-22.8	20.8	20.8	456.6-706.4	587.3	583.4	49.7-92.4	71.8	71.3
<i>Vaccinium myrtillus</i>	295.6-556.1	300.0	383.9	5.1-14.3	7.4	8.9	0.0-0.0	0.0	0.0	0.0-0.0	0.0	0.0
<i>Empetrum nigrum</i>	331.8-368.2	350.0	350.0	8.0-10.3	9.2	9.2	0.0-0.0	0.0	0.0	0.0-0.0	0.0	0.0
<i>Cladonia gracilis</i>	1006.2-1170.9	1088.5	1088.5	31.1-35.9	33.5	33.5	0.0-0.0	0.0	0.0	0.0-0.0	0.0	0.0
<i>Lobaria linita</i>	294.0-377.7	335.9	335.9	4.3-5.3	4.8	4.8	0.0-0.0	0.0	0.0	0.0-0.0	0.0	0.0
<i>Pleurozium schreberi</i>	455.4-643.1	464.4	520.9	35.1-58.8	41.8	45.2	1567.2-2252.6	1982.0	1933.9	449.8-703.9	629.3	594.3
<i>Polytrichum commune</i>	370.7-576.8	520.2	489.2	57.8-77.0	62.5	65.7	742.7-1151.4	936.9	942.0	237.6-297.3	264.2	265.8
<i>Dicranum undulatum</i>	1006.2-1170.9	1088.5	1088.5	31.1-35.9	33.5	33.5	0.0-0.0	0.0	0.0	0.0-0.0	0.0	0.0

Vaccinium vitis-idaea, наименьшие – у *V. uliginosum*. Это, вероятно, обусловлено тем, что *Vaccinium vitis-idaea* как вечнозеленое растение могла накапливать полиарены из окружающей среды длительное время. Суммарное накопление полиаренов другими растениями травяно-кустарничкового яруса примерно одинаково и составляет 400-500 нг/г растения при содержании ПАУ в почве 230 нг/г. Наименьшее содержание ПАУ отличало растения верхнего яруса – *Betula nana* и *Salix lanata*, суммарное содержание ПАУ в них было ниже содержания ПАУ в почве.

Для загрязненного участка характерно повышение содержания полиаренов в растениях по сравнению с фоновыми значениями. Наибольшим суммарным накоплением полиаренов отличаются мхи (*Pleurozium schreberi*, *Polytrichum commune*) и травянистые растения (*Deschampsia caespitosa*, *Festuca ovina*, *Pyrola rotundifolia*). Следует отметить, что сосудистые растения характеризуются более высокой функциональной активностью по сравнению с мхами и интенсивно накапливают ПАУ в течение короткого вегетационного периода, в то время как ассимиляция полиаренов во мхах происходит в течение всего года. Максимальные кратности превышения фоновых значений 3-4 раза характерны для *Pyrola rotundifolia* и *Pleurozium schreberi*. Для остальных растений кратности превышения составляют приблизительно два раза. Содержание полиаренов в растениях *Polytrichum commune* в зоне аэротехногенного загрязнения в два раза ниже, чем в *Pleurozium schreberi*. Возможно, в условиях интенсивного поступления угольной пыли *Pleurozium schreberi*, имеющей большую площадь ассимилирующей поверхности, чем *Polytrichum commune*, поглощает больше полиаренов.

Следует отметить, что основную массовую долю ПАУ в растениях составляют легкие полиарены, но наибольшие кратности превышения содержания ПАУ для всех видов растений, за исключением *Pyrola rotundifolia*, характерны для тяжелых ПАУ. Из данных литературы известно, что содержание ПАУ во мхах, которые не имеют корневой системы, в значительной степени зависит от химического состава атмосферных осадков и от морфологических особенностей отдельных видов мхов (от площади поверхности ассимилирующих органов и их шероховатости, содержания воскоподобных веществ). Концентрации загрязняющих веществ в сосудистых растениях, имеющих развитую корневую систему, в большей степени обусловлены степенью загрязнения почвенного покрова (Загрязнение почвенно-растительного..., 2012). У *Pyrola rotundifolia* корневая система поверхностная, при этом листовая поверхность данного вида значительна, что позволяет предположить поступление ПАУ в растения данного вида преимущественно с атмосферными выпадениями.

Превышение фоновых значений наиболее выражено для бенз[а]пирена, бенз[ghi]перилена, дибенз[а,h]антрацена и инденопирена (до 127 раз) и в меньшей степени для бензо[b]флуорантена, бензо[k]флуорантена. Для этих соединений, за исключением бенз[а]пирена и бенз[ghi]перилена, наблюдали значительное повышение содержания и в почве. Соединения, слабо представленные в почве, могли попадать в растения с атмосферными аэрозолями, так как в значительных количествах содержались в угле. Среди легких полиаренов наибольшие кратности превышения во всех видах растений отмечали для фенантрена, антрацена, пирена, хризена и бенз[а]антрацена (до 17 раз), что во многом связано с большим содержанием данных полиаренов в угле шахты. Значительные кратности превышения, полученные для тяжелых ПАУ, могут быть объяснены высоким фоновым содержанием легких полиаренов в растениях. Легкие полиарены могут образовываться в процессе жизнедеятельности растений. Тяжелые ПАУ в естественных условиях при отсутствии загрязнения содержатся в растениях в минимальных количествах.

Активная биоаккумуляция растениями *Pleurozium schreberi* как легких, так и тяжелых полиаренов была показана для сельскохозяйственных районов Польши и национальных парков Аляски. При этом суммарные значения накопления ПАУ значительно варьировали – от десятков до тысяч нг/г на разных участках в пределах одного региона. Мох характеризовало повышенное накопление фенантрена по сравнению с другими ПАУ. Основную долю ПАУ в растениях составляли легкие ПАУ, высокомолекулярные ПАУ растения накапливали в меньшей степени (Interspecies..., 2009). В районе шахты «Юнь-Яга» накопление ПАУ растениями *Pleurozium schreberi* составляло 2528 нг/г, что в три раза больше содержания ПАУ в почве.

