СОДЕРЖАНИЕ

Номер 2, 2020

ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ	
Газогидротермальное турбирование почв как фактор формирования микроповышений	
Н.Б.Хитров, В.Л.Убугунов, В.И.Убугунова, Ю.А.Рупышев, Т.А.Аюшина, А.Д.Жамбалова, Э.Г.Цыремпилов, А.Е.Парамонова, Ц.Н.Насатуева	133
Анализ динамики почвенно-продукционного потенциала экосистем речных бассейнов по данным дистанционного зондирования	
Т. А. Трифонова, Н. В. Мищенко, Ж. Д. Петросян	152
Почвенно-экологические условия на нео-энеолитическом поселении "Орошаемое" в Нижнем Поволжье	
А. Ю. Овчинников, А. А. Выборнов, М. А. Кулькова, О. Г. Занина, Д. А. Лопатина, Н. С. Дога, А. И. Юдин, В. М. Алифанов	165
химия почв	
Оценка комплексообразования органического вещества почв с медью методом аффинной хроматографии	
А. А. Дымов, Е. Ю. Милановский	178
Изотопный состав углерода и полиарены в педогенном материале ледяных жил Батагайской едомы (Якутия)	
Ю. К. Васильчук, А. Д. Белик, Н. А. Буданцева, А. Н. Геннадиев, Дж. Ю. Васильчук	188
Особенности черноземных почв района Хоперского глубинного разлома земной коры	
Н. И. Суханова, С. Я. Трофимов, А. Л. Степанов, А. В. Кирюшин	199
БИОЛОГИЯ ПОЧВ	
Количественная оценка минерализуемого пула органического вещества в криоземах тундр Колымской низменности	
А. К. Ходжаева, А. В. Шатилович, С. В. Губин, А. В. Лупачев	210
ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ	
Моделирование технологии "контурного заводнения" в микрокосмах	
Т. Н. Щемелинина, Е. М. Анчугова, Е. М. Лаптева, Р. С. Василевич, М. Ю. Маркарова, Е. Н. Глазачева, М. В. Успенская	219
Динамика свойств почв и структуры запасов углерода в постагрогенных экосистемах в процессе естественного лесовосстановления	
И. М. Рыжова, В. М. Телеснина, А. А. Ситникова	230
Интегральная оценка экологического состояния почвенного покрова при добыче газа в Среднем Приангарье	
И. А. Белозерцева	244

Contents

No. 2, 2020

Genesis and Geography of Soils	
Genetic Sequence of Microhighs in the Region with Gas-Hydrothermal Turbation of Soils	
N. B. Khitrov, V. L. Ubugunov, V. I. Ubugunova, Yu. A. Rupyshev, T. A. Ayushina, A. D. Zhambalova, E. G. Tsyrempilov, A. E. Paramonova, and Ts. N. Nasatueva	133
Dynamics of Soil-Productive Potential of River Basin Ecosystems Functioning in Different Climatic Conditions Assessed Basing on Remote Sensing Data	
T. A. Trifonova, N. V. Mishchenko, and J. D. Petrosyan	152
Soil-Ecological Conditions on Neo-Eneolithic Settlement "Oroshaemoe" in the Lower Volga Region	
A. Yu. Ovchinnikov, A. A. Vybornov, M. A. Kulkova, O. G. Zanina, D. A. Lopatina, N. A. Doga, A. I. Yudin, and V. M. Alifanov	165
Soil Chemistry	
IMAC-Chromatography Use to Asses the Complex-Forming Properties of Soil Organic Matter (with the Example of Copper Ions)	
A. A. Dymov and E. Yu. Milanovskii	178
Isotopic Composition of Carbon and Polyarenes in Pedogenic Material of Ice Wedges of Batagay Yedoma (Yakutia)	
Yu. K. Vasil'chuk, A. D. Belik, N. A. Budantseva, A. N. Gennadiev, and J. Yu. Vasil'chuk	188
Some Features of Chernozem Soils Formed in the Area of Khoper Deep Fault of the Terrestrial Crust	
N. I. Sukhanova, S. Ya. Trofimov, A. L. Stepanov, and A. V. Kiryushin	199
Soil Biology	
Quantification of Mineralizable Pool of Organic Matter in Tundra Cryosols of Kolyma Lowland	
A. K. Khodzhaeva, A. V. Shatilovich, S. V. Gubin, and A. V. Lupachev	210
Degradation, Rehabilitation, and Conservation of Soils	
Modeling of the "Contour Water Flooding" Technology in Microcosms	
T. N. Shchemelinina, E. M. Anchugova, E. M. Lapteva, R. S. Vasilevich, M. Yu. Markarova, E. N. Glazacheva, and M. V. Uspenskaya	219
Dynamics of Soils Properties and Carbon Stocks Structure in Postagrogenic Ecosystems of Southern Taiga during Natural Forest Restoration	
I. M. Ryzhova, V. M. Telesnina, and A. A. Sitnikova	230
Experience of Integrated Assessment of Soil Cover State at Production of Underground Energy Resource in Middle Angara Catchment	
I. A. Belozertseva	244

ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 631.4(571.54)

ГАЗОГИДРОТЕРМАЛЬНОЕ ТУРБИРОВАНИЕ ПОЧВ КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОПОВЫШЕНИЙ¹

© 2020 г. Н. Б. Хитров^a, *, В. Л. Убугунов b , В. И. Убугунова b , Ю. А. Рупышев b , Т. А. Аюшина b , А. Д. Жамбалова b , Э. Г. Цыремпилов b , А. Е. Парамонова b , Ц. Н. Насатуева b

^aПочвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия ^bИнститут общей и экспериментальной биологии СО РАН, ул. Сахьяновой, 6, Улан-Удэ, 670037 Россия *e-mail: khitrovnb@gmail.com

> Поступила в редакцию 24.05.2019 г. После доработки 04.08.2019 г. Принята к публикации 20.09.2019 г.

В северной части Баргузинской котловины в районе разгрузки Кучигерских гидротерм по периферии болот и на вогнутых заболоченных поверхностях аллювиальной равнины обнаружены валы и кочкообразные микроповышения неясного генезиса. Классический механизм образования кочек травяных болот здесь заменяется диапировым, возникающим вследствие давления восходящих газогидротермальных флюидов из сейсмически активных глубинных разломов. Представлено строение и некоторые свойства почв переходных участков от болотного массива с активными грифонами термальных вод Кучигерского источника к аллювиальной равнине, имеющих сильновыраженный микрорельеф в виде цепочек микроповышений на фоне сети микродолин. Получены эмпирические статистические кумулятивные распределения морфометрических характеристик микрорельефа. Исследованные микроповышения образуют генетический ряд газогидротермально турбированных почв от органогенных вариантов с минимальным внедрением снизу песчаного материала на краю болота до преимущественно минеральных вариантов выдавленного кверху глеевого горизонта разной степени окисления на аллювиальной равнине.

Ключевые слова: Байкальская рифтовая зона, газогидротермальные флюиды, морфология почв, микрорельеф, засоленность почв, пирит

DOI: 10.31857/S0032180X20020069

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время обращают внимание на развитие почв в экстремальных условиях среды [9], в частности на территориях с сильным влиянием эндогенных процессов. В таких почвах часто имеются признаки, которые не учитываются в существующих классификациях почв [6], что создает затруднения в идентификации почв и выяснении их генезиса.

Территории с выходами на поверхность гидротермальных источников встречаются на всех континентах [3]. Они приурочены к тектонически активным зонам с разломами земной коры и вулканами [3, 42, 52, 55]. На таких объектах исследуют тепловые поля [37, 47, 50, 54], состав и режим выделяющихся газов [13, 53] и изливающихся вод [25, 37, 53], гидротермальное преобразование минерального состава пород и почв [8, 14, 44, 45, 56, 57], изменение растительности и сообществ микроорганизмов [24, 29, 46]. Образование ряда древ-

них кор выветривания связывают с гидротермальными процессами [28].

Для некоторых наиболее известных объектов опубликованы сведения об особенностях строения почв термальных полей и прилегающих к ним территорий с менее выраженным влиянием гидротермального воздействия [5, 7, 8, 11, 17, 30, 48, 52, 55, 58, 59]. Отмечается, что горизонты в почвах, преобразованные гидротермальными процессами, отличаются более тяжелым гранулометрическим составом вплоть до глины за счет новообразования глинистых минералов в условиях повышенной температуры и особого состава поднимающихся подземных вод. Эти горизонты имеют разнообразную окраску от красной до сизой в зависимости от окислительно-восстановительных условий в горизонте. Имеются предложения по выделению особых гидротермально-метаморфических горизонтов Вт, Ст [7, 8, 33].

При характеристике рельефа термальных полей обращают внимание на образование вогнутых форм (котловин, грязевых котлов и др.) за

¹ К статье имеются дополнительные материалы, доступные по doi 10.1134/S0032180X20020069

счет увеличения количества пор и пустот при растворении минералов [33, 60]. В районах вулканов формируются эрозионные формы [59]. Изображения распределения почв вдоль катен имеют гладкие формы [30]. Сильновыраженный микрорельеф поверхности не отмечали.

Необычная озерно-болотно-аллювиальная равнина с разнообразным микрорельефом и выраженными признаками засоления существует в северовосточной части крыла Байкальской рифтовой зоны [27]. Для региона характерно островное распространение многолетнемерзлых пород [12]. Формирование почв происходит в условиях влияния эндогенной тепловой аномалии Кучигерских гидротерм в Баргузинской котловине [10, 36, 38]. Сложное сочетание условий развития территории предопределило актуальность исследований по выяснению генезиса сильновыраженного микрорельефа с разными морфометрическими параметрами.

Цель работы — представить строение почв переходных участков от болотного массива с активными грифонами термальных вод Кучигерского источника к аллювиальной равнине, имеющих сильновыраженный микрорельеф в виде цепочек микроповышений на фоне сети микродолин.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили возле д. Кучигер Курумканского района Республики Бурятия на северо-востоке Баргузинской котловины в Улюнханской впадине. На этой территории отмечается сеть дизьюнктивных нарушений [18, 34] и максимальные параметры теплового потока в Байкальской рифтовой зоне [4, 18-20]. Выклинивание Кучигерских гидротермальных вод связано с пересечением генерального Баргузинского и поперечного Дыренского разломов [4, 39]. Вода термы имеет сильнощелочную реакцию (рН 9.28-9.90) и минерализацию 365-508 мг/дм³. Химический состав вод — хлоридно-сульфатно-фторидно-гидрокарбонатный натриевый [40]. По газовому составу воды источника отнесены к Байкальской гидротермальной области азотных терм, содержание азота достигает 63.3-95.5% [13, 25]. Разгрузка терм происходит в рыхлые, илистые отложения на площади примерно 200×500 м [40]. С западной стороны болотный массив ограничен шлейфом делювиальных отложений, сравнительно круто поднимающимся в сторону Баргузинского хребта, с восточной стороны — полого поднимающейся аллювиальной равниной, прорезанной узкой долиной р. Индихэн.

Изучены ключевые участки почвенно-геоморфологической трансекты РФ-2 с сильновыраженным микрорельефом в виде цепочек микроповышений среди сети микродолин. Они расположены в переходной полосе от болота к аллювиальной равнине (рис. 1). Объектами изучения были почвы и растительность болотных и заболоченных экосистем (разрезы РФ-2-11, РФ-2-12, РФ-2-16 и РФ-2-18), дневная поверхность которых представлена микроповышениями неясного генезиса.

На каждом участке выполняли морфометрические измерения параметров микрорельефа: длины, ширины, высоты микроповышений, ширины микродолин и др. Объем выборки составлял от 22 до 57. На основе этих данных получены эмпирические статистические кумулятивные распределения.

Ботанические наблюдения проводили методом конкретных (локальных) флор [35] в пределах урочища с использованием проб флоры окрестностей (географического) пункта [41, 43]. Материалы обрабатывали согласно общепринятым методикам [22]. Отнесение растений к экологическим группам по факторам влажности и засоленности давали в соответствии с работами [15, 23]. Анализ биоморф растений проводили в соответствии с основными положениями биоморфологической классификации [31, 32]. Принадлежность к эколого-ценотическим комплексам, поясно-зональным группам определяли согласно [21].

Почвенные разрезы закладывали поперек цепочек микроповышений, захватывая соседние микродолины. Таким образом получали двумерное вертикальное сечение почв по микрокатене. Морфологическое описание почвенных профилей выполняли с использованием известных руководств [16, 49]. Почвы идентифицировали по диагностическим критериям, используемым в [26, 51], дополненных собственными предложениями по диагностике признаков импрегнирования почворганическим веществом [38].

Для всех объектов исследования фиксировали географические координаты с помощью приемника GPS.

В почвенных образцах определяли рН (почва : вода 1:2.5) потенциометрически, потерю органического вещества при прокаливании при 900° С, содержание органического углерода $C_{\rm opr}$ методом мокрого сжигания по Тюрину [1, 2], активности ионов Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , F^- , в почвенных пастах с влажностью 30 мас. % с помощью ионоселективных электродов, гранулометрический состав методом Качинского.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Строение кочек на болоте

Болотный массив представлен торфяно-перегнойными глеевыми почвами с общей мощностью органогенных горизонтов T+H от 40 до 70 см. Поверхность болота представлена нестрогой регулярной сетью чередующихся выпуклых торфяных кочек и вогнутых ячеек мочажин, заполненных

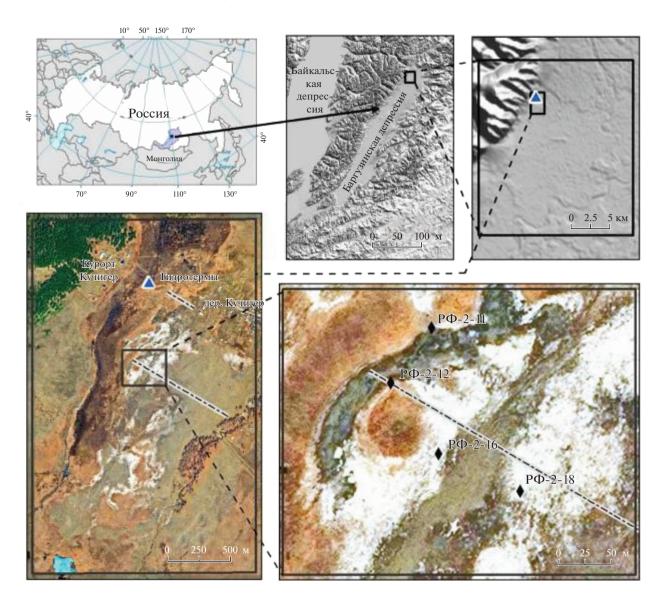


Рис. 1. Географическое положение объектов исследования.

водой глубиной до 2—10 см в зависимости от обилия дождей (рис. 2A). Кочки имеют высоту от 6—10 до 12—18 см и горизонтальный размер 30—40 см, мочажины — приблизительно такие же горизонтальные размеры от 25 до 40—45 см. В местах выходов газогидротермальных грифонов разной интенсивности образуются обширные мочажины, имеющие в диаметре от 1—2 до 5—10 м, похожие на небольшое озеро в болоте. Слой воды в таких озерах 5—15 см, под которым расположены бактериальные маты разного цвета: черные, серые, зеленые, оранжевые. На поверхности мата под водой отчетливо видны небольшие воронки диаметром 5—10 см и глубиной 5—7 см, из которых снизу периодически выделяются пузырьки газа (рис. 2Б).