Следует отметить, что для всех растений загрязненного участка выявлена статистически значимая корреляция по содержанию ПАУ с почвой ($r = 0.60-0.91$) и с углем ($r = 0.64-0.96$). Максимальные значения коэффициента корреляции выявлены для *Pyrola rotundifolia* и *Salix lanata*, для остальных растений его значения близки и не превышают $r = 0.74$. Содержание бенз[а]пирена в растениях изменяется подобно общему содержанию ПАУ. Накопление бенз[а]пирена растениями разных видов на фоновом участке не превышало 10 нг/г при его содержании в почве 8 нг/г. Значения содержания бенз[а]пирена в почве, некоторых растениях (*Pleurozium schreberi*, *Polytrichum commune*, *Dicranum undulatum*, *Festuca ovina*) и лишайниках (*Cladonia gracilis*) практически одинаковы (от 7 до 10 нг/г), что позволяет рассматривать их в качестве потенциальных индикаторов содержания бенз[а]пирена в почве.

Близкие уровни содержания полиаренов в почве и мхах в основном обусловлены тем, что именно за счет разложения мхов, преобладающих в биомассе тундровых фитоценозов, происходит формирование почвенного покрова. *Festuca ovina* активно накапливает ПАУ из почвы, благодаря хорошо развитой корневой системе. Содержание бенз[а]пирена в талломах *Lobaria linita* (3 нг/г) и растениях других модельных видов минимальное. Для подбора универсальных растений-индикаторов содержания ПАУ в почве необходимо проведение дополнительных исследований.

В районе действия шахты не выявлено повышенного содержания бенз[а]пирена в почве относительно фоновых значений, но при этом массовая доля бенз[а]пирена в растениях возрастает. Так, максимальные кратности превышения по сравнению с фоновыми значениями достигают 19 раз и отмечены для *Deschampsia caespitosa*. Это свидетельствует о большом вкладе атмосферного загрязнения в состав ПАУ растений в районах распространения угледобывающей промышленности. Минимальное накопление бенз[а]пирена характерно для кустарников и кустарничков загрязненного участка. Для *Vaccinium vitis-idaea* выявлено снижение содержания бенз[а]пирена по сравнению с фоновым участком. Это обусловлено в основном поступлением полиаренов в растения данного вида через корневую систему, так как аэрозольному поступлению препятствует мощный восковой налет на листьях.

Наибольшая массовая доля ПАУ в растениях полосы южной тундры была идентифицирована для *Pleurozium schreberi*, который составлял основную долю фитомассы на исследуемых площадках (табл. 3). Его вклад в потребление ПАУ достигал 56 и 52% от суммарного накопления для фонового и загрязненного участков соответственно. Высоким накоплением полиаренов на обоих участках отличались *Betula nana* и *Salix lanata*. Их доля в поглощении ПАУ в суммарном накоплении составляет на 19 и 26% на фоновом и загрязненном участках соответственно. Из травянистых растений значительный вклад в накопление полиаренов вносила *Deschampsia caespitosa*. Для загрязненного участка отмечен повышенный вклад в накопление ПАУ *Pyrola rotundifolia* и *Chamaenerion angustifolium*. На фоновом участке значительные количества ПАУ накапливаются в *Polytrichum commune*. Роль остальных растений в выносе ПАУ минимальна. Следует отметить, что для фонового и загрязненного участков суммарное содержание ПАУ

(в расчете на единицу площади) в растениях ниже, чем запасы ПАУ в почве, в два и девять раз соответственно. Загрязнение почв полиаренами приводит к угнетению растительности, снижению ее биомассы, обеднению видового состава и, следовательно, к снижению величин общего выноса полиаренов растениями на единицу площади по сравнению с фоновым участком при повышении уровня аккумуляции ПАУ растениями на единицу массы.

Таким образом, данные о содержании ПАУ в угле, органических горизонтах почв и растениях свидетельствуют о том, что полиарены во всех исследованных объектах представлены в основном легкими структурами. Максимальный прирост ПАУ на загрязненных участках выявлен для тяжелых полиаренов. Наибольшим накоплением полиаренов в зоне техногенеза отличались растения *Pleurozium schreberi* и *Pyrola rotundifolia*. *Pleurozium schreberi* вносил основной вклад (более 50%) в накопление полиаренов растениями полосы южной тундры в расчете на единицу площади.

Изучение содержания ПАУ в органах растений показало, что для *Vaccinium uliginosum*, *V. myrtillus*, *V. vitis-idaea* и *Empetrum nigrum* накопление ПАУ выше в листьях, чем в стеблях и корневой системе. На фоновом и загрязненном участках суммарное накопление ПАУ в листьях *Vaccinium uliginosum* превышало их содержание в стеблях и корнях в 2-4 раза. Для *V. vitis-idaea* выявлено незначительное превышение (1.1 раза). Растения *Vaccinium myrtillus* и *Empetrum nigrum* были обнаружены только на фоновом участке: для *Vaccinium myrtillus* превышение содержания

Таблица 3
Вклад различных видов растений в накопление ПАУ в тундровых фитоценозах

Виды растений и лишайников	Фоновый участок		Загрязненный участок, шахта «Юнь-Яга»	
	нг/м ²	%	нг/м ²	%
<i>Betula nana</i>	45337	8.9	86319	19.0
<i>Salix lanata</i>	51187	10.0	77728	17.1
<i>Pyrola rotundifolia</i>	1286	0.3	8012	1.8
<i>Festuca ovina</i>	4466	0.9	8322	1.8
<i>Deschampsia caespitosa</i>	36039	7.1	15979	3.5
<i>Chamerion angustifolium</i>	–	0.0	13920	3.0
<i>Vaccinium uliginosum</i>	12410	2.4	4010	0.9
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	739	0.1	3164	0.7
<i>Vaccinium myrtillus</i>	19217	3.8	–	–
<i>Empetrum hermaphroditum</i>	2730	0.5	–	–
<i>Cladonia gracilis</i>	1646	0.3	–	–
<i>Lobaria linita</i>	363	0.1	–	–
<i>Pleurozium schreberi</i>	282636	55.5	235888	52.0
<i>Polytrichum commune</i>	45429	8.9	690	0.2
<i>Dicranum undulatum</i>	6177	1.2	–	–
ΣПАУ в растениях и лишайниках	509660	100.0	454035	100.0
ΣПАУ в почве	114814	100.0	4250000	100.0