Болотные кочки сложены эутрофным торфом (горизонт ТЕ), пронизанным живыми корневи-

шами тростника (Phragmites australis) и/или осоки (Carex reptabunda) и лапчатки гусиной (Potentilla anserina), а также других более редко встречающихся видов растений (рис. 2В, 2Г). Кочки имеют следующие особенности, которые позволяют легко их диагностировать в полевых условиях, не делая разрез лопатой. Они полностью представлены органогенным материалом с высокой влажностью и опираются основанием на водонасыщенный органогенный горизонт Н, представленный тонкослоистой толщей средне- и сильноразложившихся растительных остатков. После вскрытия нескольких кочек для получения морфометрических показателей строения ареал распространения таких органогенных кочек можно опробовать более щадящим способом. Органогенная обводненная кочка, покоящаяся

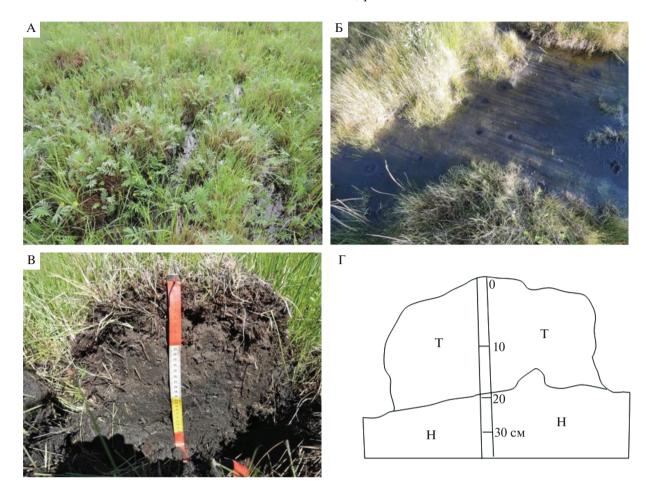


Рис. 2. Болотные растительные кочки: A — поверхность болота с кочками; B — крупная мочажина с подводными воронками выхода подземных газов через бактериальный мат; B — вертикальное сечение кочки (фото); Γ — схема строения кочки.

на органогенном водонасыщенном горизонте, проявляет ярко выраженные упругие свойства. При надавливании на кочку сверху ногой, она легко сжимается, а после снятия нагрузки обратно распрямляется, как пружина.

Удельная электропроводность болотной воды варьирует в диапазоне от 0.3 до 0.9 дСм/м. Температура воды постоянная 18-22°C в ближайшем окружении от действующих мелких грифонов и заметно изменяющаяся в зависимости от суточного хода температуры воздуха на расстояниях более 20–30 м от грифонов. Состав воды близок к составу разгружающихся подземных термальных вод. Среди катионов абсолютно доминирует натрий (более 90-95%). Активность ионов кальция очень низкая (менее 0.1 ммоль/л) и контролируется растворимостью флюорита за счет заметного содержания в воде фторидов. Среди анионов преобладают гидрокарбонат- и сульфат-ионы [25, 38]. По мере удаления от действующих грифонов в краевых частях болота удельная электропроводность воды и содержание в ней ионов натрия и сульфатов постепенно возрастает по сравнению с

составом термальных вод. Вместе с тем по формальным критериям, торфяный и перегнойный горизонты, как в кочках, так и в мочажинах, являются незасоленными [36].

Микроповышения переходной полосы (пояса) от болота с растительными кочками к сильновыдавленному дугообразному мезоповышению (валу-диапиру)

В болотном массиве, в который разгружаются подземные газогидротермальные флюиды возле Кучигера, помимо собственно заболоченной части встречается множество приподнятых участков, сложенных выдавленным снизу органогенным и минеральным материалом в разных соотношениях. Строение одной из траншей через такое повышение в виде острова на болоте, подробно рассмотрено ранее [38]. Такие структуры называют валами-диапирами [34].

Вокруг каждого крупного вала-диапира, имеющего ширину несколько метров и длину до нескольких десятков метров, наблюдается пояс из

нескольких цепочек микроповышений с очень крутыми боковыми стенками и слегка закругленной верхушкой (рис. S1, 3A). В сухую погоду поверхность таких микроповышений и многие растения, произрастающие на ней, покрыты выцветами легкорастворимых натриевых солей (рис. 3A, 3Б). Цепочки микроповышений в несколько рядов буквально опоясывают вал-диапир целиком или его части, которые имеют непосредственный контакт с болотом. На космическом снимке такие цепочки микроповышений с выцветами солей на поверхности образуют белую узкую кайму вдоль границ болота и валов-диапиров (рис. 1).

Растительность представлена дернистоосоковым (Carex cespitosa) болотистым лугом, включающим 12 видов растений. Доминирующий вид — Car*ex cespitosa*. Проективное покрытие — 63%, высота травостоя от 10 до 60 см. Структура двухъярусная, обычные виды этих лугов: Agrostis mongolica, Poa pratensis, Carex coriophora, Carex bicolor, Eriophorum polystachyon, Equisetum arvense, Equisetum palustre, Rhinanthus aestivalis, Triglochin palustre, Trifolium repens, Vicia cracca. В эколого-ценотической структуре присутствуют водно-болотные растения при доминировании луговых видов. Отличительной особенностью биоморфологического спектра является равное участие длинно- и короткокорневищных стержнекорневых групп растений. По отношению к фактору влажности доминируют гигрофиты.

Рассмотрим особенности микроповышений, возникших в переходной полосе между одним валом-диапиром и двумя болотными массивами разного размера, примыкающими к нему с разных сторон. Этот вал расположен на юго-западной окраине основного болотного массива приблизительно в 500-700 м к западу от наиболее активных грифонов гидротермальных источников и дер. Кучигер ниже по течению безымянного ручья. Вал-диапир имеет форму слабоизогнутой дуги длиной около 250 м, расширенной до 20-30 м в центральной части и сужающейся до 5-7 м в концевых участках (рис. S1). Относительное превышение вала в центральной части составляет 1.6—1.7 м по сравнению с уровнем воды в болоте с обеих сторон. Его поверхность плавно понижается вдоль дуги и сравнительно круто в поперечном направлении. По верхней части дуги диапира отчетливо выделяется гряда бугорков, смещенная ближе к основному болотному массиву, который находится в зоне активной разгрузки термальных вод. Выпуклая в плане сторона дуги вала-диапира граничит с основным болотным массивом, а вогнутая внутренняя сторона дуги – с отшнурованным замкнутым участком болота округлой формы. Несколько рядов цепочек сильновыступающих микроповышений с выцветами солей вытянуты вдоль обеих сторон вала-диапира, граничащих с внешним и внутренним болотом.

В табл. 1 представлены статистические показатели морфометрических параметров микроповышений и микродолин между ними на внешней и внутренней краевых дугах вала-диапира. Высота микроповышений (кочек) вдоль обеих краевых дуг варьирует от 19—22 до 45—50 см с медианами 32 и 36 см. Диапазон изменения ширины кочек приблизительно такой же: от 16—26 до 60—73 см с медианами 27 см на внешней и 37 см на внутренней дугах. Длина отдельной кочки варьирует значительно больше: от 18—35 до 103—120 см с медианами 51 и 64 см.

Микроповышения вытянуты вдоль линии границы вала-диапира с болотом. По своей форме чаще всего они похожи на тумбовидные надолбы с очень крутыми боковыми стенками и слегка закругленной выпуклой верхней стороной, хотя встречаются варианты конической формы с выпуклыми наружу сторонами конуса и сглаженной вершиной. Медиана отношения ширины к высоте микроповышения близка к единице, составляя 0.91 для внешней и 1.06 для внутренней дуг. Минимальные значения указанного отношения 0.5 и 0.67 означают, что встречаются микроповышения, похожие на низкие столбики, высота которых в 1.5–2 раза больше ширины. Некоторые микроповышения, наоборот, являются уплощенными. У них высота в 1.5-2 раза меньше ширины. В горизонтальном сечении форма микроповышения изменяется от округлой с почти равными шириной и длиной, до овальной с медианой отношения длинной оси к короткой около 1.5 и его максимумом чуть больше 3.

Как отмечалось выше, длинной стороной микроповышения ориентированы вдоль границы вала-диапира и болота, образуя несколько рядов цепочек. Между цепочками микроповышений образовались микродолины, похожие на трещины разрыва. Ширина их днища варьирует от 7–13 до 60-67 см с медианами 33 см на внешней и 28 см на внутренней дугах вала-диапира. В результате длина волны поперек линии микроповышений, то есть расстояние между макушками микроповышений в соседних линиях-цепочках, составляет 87–88 cм (медианы), изменяясь от 36–56 до 120—140 см. Расстояние между боковыми стенками соседних микроповышений вдоль их цепочки обычно не превышает 30-40 см, при этом длина волны вдоль цепочки микроповышений варьирует приблизительно в тех же пределах, как и поперек цепочек.

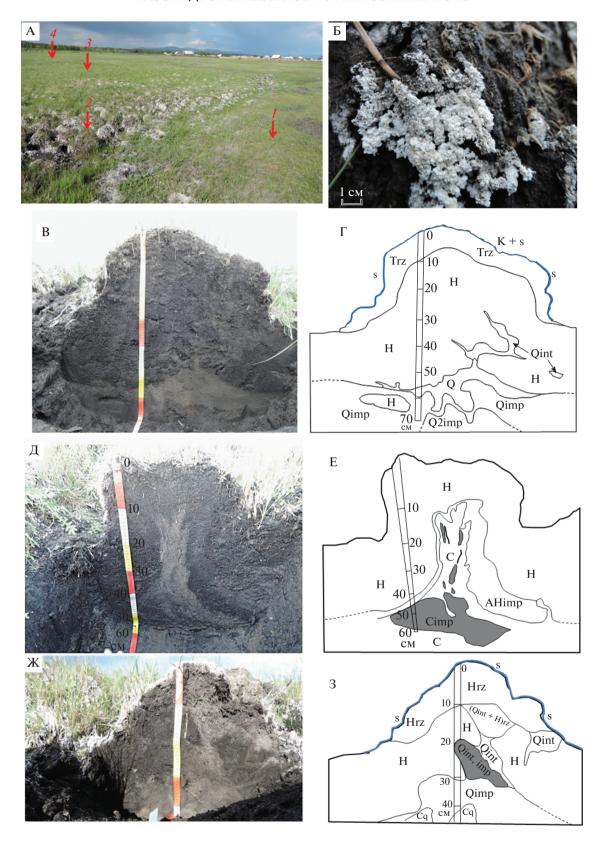
Внутреннее строение рассматриваемых микроповышений заметно отличается от строения растительных кочек на болоте, имея с последними отчетливую генетическую связь. Во-первых, микроповышения, окаймляющие вал-диапир цепочками, представлены преимущественно органогенной массой торфяного и перегнойного горизонтов,

Таблица 1. Статистические показатели морфометрических параметров микроповышений (МПВ) и микро-долин (МД)

Положение	Морфометрический	Значения статистических показателей*							
положение	показатель	n	min	Q1	med	Q3	max	M	S
Внешняя дуга	Высота МПВ, см	31	19	27	32	36	45	31.4	6.0
диапира	Ширина МПВ, см	31	16	22	27	34	73	30.6	13.4
	Длина МПВ, см	31	18	39	51	62	103	52.2	19.5
	Ширина днища МД, см	31	7	19	33	39	60	30.2	13.9
	Длина волны поперек линии МПВ, см	31	36	62	87	92	122	78.5	22.1
	Длина волны вдоль линии МПВ, см	31	41	62	70	100	176	85.0	38.9
	Ширина/высота МПВ	31	0.50	0.75	0.91	1.11	2.03	0.98	0.38
	Длина/ширина МПВ	31	1.06	1.24	1.58	2.29	3.33	1.83	0.71
Внутренняя дуга	Высота МПВ, см	22	22	31	36	40	50	36.2	7.4
диапира	Ширина МПВ, см	22	26	34	37	45	60	39.7	8.5
-	Длина МПВ, см	22	35	46	64	85	120	69.0	25.4
	Ширина днища МД, см	22	13	24	28	36	67	31.7	14.6
	Длина волны поперек линии МПВ, см	22	56	62	88	103	140	90.5	28.8
	Длина волны вдоль линии МПВ, см	22	46	76	87	99	150	88.4	22.8
	Ширина/высота МПВ	22	0.67	0.94	1.06	1.39	2.08	1.15	0.36
	Длина/ширина МПВ	22	1.02	1.29	1.48	2.34	3.15	1.78	0.70
Склон с РФ-2-16	Высота МПВ, см	30	12	17	20	23	32	20.8	5.0
	Ширина МПВ, см	30	33	50	60	72	113	64.3	18.8
	Длина МПВ, см	30	50	92	123	145	240	118.5	44.4
	Ширина днища МД, см	30	16	24	37	56	73	40.2	18.5
	Длина волны поперек линии МПВ, см	30	73	87	104	133	155	108.8	24.1
	Длина волны вдоль линии МПВ, см	28	75	108	137	173	230	139.0	42.3
	Ширина/высота МПВ	30	1.73	2.55	3.12	3.70	6.28	3.17	0.89
	Длина/ширина МПВ	30	1.00	1.53	1.75	2.10	3.64	1.86	0.58
Вогнутая поверх-	Высота МПВ, см	57	7	10	13	16	26	13.8	4.2
ность	Ширина МПВ, см	57	32	53	63	82	188	70.1	27.7
	Длина МПВ, см	57	52	87	112	154	250	119.5	47.0
	Ширина днища МД, см	57	15	29	40	64	134	49.8	29.8
	Длина волны поперек линии МПВ, см	56	61	105	128	152	278	134.8	48.1
	линии М11Б, см Длина волны вдоль линии МПВ, см	33	65	107	142	185	320	151.3	60.1
	Ширина/высота МПВ	57	2.13	3.50	4.92	7.07	12.8	5.55	2.71
	Длина/ширина МПВ	57	1.02	1.29	1.60	2.08	3.79	1.79	0.69
	r ,, r							l	

^{*} min — минимальное значение; Q1 — нижний квартиль (25%); med — медиана (50%); Q3 — верхний квартиль (75%); max — максимальное значение; M — среднее арифметическое; s — среднеквадратическое отклонение.

Рис. 3. Микроповышения по периферии дугообразного вала-диапира при переходе к болоту с растительными кочками. А — общий вид пояса с микроповышениями вдоль вала-диапира (восточная часть внешней дуги): I — вал-диапир; 2 — препарированное микроповышение (см. В, Г); 3 — часть болота с органогенными кочками; 4 — более низкий вал-диапир среди болота; 5 — микроповышения: 5 — солевые выцветы на боковых стенках микроповышения; 6 — поперечный вертикальный срез через микроповышение 6 — солевые выцветы на боковых стенках микроповышения; 6 — поперечный вертикальный срез через микроповышение 6 — то же (схема); 6 — поперечный вертикальный срез через микроповышение 6 — го же (схема); 6 — то же (схема).



приподнятой относительно уровня кочек в болоте на 10—20 см и даже более непосредственно при переходе к склону вала-диапира. За счет этого масса горизонта Т и Н содержит меньше воды, становится более плотной. Даже в период затопления микродолин микроповышения сохраняют механическую прочность настолько, что на них можно наступать ногой. Пружинящий эффект, характерный для растительных кочек на болоте, у этих микроповышений проявляется очень слабо, а в большинстве случаев отсутствует. При надавливании они пластически деформируются.

Во-вторых, в микродолинах между цепочками микроповышений вдоль вала-диапира возле поверхности расположен перегнойный горизонт Н сравнительно небольшой мощности от 10 до 20 см, а под ним песчано-супесчаный глеевый горизонт Gimp с зонами импрегнирования органическими веществами или квазиглеевый горизонт Qimp.

В-третьих, в центральной части микроповышения наблюдаются структуры внедрения снизу вверх минерального материала в тело приподнятых горизонтов Н и Т. Конкретная форма вертикального сечения таких структур различается в зависимости от условий и мощности внедрения. При относительно слабом внедрении в основании органогенной тумбы микроповышения песчаный материал образует конус с тупым углом при вершине, а от последней вверх поднимается сужающийся и замысловато извивающийся язык песчано-пылеватого материала (рис. 3В, 3Г).