ПАУ в листьях над стеблями и корнями составляет 2.0-3.0 раза, для *Empetrum nigrum* – 1.5-1.8 раза. Отметим, что для *Vaccinium myrtillus* сходные закономерности в накоплении полиаренов выявлены и для таежной зоны (Закономерности биоаккумуляции..., 2012). Сосредоточение основной массы ПАУ в листьях *Vaccinium uliginosum* и *V. myrtillus* во многом обусловлено их листопадностью. Загрязнители концентрируются главным образом в вакуолях растительных клеток и сбрасываются вместе с листьями. ПАУ могут попадать в растение не только из почвы, но и из атмосферы и проникать в листовую пластинку через устьица. Для *Vaccinium myrtillus* выявлено повышенное содержание легких ПАУ в ягодах, из тяжелых ПАУ в ягодах был обнаружен только бенз[к]флуорантен, причем в небольших количествах. *Vaccinium vitis-idaea* и *Empetrum nigrum* – вечнозеленые растения, накопление ПАУ в их листьях происходит в меньшей степени. Проникновению полиаренов из атмосферы могут препятствовать восковой налет на листьях.

Для травянистых растений *Festuca ovina* и *Deschampsia caespitosa* на фоновом и загрязненном участках выявлено преимущественное накопление всех ПАУ в подземной части растений. Кратности превышения суммарного содержания ПАУ для фоновых и загрязненных участков составляют 2.0-2.5 и 3.0-5.0 раза соответственно. Для отдельных полиаренов кратности превышения могут достигать 40.0 раз. Базипетальная направленность в накоплении ПАУ свидетельствует об активном поглощении полиаренов из почвы.

Исследование накопления полиаренов разными органами растений кустарникового яруса показало, что для *Betula nana* на фоновых участках характерно следующее распределение ПАУ: листья > ветви > корни > кора > стволы, для загрязненных – листья > кора > ветви > корни > стволы. При отсутствии загрязнения содержание ПАУ в коре растений минимально. В условиях техногенеза характер накопления полиаренов растениями изменялся. В зонах действия угольных шахт в 2.0 раза увеличилось содержание полиаренов в коре и листьях растений. Содержание ПАУ в ветвях и стволыках и корнях растений фоновых и загрязненных участков примерно одинаково. Сходные данные получены для *Salix lanata* (табл. 3). На загрязненном участке в 4.0 раза возросло содержание полиаренов в листьях кустарника. При этом их содержание в стволыках, коре и ветвях и корнях практически не отличалось от фоновых значений. Этот факт свидетельствует об отсутствии поглощения полиаренов. Полиарены при загрязнении поступают на поверхность надземных органов кустарников из атмосферы и аккумулируются на поверхности. Накопление ПАУ происходит и в корневой системе растений, но активного транспорта полиаренов из корней в надземные органы не наблюда-

ли. Повышенное содержание полиаренов в листьях кустарников при их низкой концентрации в стволыках и ветвях свидетельствует об активном поступлении ПАУ на листовую поверхность в районе действия шахты «Юнь-Яга». Явно выраженное повышение содержания полиаренов в коре *Betula nana* обусловлено меньшей облиственностью кустарников данного вида по сравнению с *Salix lanata*. Листья *Salix lanata* почти полностью покрывают стволыки, хорошо развитая листовая поверхность препятствует проникновению ПАУ из атмосферы на поверхность коры.

Таким образом, полученные результаты позволили предположить, что особенности накопления полиаренов растениями зависят от свойств растений (жизненной формы, облиственности, расположения корневой системы, ритма развития) и условий произрастания. Это объясняется различными механизмами усвоения, накопления, метаболизма и выведения загрязняющих веществ, которые могут варьировать в условиях техногенеза и при отсутствии загрязнения.

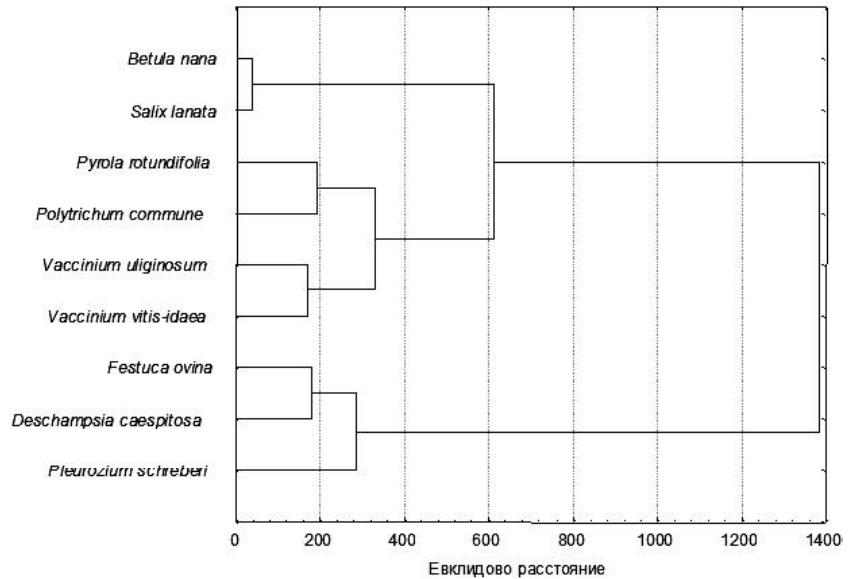
Для травянистых растений с их мощной корневой системой характерно накопление полиаренов в корнях. В листопадных кустарничках основная масса полиаренов концентрируется в листьях. В растениях верхнего яруса распределение полиаренов по органам на фоновом к загрязненному участкам разное. Минимальное накопление ПАУ в стволыках и ветвях кустарников на загрязненных участках свидетельствует о поверхностном загрязнении данных растений атмосферными аэрозолями.