При более сильном внедрении вертикальный язык может иметь форму струи фонтана с расширяющейся в стороны верхней частью (рис. 3Д, 3Е). При еще более сильном внедрении поднимающийся песчано-пылеватый материал может образовать сверху заполнение, напоминающее воронку, которая еще не достигла дневной поверхности, остановившись под органогенным материалом торфяного и/или перегнойного горизонтов (рис. 3Ж, 33). В результате органогенная масса горизонта Н в средней части тумбы-микроповышения раздвигается в стороны.

Почвы в переходной полосе обеих дуг вдоль вала-диапира являются торфянисто-перегнойно-квазиглеевыми поверхностно-засоленными газогидротермально слаботурбированными на аллювиальных песчаных отложениях (Drainic Sapric Histosols (Sulfidic)). В минеральных горизонтах абсолютно доминируют песчаные фракции (75—80%), в составе которых от половины до двух третей составляет фракция мелкого песка (0.05—0.25 мм). Содержание крупной пыли (0.01—0.05 мм) варырует от 10 до 15%, содержание ила (<0.001 мм) — 2—6%. Почвы имеют кислую реакцию среды (рН_{Н2О} 4.4—4.9) по всему профилю выше уровня грунтовой воды за счет постепенного окисления пирита после выдавливания материала вверх.

В теле микроповышения увеличиваются активность ионов натрия до 9–20 ммоль/л в жидкой фазе при влажности 30 мас. % по сравнению с 5–6 ммоль/л в термальных водах. Одновременно увеличивается активность ионов кальция в связи со сменой щелочной реакции среды на кислую.

Микроповышения с сохранившимися фрагментами органогенных горизонтов

Переход болотного массива к аллювиальной равнине имеет несколько вариантов строения. Наиболее простой из них представляет собой плавный очень пологий выход минеральных горизонтов на берег с чрезвычайно слабовыраженным микрорельефом, который со стороны болота сопровождается уменьшением размеров растительных кочек и общим уменьшением мощности органогенных горизонтов (Н и Т) вплоть до их полного выклинивания. Самая низкая часть берега аллювиальной равнины периодически затопляется после дождливого периода. Описание разреза РФ-1-5 аллювиальной светлогумусовой импрегнированной газогидротермально турбированной глеевой поверхностно-солончаковой среднезасоленной песчаной почвы (Eutric Sodic Glevic Pantofluvic Fluvisol (Alcalic, Epiloamic, Endoarenic, Humic, Sulfidic)) c почти ровной дневной поверхностью представлено ранее [38].

Высокий подъем валов-диапиров в краевой части болота рассмотрен выше.

Помимо этих двух контрастных вариантов значительная часть области перехода представлена полосами низких кочкарных поверхностей с оплывшими минеральными микроповышениями, на макушке или на боку которых сохранились фрагменты органогенных горизонтов Т или Н (рис. S2). В более узких полосах (до 3—4 м шириной) микроповышения обычно вытянуты вдоль болота и между ними образуются сравнительно длинные микродолины (рис. S2). В более широких полосах (от 3—4 до 10—15 м) выпуклые элементы микрорельефа чередуются с вогнутыми элементами приблизительно тех же горизонтальных размеров в нерегулярном порядке близком к шахматному (рис. S2).

Микроповышения очень пологого склона от слабовыраженного вала-диапира на аллювиальной равнине в сторону замкнутого участка болотного массива

Склон имеет четко выраженный микрорельеф в виде цепочек слабовытянутых микроповышений, разделенных очень длинными микродолинами, ориентированными поперек общего уклона поверхности (рис. 4A).

Растительность представлена галофитным лугом с доминированием осоки ползучей (*Carex*

reptabunda). Особенностью фитоценоза является практически равное сочетание галофитов степной и луговой флоры. По отношению к фактору увлажнения большинство из них мезофиты. Наличие разнообразных биоморф обеспечивает стабильное, при возможных изменениях факторов среды, функционирование экосистемы.

Микроповышения имеют более плавные очертания по сравнению с тумбовидными аналогами непосредственно в зоне контакта болота с другим валом-диапиром. Верхняя их часть слабовыпуклая с более сильновыраженной кривизной верхней границы вертикального сечения в поперечном направлении по сравнению с продольным. Верхушка плавно переходит в покатые неровные боковые поверхности. Относительная высота микроповышений этой группы (склон с РФ-2-16) изменяется в пределах от 12 до 32 см с медианой 20 см, ширина — от 33 до 113 см с медианой 60 см, длина — от 50 до 240 см с медианой 123 см. В 50%случаев длина больше ширины в 1.5–2.1 раза, но встречаются как очень слабо вытянутые варианты, вплоть до округлых в плане, так и очень сильно вытянутые с отношением длина/ширина равным до 3.6. При этом микроповышения выглядят невысокими: ширина больше высоты в 1.7-6.3 раза с медианой в 3.1 раза.

Днища микродолин образуют сплошную сеть, в ячеях которой расположены микроповышения, как острова, вытянутые серией параллельных цепочек. Ширина днищ варьирует от 16 до 73 см с медианой 37 см. За счет вытянутости микроповышений длина волны микрорельефа заметно различается в продольном и поперечном направлениях относительно направления уклона местности. Минимальные значения (73 и 75 см) практически совпадают, но все остальные непараметрические статистические показатели имеют более высокие значения длины волны вдоль линии микроповышений (направление поперек склона) по сравнению с длиной волны между соседними цепочками (направление вдоль общего склона).

Внутреннее строение микроповышений этой группы рассмотрим на примере разреза РФ-2-16. На рис. 4А стрелкой указано положение исследованного микроповышения на общем фоне микрорельефа участка. Микроповышение покрыто редкой травянистой растительностью с доминированием осоки ползучей. На макушке отчетливо выделяется овальное оголенное пятно (рис. 4Б, 4В) с длинной осью 33 см и короткой осью 18 см. Поверхность почвы на микроповышении, нижние части многих растений и 10—15% оголенного пятна покрыты белыми выцветами легкорастворимых солей (сульфат натрия).

Вертикальное сечение почвы микроповышения в поперечном направлении (рис. 4Д, 4Е) и двух микродолин, прилегающих к нему с двух

сторон (рис. 4Ж, 43) демонстрирует сильнотурбированное строение почвенного профиля, представленное преимущественно минеральным материалом. Сплошной гумусово-перегнойный горизонт АНітр с признаками импрегнирования органическими веществами из поднимающихся газогидротермальных флюидов в профиле почв отсутствует. Он разорван на куски (фрагменты) разного размера и формы выдавленным снизу песчаным, супесчаным и отчасти пылевато-суглинистым материалом глеевого (G) и квазиглеевого (Q) горизонтов с разнообразным проявлением признаков импрегнирования (ітр и ІМР) в виде черных пленок на поверхности минеральных зерен, а также окисленно-глеевого признака, представленного пленками гидроксидов и оксидов железа разного цвета (от бурого до красного).

Рисунок расположения морфонов вертикального сечения микроповышения очень сложный (рис. 4Е). На представленной схеме выделен 21 морфон. Вся центральная часть профиля под микроповышением образована несколькими причудливо изгибающимися, иногда разветвляющимися восходящими языками, в каждом из которых имеются буро-черные морфоны ІМР сильного импрегнирования органическим веществом. В трех языках основная вмещающая масса состоит из сизого (Gley1 5/5G, 6/5G; Gley2 5/5BG, 6/5BG) материала глеевого горизонта. Из-за близкого расположения водоносного песчаного слоя (глубина зеркала грунтовой воды 75-80 см) основание этих языков вскрыть не удалось - стенки разреза быстро оплывали.

Один из восходящих языков пылевато-песчаного материала непосредственно выходит на поверхность микроповышения, образуя оголенное от растительности овальное пятно серо-стального цвета с пухлыми небольшими скоплениями выцветов солей. Поверхность пятна влажная, в отличие от сухой остальной части поверхности микроповышения, и очень слабо шероховатая за счет образования тонкой корочки. Такое состояние свидетельствует о текущем (в момент препарирования микроповышения — июнь 2018 г., длительный период без дождей) поступлении растворов снизу от грунтовой воды непосредственно на макушку микроповышения по особому каналу - одному из восходящих языков минерального материала. Так как все морфоны внутри тела микроповышения были влажными, а большая часть поверхности микроповышения, исключая оголенное пятно, сухая, следовательно пятно остается влажным из-за отсутствия потребления воды корнями растений.

Два восходящий языка, вмещающих импрегнированные морфоны квазиглеевого (Q2imp) или глеевого (G2imp) горизонтов, поднялись почти вертикально вверх, достигая поверхности микроповышения по краям выпуклой макушки приблизительно в местах перегиба к более покатым микросклонам (рис. 4E, 27 и 105 см по горизонтальной линейке). В их теле много вертикально ориентированных с боковыми тупиковыми ответвлениями сильноимпрегнированных морфонов IMP.

В центральной части микроповышения вскрыт сложно устроенный восходящий язык с сильнозагнутым в сторону, а затем даже немного вниз концом. Он похож на изогнутую шею с головой ящера. В его нижней части находится ядро из супесчаного морфона глеевого горизонта Glimp со слабым импрегнированием. Оно окаймляется с боков и сверху буро-черной узкой полосой с диффузными краями супесчаного сильноимпрегнированного материала ІМР. Полоса сильно выгнута вверх за счет давления снизу. С обеих боковых сторон к этой полосе IMP примыкают морфоны глеевого горизонта G1 и G1imp. Верхняя изогнутая часть языка представлена морфоном квазиглеевого импрегнированного горизонт Q2imp, ох с обильными бурыми пленками гидроксидов железа (окисленно-глеевый признак).

Центральная часть микроповышения между четырьмя восходящими языками заполнена песчаными обширными морфонами квазиглеевых горизонтов Q1 и Q3 (рис. 4E, морфоны 9 и 14). Они имеют относительно однородную зеленовато-оливковую окраску во влажном состоянии (2.5Ү 6/6, 5/6), которая при высыхании стенки сильно светлеет до 2.5YR 8/1-2.5Y 8/3. В Q1 и Q3 не видно признаков импрегнирования и крайне редко встречаются бурые точки или мелкие участки с железистыми пленками на зернах, но хорошо заметны мелкие золотистые пластинки пирита. Морфон Q3 выделен особо по способности очень быстро высыхать при вскрытии разреза. Он представлен средне-крупнозернистым песком, доля фракции 0.25-1.0 мм в Q3 составляет 54-56% и фракции 0.05-0.25 мм -30-32% по сравнению обратным соотношением в Q1 - 15-23 и 54-64%, соответственно. Открытая стенка в Q3 высыхает в течение 10-15 мин, становясь очень светлой, и даже немного самопроизвольно осыпается.

Большая часть поверхностного слоя от 0 до 5—10 см микроповышения представлена пылеватосупесчаными морфонами G2 и G2s серо-стальной окраски (Gley1 7/5G сух., 5/5G вл.), содержащими золотистые пластинки пирита (рис. 4E, морфоны 4 и 6). В морфоне G2s при высыхании на поверхности открытой стенки разреза образовался белесый налет выцветов легкорастворимых солей. При этом на дневной поверхности над обоими морфонами G2 и G2s наблюдалась почти сплошная пухлая солевая корочка.

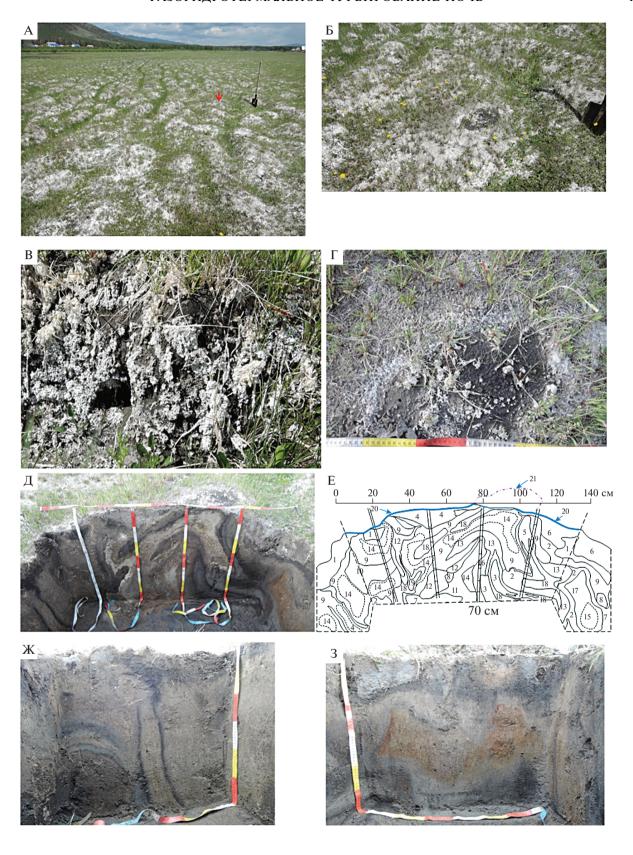
Обратим внимание, что фрагменты горизонта АНітр в виде морфонов залегают под морфонами G2 и G2s, а не наоборот, как обычно бывает в ненарушенном состоянии почвенного профиля. Это является ярким свидетельством турбационного перемещения материала профиля бывшей гумусовоперегнойно-глеевой почвы с разрывом на фрагменты исходного горизонтального сплошного залегания слоев, локальным вспучиванием поверхности, приводящим к образованию микроповышения, внутри тела которого фрагменты горизонтов были уложены в новый порядок в соответствии с величиной действовавших на них сил, их направлением, последовательностью и длительностью их действия во времени.

На боковых стенках разреза были вскрыты профили почв под двумя продольными микродолинами. Они оказались разными, отражая некоторое разнообразие их строения и, очевидно, локальной дифференциации процессов турбации в разных позициях микрорельефа.

На левой стенке разреза, характеризующей профиль почвы под микродолиной ниже по склону, сверху сохранился горизонт АНітр мощность 10—12 см (рис. 4Е, 4Ж). Под ним залегали квазиглеевые песчаные горизонты Q1 и Q3 с зернами разной крупности, аналогично рассмотренным выше морфонам Q1 и Q3 в теле микроповышения. Горизонт Q1 разделен двумя извилистыми узкими почти вертикальными языками буро-черного цвета. Это сильноимпрегнированный органическим веществом супесчаный материал IMP.

На правой стенке, характеризующей профиль почвы под микродолиной выше по склону, картина иная (рис. 4Е, 43). С поверхности здесь залегал глеевый горизонт G2s мощностью до 15 см, прорванный в середине морфоном Q1. Под морфоном G2s располагался фрагмент горизонта АНітр причудливой формы, обязанной сочетанию двух процессов: неравномерной деформации и разрыву сплошного залегания горизонта материалом, выдавливаемым снизу, и засыпке сверху

Рис. 4. Пологий склон с регулярными поперечными цепочками микроповышений. А — общий вид склона в поперечном направлении, уклон справа налево, стрелка указывает исследуемое микроповышение; Б — внешний вид микроповышения до вскрытия; В — выцветы солей (сульфат натрия) на поверхности микроповышения и на траве; Γ — оголенное пятно с солями на макушке микроповышения (увеличенный масштаб); Д — вертикальное поперечное сечение через микроповышение, фото; Е — то же, схема строения, пронумерованные индексы морфонов: I — AHimp; 2 — G1; 3 — G1imp; 4 — G2; 5 — G2imp; 6 — G2s; 7 — ox + G; 8 — ox; 9 — Q1; 10 — Q1imp; 11 — Q1imp, ox; 12 — Q2imp; 13 — Q2imp, ox; 14 — Q3; 15 — Q3ox; 16 — Q0x1; 17 — Q0x2; 18 — IMP + IB0 — IMP1 — IB1 — IB2 — IB3 — IB4 — IB5 — IB6 — IB8 — IB8 — IB9 —



выдавленным материалом. В средней части наблюдался обширный морфон с обильными красными пленками оксидов железа (признак ох – окисленно-глеевый), а вокруг него окаймление со всех сторон, включая сверху, сизого полосатого (более темные полосы Glev2 3/10BG, 3/5BG, более светлые полосы Glev2 5/10BG, 5/5BG) морфона G1 (рис. 4E, 43). Похожие, но существенно меньших размеров, окисленно-глеевые морфоны наблюдались и под микроповышением на глубине около 70 см. Это означает, что процесс локального вспучивания почвы с образованием микроповышений и микродолин сопровождался поступлением газов, содержащих кислород, который способствовал локальному окислению восстановленных соединений железа, проходя через глеевый горизонт.