Кластерный анализ накопления полиаренов растениями разных видов подтверждает факт, что биоаккумуляция ПАУ во многом связана со структурными особенностями растений (см. рисунок). Наибольшее сходство в поглощении ПАУ было характерно для модельных кустарников *Betula nana* и *Salix lanata*, которые могли поглощать значительное количество полиаренов из атмосферы и характеризовались наименьшим накоплением полиаренов по сравнению с другими исследованными растениями. Высокая степень сходства выявлена для кустарничков (*Vaccinium vitis-idaea* и *V. uliginosum*) и для травянистых растений с мощной корневой системой (*Festuca ovina* и *Deschampsia caespitosa*). Для травянистых растений характерно накопление значительных количеств полиаренов из почвы, что доказывает повышенное содержание ПАУ в корнях. Для кустарничков характерно как корневое поглощение ПАУ, так и накопление из атмосферы через листовую поверхность. Следует отметить высокую степень сходства в накоплении полиаренов у *Vaccinium uliginosum* и травянистого растения *Chamaenerion angustifolium*. По-видимому *C. angustifolium* с большой поверхностью листьев и мощной корневой системой, как и кустарнички, мог накапливать полиарены из почвы и атмо-

сферного воздуха. Из-за воскового налета на листьях, который способствует более легкому смыванию полиаренов с листовой поверхности и усложняет поглощение ПАУ из атмосферы, *Vaccinium vitis-idaea* поглощает ПАУ в меньшей степени, чем вышеприведенные виды растений, поэтому сходство *Vaccinium vitis-idaea* с *Vaccinium uliginosum* менее выражено. Довольно высокая степень сходства в поглощении ПАУ проявляется у *Polytrichum commune* и *Pyrola rotundifolia*. Оба растения низкорослые вечнозеленые, *Pyrola rotundifolia* с маломощной подземной частью, *Polytrichum commune* не имеет настоящих корней. Данные виды характеризуются повышенным накоплением полиаренов, вероятно, поглощают ПАУ в большей степени из атмосферы. Присутствует некоторая степень сходства в накоплении ПАУ *Polytrichum commune* и *Pyrola rotundifolia* с накоплением полиаренов кустарничками. Известно, что некоторые морфологи относят виды рода *Pyrola* не к травам, а к кустарничкам. Закономерности накопления полиаренов в *Pleurozium schreberi* близки к таковым у травянистых растений, хотя основной вклад в поглощение ПАУ *Pleurozium schreberi* ввиду отсутствия настоящих корней вносит поступление полиаренов из атмосферы. Возможно, объединение данных видов в одну группу связано с повышенными концентрациями ПАУ, характерными для растений этого кластера.

Заключение

В растениях полосы южной тундры были обнаружены 15 индивидуальных ПАУ: нафталин, аценафтен, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, хризен, бенз[а]антрацен, бензо[к]-флуорантен, бенз[а]пирен, бенз[ghi]перилен, бензо[b]флуорантен и дибенз[а,h]антрацен. В угле шахты «Юнь-Яга» и почвах исследованных участков присутствовали все перечисленные ПАУ, кроме аценафтена. Доля низкомолекулярных ПАУ (нафталин, флуорен и пирен) в угле, органических горизонтах почв и растениях составляет 76-99%. Суммарное содержание ПАУ в почвах загрязненного участка превышало фоновые значения в 4.0 раза. Максимальным накоплением ПАУ в зоне действия шахты отличались мхи и травянистые растения. Для растений максимальные кратности превышения фоновых значений составляли 3.0-4.0 раза и были выявлены для *Pleurozium schreberi* и *Pyrola rotundifolia*. Наибольшие кратности превышения содержания ПАУ в почвах и растениях выявлены для тяжелых ПАУ, что связано с их минимальным содер-



Сходство в накоплении полиаренов разными видами растений в зоне действия шахты «Юнь-Яга», метод Варда.

жанием на фоновых участках. Содержание бенз[а]пирена в растениях изменялось подобно изменению суммарного содержания полиаренов.

Наибольшая массовая доля ПАУ в растениях полосы южной тундры приходится на *Pleurozium schreberi*. Его вклад в накопление ПАУ составлял 52-56% от суммарного значения. Доля кустарников в накоплении полиаренов составляет 19-26% и достигает наибольших значений на загрязненных участках в связи с низкой биомассой растений нижнего яруса. Вклад растений кустарникового яруса в суммарное накопление ПАУ растениями незначителен ввиду их низкой способности накапливать полиарены. На загрязненном участке выявлено снижение суммарного выноса полиаренов из почвы, что обусловлено обеднением видового состава и снижением биомассы растений в условиях техногенеза.

Распределение полиаренов по органам модельных растений неравномерное и определяется как морфологией растений и особенностями биохимических процессов, протекающими в них, так и уровнем загрязнения. Мхи и лишайники с развитой ассимилирующей поверхностью поглощают ПАУ из атмосферы в течение всего года, в то время как травы и листопадные кустарнички лишь в течение вегетационного периода. Для травянистых растений выявлена активная биоаккумуляция полиаренов корнями. Кустарнички равномерно накапливают полиарены из почвы и атмосферы. В накопление ПАУ растениями кустарникового яруса большой вклад вносит атмосферное загрязнение. Мы предполагаем, что полиарены при загрязнении поступают на поверхность кустарников из атмосферы и аккумулируются в верхнем слое тканей, не проникая внутрь. Накопление ПАУ кустарничками происходит и через их корневую систему, но активной миграции полиаренов из корней в надземные органы не

наблюдали. Для дальнейшего изучения поступления полиаренов в растения необходимо проведение дополнительных исследований загрязнения снежного покрова и атмосферных аэрозолей полиаренами. Необходимо также изучение биологических особенностей исследуемых видов, например, расчет таких показателей, как индекс листовой поверхности.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы «Пространственно-временные закономерности формирования торфяных почв на европейском северо-востоке России и их трансформация в условиях меняющегося климата и антропогенного воздействия» (№ Гр 115020910065).

ЛИТЕРАТУРА

Атлас почв Республики Коми / Отв. ред. А. И. Таскаев. – Сыктывкар, 2010. – 356 с.

Атлас Республики Коми по климату и гидрологии / Отв. ред. А. И. Таскаев. – М., 1997. – 116 с.

Безносиков, В. А. Фракционно-групповой состав гумуса криогенных поверхностно-глеевых и гидроморфных почв Большеземельской тундры / В. А. Безносиков, Е. Д. Лодыгин // Вестн. СПбГУ. – Сер. 3. Биол. – 2012. – Вып. 1. – С. 107-120.