Все морфоны, расположенные выше уровня грунтовых вод, имеют кислую реакцию среды (р $H_{\rm H_2O}$ от 4.7 до 6.1, преимущественно около 5.2), содержание $C_{\rm opr}$ варьирует от 0.2 до 0.7%. Почва имеет поверхностное засоление в солевой корке. На это указывает резкое (в 20 раз) увеличение активности ионов натрия и хлоридов в корке по сравнению с расположенными ниже морфонами.

Таким образом, рассмотренные микроповышения (разрез РФ-2-16) образовались в краевой части болота перед очень пологим склоном аллювиальной равнины из гумусово-перегнойно-глеевой почвы (Fluvic Oxygleyic Histic Gleysol (Arenic, Drainic, Epiprotosalic, Sulfidic)), профиль которой был разорван и турбирован газогидротермальными восходящими флюидами. Поэтому непосредственно на микроповышении почву можно назвать квазиглееземом окисленно-глеевым поверхностно-засоленным импрегнированным газогидротермально сильнотурбированным песчаным (Fluvic Oxyglevic Glevsol (Arenic, Drainic, Epiprotosalic, Sulfidic)). Неравномерность вспучивания поверхности, очевидно, связана с несколькими причинами. Во-первых, аллювиальные слоистые песчано-пылевато-суглинистые отложения, перекрывшие сверху зону пересечения двух крупных тектонических разломов и послужившие почвообразующим материалом, создали определенные затруднения фронтальному снизу вверх проникновению газов и термальных вод, что а priori предполагало неравномерный подъем потоков газов и воды. Во-вторых, слоистая система отложений характеризуется отличающейся способностью поглощать тем или иным способом вещества из газогидротермального потока. В качестве результата в рассматриваемых объектах в более тонких по гранулометрическому составу прослойках происходит импрегнирование органическими веществами, которое заметно увеличивает связность минерального материала и, очевидно, снижает проницаемость для воды и газов. Конфигурация сильноимпрегнированных

морфонов ІМР служит маркером зон формирования повышенного давления поднимающихся снизу флюидов и дальнейших путей перемещения материала при прорыве сдерживавшей кровли. В-третьих, система цепочек микроповышений сформировалась на очень пологом склоне от низкого широкого вала-диапира. Это означает, что основная область повышенного давления снизу возникла под валом-диапиром, подняв его целиком, по-видимому, с минимальными прорывами. Такой подъем широкой полосы слоистых отложений привел к формированию большого числа зон повышенных напряжений вдоль этой поднявшейся полосы. Последние, в свою очередь, привели к образованию нарушений сплошного залегания слоев в виде трещин, вытянутых вдоль вала-диапира с каждой его стороны, что соответствует направлению поперек образующегося склона. Закономерный результат нарушения сплошного залегания — образование цепочек фестончатых структур прорыва газами и водами сдерживающей кровли импрегнированных прослоек с перемещением пульпы из твердого материала, воды и газов вверх.

Микроповышения на наклонной слабовогнутой поверхности аллювиальной равнины

Юго-восточнее болотного массива, в который разгружаются активные Кучигерские газогидротермальные источники, расположена аллювиальная равнина. Она имеет очень пологий уклон в сторону болотного массива. В ее пределах встречаются несколько обширных слабовогнутых поверхностей с системой вытянутых микроповышений в ячеях сплошной сетки узких микроповышений в ячеях сплошной сетки узких микродолин (рис. 5A). Слабовогнутые поверхности имеют приблизительно округлую или овальную форму с длинной осью, направленной по уклону в сторону болота. Малая ось овала изменяется от 23 до 62 м, большая ось — от 35—60 до 110—140 м.

Растительность представлена ползунковым (Halerpestes salsuginosa) галофитным лугом. Проективное покрытие растениями – 20%. Доминанты: Halerpestes salsuginosa, Potentilla anserina. Обилен Taraxacum dealbatum. Малочисленные виды: Chenopodium glaucum, Juncus compressus, Puccinellia hauptiana, Plantago salsa. В эколого-ценотической структуре преимущественно луговые растения. В биоморфологическом спектре доминирует группа короткокорневищных трав, для которых характерны жизненные стратегии с различными способами самоподдержания и адаптации к экстремальным условиям среды. По отношению к солевому фактору значительное участие играют галофитные и галотолерантные таксоны, а по отношению к влажности – мезофиты.

Микроповышения внутри таких поверхностей организованы двумя способами: концентриче-

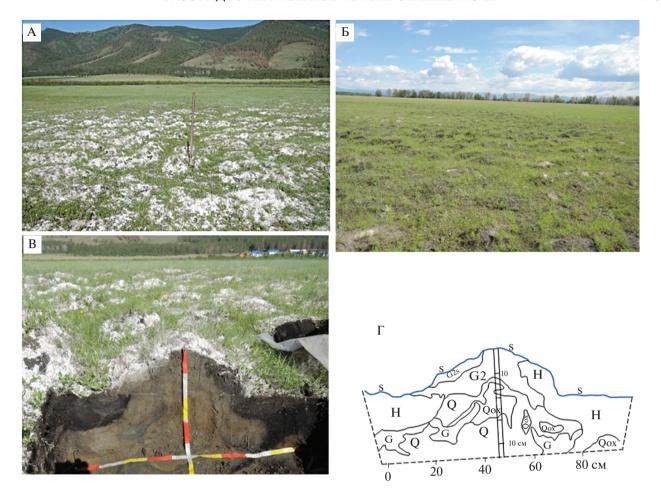


Рис. 5. Микроповышения на слабовогнутой поверхности на аллювиальной равнине. A — общий вид в сторону болота (перед дождем) с положением микроповышения до его вскрытия (рядом с лопатой); B — общий вид от болота на аллювиальную равнину (после сильного дождя); B — фотография поперечного вертикального сечения почв через катену микроповышения между двух микродолин; Γ — схема строения почвенного профиля.

скими прерывистыми кольцами вдоль внешней границы вогнутой области или слабоизвилистыми приблизительно параллельными цепочками, ориентированными поперек общего слабого уклона поверхности. Местами наблюдается переходная зона от одного способа организации к другому в пределах одной слабовогнутой поверхности.

Микроповышения обычно имеют сглаженные формы как в вертикальном, так и в горизонтальном сечениях. Высота варьирует от 7 до 26 см с медианой 13 см, длина — от 52 до 250 см (медиана 112 см), ширина — от 32 до 188 см с медианой 63 см. Микроповышения выглядят невысокими, поскольку ширина больше высоты в 2.1—12.8 раз. Длина волны поперек цепочек микроповышений составляет по медиане 128 см с разбросом от 61 до 278 см.

Строение поперечного вертикального сечения микроповышения с прилегающими микродолинами рассмотрим на примере разр. РФ-2-18 (рис. 5Б, 5В). Под микродолинами сохранилась естественная последовательность горизонтов пе-

регнойно-глеевой песчаной почвы (Fluvic Oxygleyic Histic Gleysol (Arenic, Epiprotosalic, Sodic, Sulfidic)), состоящей из черного перегнойного горизонта Н и сизого глеевого горизонта G. Местами на глубине 35—50 см обнаруживается оливковый квазиглеевый горизонт Q с бурыми зонами пленок оксидов и гидроксидов железа (окисленно-глеевый признак ох) или без них. Глубже 50 см песчаная слоистая толща аллювиальных отложений (средний и крупный песок 20—26%, мелкий песок 48—55%, крупная пыль 15—19%, ил 2—3%) имеет сизый цвет (горизонт G) и включает мелкие пластинки пирита. Водонасыщенные горизонты начинаются с глубины 75 см.