Белых, Л. И. Распределение полициклических ароматических углеводородов в системе почва–растение / Л. И. Белых // Почвоведение. – 2009. – № 9. – Р. 1083-1089.

Биоаккумуляция полициклических ароматических углеводородов в системе почва–растение / Е. В. Яковлева, В. А. Безносиков, Б. М. Кондратенко, Д. Н. Габов, М. И. Василевич // Агрехимия. – 2008. – № 9. – С. 66-74.

Грибова, С. А. Растительность европейской части СССР / С. А. Грибова, Т. И. Исаченко, Е. М. Лавренко. – Л.: Наука, 1980. – 236 с.

Дымов, А. А. Свойства почв и почвоподобных тел г. Воркута / А. А. Дымов, Д. А. Каверин, Д. Н. Габов // Почвоведение. – 2013. – № 2. – С. 240-248.

Закономерности биоаккумуляции полициклических ароматических углеводородов в системе почва–растения биоценозов северной тайги / Е. В. Яковлева, В. А. Безносиков, Б. М. Кондратенко, Д. Н. Габов // Почвоведение. – 2012. – № 3. – С. 356-367.

Закономерности формирования полициклических ароматических углеводородов в почвах северной и средней тайги / Д. Н. Габов, В. А. Безносиков, Б. М. Кондратенко, Е. В. Яковлева // Почвоведение. – 2008. – № 11. – С. 1134-1143.

Загрязнение почвенно-растительного комплекса в окрестностях рудника «Баренцбург» полициклическими ароматическими углеводородами / Б. Н. Демин, А. П. Граевский, А. С. Демешкин, С. В. Власов // Арктика: экология и экономика. – 2012. – № 3 (7). – С. 62-73.

Клар, Э. Полициклические ароматические углеводороды / Э. Клар. – М.: Химия, 1971. – Т. 1, 2. – 457 с., 454 с.

ПНД Ф 16.1:2:2. 2:3. 39-03. (2003). МВИ массовой доли бенз[а]пирена в пробах почв, грунтов, донных отложений и твердых отходов методом ВЭЖХ с использованием жидкостного хроматографа «Люмахрам». – М., 2012. – 27 с.

Ровинский, Ф. Я. Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов / Ф. Я. Ровинский, Т. А. Теплицкая, Т. А. Алексеева. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 224 с.

Родин, Л. Е. Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах / Л. Е. Родин, Н. П. Ремцов, Н. И. Базилевич. – Л.: Наука, 1968. – 143 с.

Содержание бенз[а]пирена в почвах и растениях Эстонии / И. А. Велдре, М. А. Раху, А. Р. Итра, А. П. Ильницкий, Л. П. Паальме // Растения и химические канцерогены / Отв. ред. Э. И. Слепян. – Л.: Наука, 1979. – С. 101.

Торлопова, Н. В. Влияние поллютантов на хвойные фитоценозы (на примере Сыктывкарского лесопромышленного комплекса) / Н. В. Торлопова, Е. А. Робакидзе. – Екатеринбург, 2003. – 142 с.

Шурубор, Е. И. Полициклические ароматические углеводороды в системе почва–растение района нефтепереработки (Пермское Прикамье) / Е. И. Шурубор // Почвоведение. – 2000. – № 12. – С. 1509-1514.

A fast extraction technique for extracting polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from lichens samples used as biomonitors of air pollution: Dynamic sonication versus other methods / C. Domeno, M. Blasco, C. Sanchez, C. Nerin // *Analyt. Chim. Acta*, 2006. – Vol. 569. – P. 103-112.

Accumulation and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in rice (*Oryza sativa*) / S. Tao, X. C. Jiao, S. H. Chen, W. X. Liu, R. M. Coveney, L. Z. Zhu, Y. M. Luo // *Environm. Pollution*. – 2004. – Vol. 320. – P. 11-24.

Contamination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments and plants of mangrove swamps in Shenzhen, China / F. Li, X. Zeng, J. Yang, K. Zhou, Q. Zan, A. Le, N.F.Y. Tam // *Marine Pollution Bull.* – 2014. – Vol. 85. – № 2. – P. 590-596.

Effects of nutrient and temperature on degradation of petroleum hydrocarbons in contaminated sub-Antarctic soil / F. Coulon, E. Pelletier, L. Gourhant, D. Delille // *Chemosphere*. – 2005. – Vol. 58. – P. 1439-1448.

Interspecies and interregional comparisons of the chemistry of PAHs and trace elements in mosses *Hypnum splendens* (Hedw.) B.S.G. and *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. from Poland and Alaska / Z. M. Migaszewski, A. Galuszka, J. G. Crock, P. J. Lamothe, S. Dolegowska // *Atmospheric Environmt.* – 2009. – Vol. 43. – P. 1464-1473.

Multiple indicators of human impacts on the environment in the Pechora Basin, north-eastern European Russia / T. R. Walker, P. D. Crittenden, V. A. Dauvalter, V. Jones, P. Kuhry, O. Loskutova, K. Mikola, A. Nikula, E. Patova, V. I. Ponomarev, T. Pystina, O. Ratti, N. Solovieva, A. Stenina, T. Virtanen, S. D. Young // *Ecol. Indicators*. – 2009. – № 9. – P. 765-779.

Nadala, M. Levels of PAHs in soil and vegetation samples from Tarragona County, Spain / M. Nadala, M. Schuhmachera, J. L. Domingo // *Environm. Pollution*. – 2004. – Vol. 132. – P. 1-11.

Polycyclic aromatic hydrocarbons in highway plants and soils. Evidence for a local distillation effect / C. Bryselbout, P. Henner, J. Carsignol, E. Lichtfouse // *Analisis*. – 2000. – Vol. 28. – № 4. – P. 290-293.

Studies on the sources of benzo[а]pyrene in grain and aboveground tissues of rice plants / P. Li, X. Li, F. Stagnitti, H. Zhanga, X. Linb, S. Zangc, J. Zhuoa, X. Xionga // *J. Hazardous Materials*. – 2009. – Vol. 162. – P. 463-468.

ACCUMULATION OF POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS IN PLANTS OF THE TUNDRA ZONE AT OPEN COAL MINE

E.V. Yakovleva, D. N. Gabov, V.A. Beznosikov

Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar
E-mail: kaleeva@ib.komisc.ru

Abstract. Using the method of highly-efficient liquid chromatography, we have revealed contents of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils and plants in shrub south tundra region in conditions of aerotechnogenic pollution. Accumulation mechanisms of polyarenes by plants at the background area and in the impact zone of open coal mine were identified. By the obtained results, soils and plants of the background and aerotechnogenically polluted plots and coal were dominated by low molecular weight PAHs. The greatest difference between the background and the study plots was demonstrated by heavy PAHs because they were almost absent at the background area. Benz[a]pyrene concentration in plants changed in the same manner as the total concentration of PAHs. The highest weight portion of PAHs in plants of shrub tundra region belonged to *Pleurozium schreberi*. Contribution of upper layer plants to the total plant accumulation of PAHs was insignificant. Distribution of polyarenes in plants organs was unregular and depended on both plant biomorphology and pollution level. This work was supported by the state budget theme «Existential regularities of formation of peat soils in the European northeast of Russia and their transformation in the conditions of the changing climate and anthropogenous influence » (№ Гр.115020910065).

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons, coal-mining industry, tundra, soil, plants

ХРОНИКА, СОБЫТИЯ, ФАКТЫ

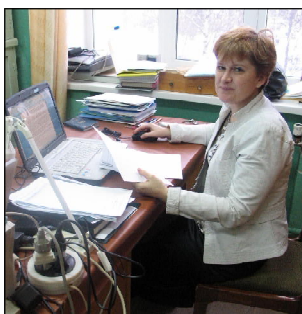
ТАТЬЯНА НИКОЛАЕВНА ПЫСТИНА

23 декабря празднует свой юбилей старший научный сотрудник лаборатории геоботаники и сравнительной флористики Татьяна Николаевна Пыстина.

Т.Н. Пыстина – специалист в области лишенологии и охраны растительного мира европейского северо-востока России. Она работает в Институте биологии с 1989 г. после окончания Сыктывкарского государственного университета. В 2000 г. успешно защитила диссертационную работу на соискание ученой степени кандидата биологических наук по теме «Лишениофлора равнинной части Республики Коми (подзоны южной и средней тайги)».

Сегодня Т.Н. Пыстина – широко известный специалист-лихенолог. Она является автором и соавтором 140 опубликованных работ, в том числе 12 монографий. Ею внесен большой научный и практический вклад в исследования лишенобиоты Республики Коми. Получены данные о видовом разнообразии лишайников и их распространении в регионе, а также на сопредельных территориях – в Кировской области и Ненецком автономном округе. Для Республики Коми составлен аннотированный список видов, включающий более 1000 таксонов. Среди них есть виды, которые приводятся впервые для Европы, для европейского Северо-Востока, а более 400 видов выявлены Т.Н. Пыстиной впервые для республики. Татьяной Николаевной подготовлены очерки о редких видах лишайников и оригинальные рисунки для Красной книги Республики Коми. Особое внимание в своих исследованиях она уделяет вопросам изучения биот лишайников на особо охраняемых природных территориях. Сведения о редких видах лишайников, нуждающихся в охране, вошли в разделы коллективных монографий «Атлас Республики Коми (2011), «Биологическое разнообразие ООПТ Республики Коми» (2011), «Природное наследие Урала» (2012). Результаты исследований создают теоретическую основу для решения проблем сохранения биологического разнообразия и устойчивого функционирования экосистем в изменяющихся условиях среды, вносят вклад в решение проблемы рационального использования и возобновления природных ресурсов.

Т.Н. Пыстина активно участвует в выполнении проектов по программам РФФИ, Президиума РАН, УрО РАН, а также Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Коми, является экспертом по ведению Красной книги Республики Коми. Она активно участвует в международных исследовательских проектах и развивает международное сотрудничество, была ведущим экспертом в ряде проектов ГЭФ-ПРООН, принимала участие в международных



проектах, реализуемых в Институте биологии (SPICE, PRISM, PRIST).

Т.Н. Пыстина многие годы является членом и председателем комиссий государственной экологической экспертизы. Она уделяет большое внимание внедренческим работам, является ответственным исполнителем хозяйственных договоров, направленных на мониторинг воздействия промышленной деятельности на природные экосистемы.

Т.Н. Пыстина вносит большой вклад в экологическое воспитание школьников, студентов и населения Республики Коми, популяризацию научных знаний, участвует в

организации учебно-научной деятельности школьников и студентов. С 2004 по 2007 г. она совмещала научную деятельность с педагогической, разработала и читала на физико-математическом факультете Коми государственного педагогического института (КГПИ) курс «Биология с основами экологии», для студентов факультета дополнительного образования института – курс «Экология организмов». Т.Н. Пыстина руководила выполнением семи дипломных работ студентов химико-биологического факультета Сыктывкарского университета и географо-биологического факультета. Она много лет является председателем жюри секции «Природное наследие Коми края. К туристскому мастерству» на ежегодном проводимых Республиканских краеведческих олимпиадах по школьному краеведению и Республиканских конференциях участников туристско-краеведческого движения «Отечество-земля Коми», участвовала в составе жюри школьных конференций, проводимых эколого-образовательным центром Института биологии «Снегирь». Регулярно проводит занятия в летних полевых школах юных натуралистов, оказывает консультации для слушателей Малой академии, учителей биологии образовательных школ г. Сыктывкара и других регионов Республики Коми, руководителей экологических кружков, преподавателей высших учебных заведений РК.

Т.Н. Пыстина награждена благодарностями Министерства образования Республики Коми, и Почетными грамотами Общества изучения Коми края, Коми научного центра УрО РАН, Профсоюза работников Российской академии наук, Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Коми.

Коллеги знают и ценят Т.Н. Пыстину как трудолюбивого, ответственного, вдумчивого специалиста, отзывчивого, внимательного человека, замечательную маму и бабушку и желают ей здоровья, новых открытий и свершений, талантливых учеников.

**МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«БИОМЕДИЦИНСКИЕ ИННОВАЦИИ ДЛЯ ЗДОРОВОГО ДОЛГОЛЕТИЯ»
(Санкт-Петербург, 25-28 апреля 2016 г.)**

Е.Н. Прошкина, М.В. Шапошников, А.А. Москалев

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, Сыктывкар*

С 25 по 28 апреля 2016 г. в г. Санкт-Петербурге прошла первая международная конференция «Биомедицинские инновации для здорового долголетия». Биogerонтология и регенеративная медицина являются быстро развивающимися направлениями, обещающими преобразить систему здравоохранения, увеличить здоровую продолжительность жизни и обеспечить продуктивное долголетие. Последние достижения в разработке биомаркеров старения, выявлении эпигенетических, транскриптомных и мультимодальных возрастных особенностей, открытие новых и проверка применимости в медицинских целях известных геропротекторов, а также достижения в области генной терапии дают оптимистичный прогноз в обозримой перспективе. Тем не менее, внедрение лабораторных достижений в клиническую практику происходит сравнительно медленно, что связано с невысоким уровнем инвестиционного и грантового финансирования и отсутствием международных интеграционных программ в области технологий активного долголетия.

Цель конференции состояла в обсуждении последних медико-биологических достижений в биogerонтологии, оценке их внедренческого потенциала и ускорении перехода от лабораторных исследований к клиническому и коммерческому использованию.

Конференция состоялась при поддержке инвестиционной платформы «Ай Вао» (<http://ivaconf.com/>). Научная программа конференции была сформирована чл.-корр. РАН А.А. Москалевым (Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Россия), д-ром А. Жаворонковым (Insilico medicine, США), чл.-корр. РАН В.Н. Анисимовым (Президент Геронтологического общества при РАН, Россия) и д-ром О.Н. Ткачевой (Минздрав России) при поддержке А.Н. Фоменко (Основатель компании «Ай Вао», Россия).

В работе конференции приняли участие более 300 ученых из 20 стран (в том числе России, США, Китая, Италии, Германии, Израиля, Великобритании, Канады), представляющих крупнейшие научные и биомедицинские центры.

Участники конференции представили доклады по основным направлениям биogerонтологии, таким как эпигенетические механизмы старения; геномика, метаболомика, протеомика долголетия у человека и животных; окружающая среда и старение; биомаркеры биологического возраста; фармакологические вмешательства в старение; механизмы регенерации; системная биология и биоинформатика в исследованиях старения; нейрокогнитивное старение.

Среди ключевых докладчиков конференции были Брайан Кеннеди (Институт исследований старения Бака, США), Гуан-Хуэй Лю (Университет Шэньчжэня, Китай), Владимир Скулачев (Институт физико-химической биологии им. А.Н. Белозерского, Россия), Юшин Су (Медицинский колледж Альберта Эйнштейна, США), Клаудио Франчески (Университет Болоньи, Италия), Вера Горбунова (Университет Рочестера, США), Андрей Силуянов (Университет Рочестера, США), Вадим Гладышев (Гарвардская медицинская школа, США), Вольфганг Вагнер (Медицинская школа Университета Аахена, Германия), Ян Вайг (Медицинский колледж им. Альберта Эйнштейна, США), Мэтт Каберлейн (Университет Вашингтона, США), Дэвид Джемс (Университетский колледж Лондона, Великобритания), Вальтер Лонго (Университет Южной Калифорнии, США), Джон Тауэр (Университет Южной Калифорнии, США), Михаил Благосклонный (Онкологический институт им. Розвела Парка, США), Стефан Шпиндлер (Университет Кали-



Сотрудники Института биологии на конференции «Биомедицинские инновации для здорового долголетия». Слева направо: Михаил Шапошников, Алексей Белый, Дарья Чернышова, Надежда Земская, Илья Соловьёв, Екатерина Прошкина, Алексей Москалев, Евгения Добровольская, Екатерина Лашманова.

форнии, США), Анатолий Яшин (Университет Дьюка, США), Арнольд Митницкий (Университет Далхаузи, Канада), Анча Баранова (Университет Джорджа Мейсона, США), Вадим Фрайфелд (Университет Бен-Гуриона, Израиль), Андреас Симм (Галле-Виттенбергский университет им. Мартина Лютера, Германия), Тамас Фулоп (Университет Шербрука, Канада), Вишва Дип Диксит (Йельская школа медицины, США), Даниэль Бельский (Университет Дьюка, США), Андрей Гудков (Онкологический институт им. Розвела Парка, США), Бланка Рогина (Университет Коннектикута, США), Хусру Асәдалла (Главный редактор журнала «Успехи прецизионной медицины», Германия), Жао Педро де Магалхас (Ливерпульский университет, Великобритания), Джеймс Р. Митчелл (Гарвардская школа общественного здравоохранения, США), Михаил Джазвинский (Тулейнский университет Луизианы, США).

Брайан Кеннеди (Институт исследований старения Бака, США) представил лекцию на тему «Гендер-специфические эффекты mTOR пути на метаболизм и старение». mTOR является основным внутриклеточным сенсором наличия питательных веществ, который регулирует клеточный рост и пролиферацию. Активированная mTOR-сигнализация связана с увеличением поглощения питательных веществ и ведет к снижению аутофагии, что часто наблюдается при многих раковых заболеваниях и метаболических расстройствах, таких как сахарный диабет II типа. Напротив, снижение активности mTOR путем ограничения калорийности, воздействия рапамицина или генетических манипуляций увеличивает продолжительность жизни и состояние здоровья многих модельных организмов. В проведенных ранее исследованиях Ричарда Миллера и соавторов было показано, что рапамицин в большей степени увеличивает продолжительность жизни

самок мышей, чем самцов. Однако механизмы гендер-специфического действия рапамицина изучены не полностью. Известны две ключевые мишени mTORC, которые связаны с увеличением продолжительности жизни – это S6 киназа (S6K1) и связывающий белок эукариотического фактора инициации трансляции 4E (4E-BP1). В работе Б. Кеннеди было показано, что 4E-BP1 является гендер-зависимым регулятором процессов метаболизма. Об этом свидетельствуют следующие факты: 1) снижение экспрессии 4E-BP1 коррелирует с прогрессированием симптомов диабета у самцов мышей, содержащихся на диете с высоким содержанием жиров; 2) сверхэкспрессия 4E-BP1 защищает от индуцированного ожирения и инсулинорезистентности у самцов мышей, содержащихся на диете с высоким содержанием жиров; 3) при старении самцы мышей со сверхэкспрессией 4E-BP1 имеют сниженный вес и более высокую скорость обмена веществ.

Ян Вайг (Медицинский колледж им. Альберта Эйнштейна, США) сделал доклад по теме «Нестабильность генома: консервативный механизм старения?». Накопление мутаций ДНК в соматических клетках является одной из возможных причин старения. Тем не менее, соматические мутации встречаются редко и могут быть обнаружены только в клональных линиях, таких как опухоли или органеллы. Я. Вайг использовал метод секвенирования геномов одиночных клеток для выявления мутаций и обнаружил, что частота мутаций в соматических клетках значительно выше, чем в клетках зародышевой линии. Уровень соматических мутаций у долгоживущих видов (голый землекоп, человек) значительно меньше, чем у короткоживущих (мышь). Также было показано увеличение уровня возраст-зависимых соматических мутаций в лейкоцитах человека. Анализ последовательностей ДНК гено-



Брайан Кеннеди (Институт исследований старения Бака, США).



Ян Вайг (Медицинский колледж им. Альберта Эйнштейна, США) и Юшин Су (Медицинский колледж Альберта Эйнштейна, США).



Вера Горбунова и Андрей Силуанов (Университет Рочестера, США).

мов одиночных клеток может быть использован для изучения спектра соматических мутаций в различных органах и тканях пожилых людей.

Юшин Су (Медицинский колледж Альберта Эйнштейна, США) провела лекцию на тему «Использование функциональной геномики при разработке мишеней для замедления старения у человека». Открытие эволюционно-консервативных сигнальных путей, оказывающих большое влияние на продолжительность жизни и здоровое долголетие модельных животных, увеличило возможности выявления новых мишеней для терапевтических вмешательств с целью коррекции возраст-зависимых изменений в организме человека. Используя методы функциональной геномики, авторы выявили редкие мутации со сниженной функцией в гене рецептора инсулиноподобного фактора роста 1 (IGF1R), которые с высокой частотой встречаются у долгожителей. Также в лаборатории Юшин Су было показано, что долгожители имеют повышенный уровень экспрессии микроРНК, снижающих активность многих компонентов инсулиновой сигнализации, что ведет к уменьшению активности компонентов молекулярного пути IGF1 на модели клеточных культур. Таким образом, снижение функциональной активности генов в оси IGF1 вследствие мутаций и эпигенетической регуляции может способствовать увеличению продолжительности жизни человека. Полученные данные могут использоваться при разработке терапевтических вмешательств для замедления старения человека и борьбы с возраст-зависимыми патологиями.

Алексей Москалев (Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Россия) представил доклад «Исследование геропротекторов на модели *Drosophila*». Согласно проведенному анализу литературы, на сегодняшний день известно около 200 соединений, которые могут увеличить продолжительность жизни модельных организмов – дрожжей, нематод, дрозофил, грызунов. Все они представлены в разработанной лабораторией А. Москалева базе данных геропротекторов (www.geroprotectors.org). Очевидно, что в будущем исследования в этом направлении будут более интенсивными и число таких препаратов существенно возрастет. Возникает насущная проблема удешевить и повысить эффективность трансляции полученных данных о новых геропротекторах для человека. Для этого необходимо прийти к соглашению, что следует считать применимым к человеческим геропротекторами. В своем докладе А.А. Москалев предложил критерии выбора потенциального геропротектора.

Основные критерии геропротектора:

1. Увеличение продолжительности жизни у модельных организмов или человека.
2. Улучшение биомаркеров старения человека.
3. Низкая токсичность.
4. Минимальные побочные эффекты.
5. Улучшение качества жизни.

Дополнительные критерии геропротектора:

6. Эволюционный консерватизм мишени или механизма действия.

7. Воспроизводимость геропротекторных эффектов на различных модельных организмах.

8. Одновременное воздействие на несколько ассоциированных с возрастом причин смерти.

9. Повышение стрессоустойчивости.

Анализ опубликованных данных с использованием разработанных критериев позволил выявить препараты, которые соответствуют всем основным критериям. К ним относятся акарбоза, депренил, d-глюкозамин, дигидроэрготамина метансульфонат, эллаговая кислота, фенофибрат, глутатион, метформин, спермидин, тирозол и винпоцетин. Было сделано предположение, что данные препараты могут быть привлекательными кандидатами при исследовании геропротекторного действия у человека.

Исследованию роли механизмов репарации ДНК и деацетилазы гистонов SIRT6 был посвящен доклад Веры Горбуновой и Андрея Силуянова (Университет Рочестера, США). Результаты исследования роли генов, обеспечивающих поддержание целостности и восстановление генома, в регуляции продолжительности жизни на модели *Drosophila melanogaster* также были представлены Екатериной Прошкиной (Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Россия). Бланка Рогина (Университет Коннектикута, США) изложила результаты продолжения детального исследования положительных эффектов при выключении гена *Indy*, сделав акцент на связи механизмов поддержания энергетического гомеостаза и сохранения стволовых клеток кишечника. Михаил Шапошников (Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Россия) изложил новые данные о роли гена *SUN/klaroid*, участвующего в организации цитоскелета и нуклеоскелета, в старении и продолжительности жизни организма.

Заседания прошли при высокой активности участников, которым была дана возможность обсудить все научные сообщения. Параллельно с секционными заседаниями проходила постерная секция. Во время проведения конференции был организован бизнес-форум, посвященный лучшим практикам и новым подходам к коммерциализации исследования процессов старения.

Программа работы конференции выполнена в полном объеме. На заключительном заседании участниками было констатировано, что конференция прошла на высоком уровне и была весьма продуктивной, научная программа затрагивала аспекты изучения механизмов старения и контроля продолжительности жизни на всех уровнях биологической организации – от молекулярно-клеточного до организменного и популяционного. Участники выразили благодарность организаторам конференции за высокий уровень проведения научного мероприятия.