На микроповышении сплошной горизонт Н отсутствует. Небольшой фрагмент его, как продолжение горизонта Н в микропонижении, сохранился в нижней части одного покатого бока микроповышения. Основная масса микроповышения представлена выдавленным вверх глеевым горизонтом Q и квазиглеевым горизонтом Q и

Qox, содержащими зерна пирита. Поверхность почвы микроповышения и микродолины покрыта белой тонкой пухлой солевой корочкой (сульфат натрия). Почва идентифицирована как глеезем окисленно-глеевый поверхностно-засоленный газогидротермально сильнотурбированный песчаный на аллювиальных отложениях (Fluvic Oxygleyic Gleysol (Arenic, Epiprotosalic, Sodic, Sulfidic)).

Нижняя часть глеевого горизонта, расположенная ниже уровня грунтовый воды, сохраняет сильнощелочную реакцию среды (pH > 8.5), тогда как дренированная верхняя часть профиля, в которой визуально наблюдаются зерна пирита, становится нейтральной или кислой (pH понижается до 5.4-6.8). Содержание $C_{\rm opr}$ колеблется в пределах 0.34-0.84%. Легкорастворимые соли аккумулируются возле поверхности в корке. Активность ионов натрия в пасте с влажностью 30% в корке возрастает в 30-50 раз по сравнению с нижележащей песчаной массой турбированных глеевого и квазиглеевого горизонтов.

На основе наблюдаемого строения почвы можно заключить, что микрорельеф вогнутой поверхности возник в результате многочисленных прорывов снизу перегнойного горизонта с выпучиванием в виде микробугорков песчаного материала глеевого горизонта с последующим частичным окислением восстановленных форм соединений железа в выдавленной части. Близкое расположение уровня грунтовой воды обеспечивает капиллярное подтягивание растворов к поверхности с образованием солевой корочки.

Сравнение статистических кумулятивных распределений морфометрических параметров микроповышений четырех участков

На четырех участках, для которых получены эмпирические статистические показатели морфометрических характеристик микрорельефа, распределение отношения длина/ширина микроповышения оказалось практически одинаковым (рис. 6А). Этот факт отражает сходство формы по безразмерной характеристике горизонтального сечения микроповышений отличающегося строения. Учитывая сходное происхождение микроповышений, связанное с давлением газогидротермальных флюидов снизу, приводящее к локальному выдавливанию минерального материала вверх, можно допустить сравнительно узкий диапазон возникающего давления снизу и безразмерного соотношения параметров горизонтального сечения трещиновидных каналов пальчатого вида, вдоль которых развивается это давление.

Очень близкие кумулятивные распределения получены для ширины днища микродолин между цепочками микроповышений (рис. 6Б). Лишь в области перцентилей >50% наблюдается явное

расхождение двух групп кривых: (1) обе дуги возле диапира, граничащего с обеих сторон с болотом, и (2) два участка на аллювиальной равнине. Для участков, удаленных от болота, наблюдается смещение кумулятивных распределений ширины днища микродолин в сторону более высоких значений. Это означает, что в 50% случаев ближайшие расстояния между пальчатыми структурами поднимающихся газогидротермальных флюидов сравнительно небольшие (около 35—70 см) на всех четырех участках, но, по мере удаления от болота на аллювиальную равнину, увеличивается разброс значений этого показателя.

На этом общем фоне распределения длины волны микрорельефа как поперек, так и вдоль цепочки микроповышений образуют две ясные группы: (1) участки вдоль болота и (2) участки на аллювиальной равнине (рис. 6В, 6Г). На участках аллювиальной равнины (возле разреза РФ-2-16 и на вогнутой поверхности) кумулятивные распределения длины волны микрорельефа смещены на 25–35 см в сторону более высоких значений по сравнению с участками на границе болота с диапиром. Иными словами, по краям диапира возникают более частые фестончатые структуры по сравнению с участками, удаляющимися от болота на аллювиальную равнину, по-видимому, за счет удаления в сторону от осевой части тектонического разлома.

Особенности микрорельефа каждого участка отражают кумулятивные распределения длины, ширины и высоты микроповышений (рис. 6Д—63). Наименьшие значения длины и ширины микроповышений характерны для участка внешней дуги диапира. Кумулятивные распределения тех же показателей для участка внутренней дуги диапира смещены на 10—15 см в сторону больших значений, отражая факт увеличения горизонтальных размеров микроповышений на внутренней дуге по сравнению с внешней.

Кумулятивные распределения длины и ширины микроповышений обоих участков на аллювиальной равнине почти накладываются друг на друга при сильном смещении в сторону больших значений относительно участков на переходе болота к диапиру. Величина смещения увеличивается от 10—15 см в области перцентилей <10% до 50—70 см в области перцентилей >80%. Следовательно, горизонтальные размеры микроповышений на аллювиальной равнине оказались больше в 1.5—2 раза по сравнению с таковыми возле болота.

Наиболее ярко участки различаются по кумулятивным распределениям высоты микроповышений, но закономерность обратная. Наиболее высокими были микроповышения внутренней дуги диапира (рис. 6Ж). Распределение высоты на участке внешней дуги диапира смещено на 4—5 см в сторону меньших значений. Еще на 8—10 см в ту

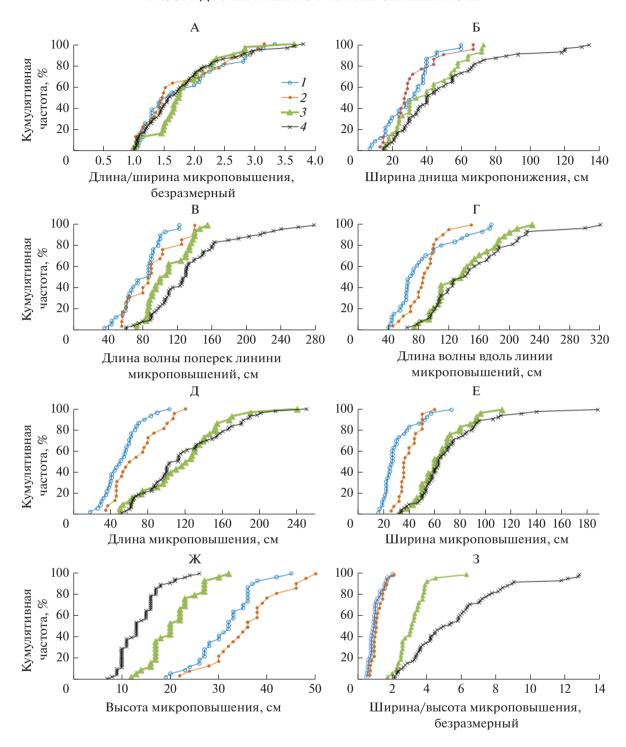


Рис. 6. Эмпирические статистические кумулятивные распределения отношения длина/ширина микроповышения (A), ширины днища микродолин (Б), длины волны поперек (В) и вдоль цепочки микроповышений (Г), длины (Д), ширины (Е), высоты (Ж) микроповышения и отношения ширина/высота микроповышения (3). Участки: I — внешняя дуга диапира; 2 — внутренняя дуга диапира; 3 — склон с разр. РФ-2-16; 4 — вогнутая поверхность на аллювиальной равнине.

же сторону смещено распределение высоты участка с разр. $P\Phi$ -2-16. Наименьшие значения наблюдались на вогнутой поверхности, дальше всех расположенной относительно края болота на аллювиальной равнине.

Интересную информацию несет безразмерное отношение ширина/высота микроповышения. Оно характеризует косвенно крутизну склонов и в целом эмоциональное восприятие микроповышения. Кумулятивные распределения этого отно-

микроповышений
а почв
свойств
-химические свойств
физико-;
Некоторые
Таблица 2.

		, ,								
Гори	Горизонт,	O'H Ha	ШШП	$C_{ m opr}$	$ m N_{o6m}$	Сухой остаток		иона в пасте вла	Активность иона в пасте влажностью 30 мас. %, ммоль/л	г. %, ммоль/л
глуби	глубина, см				%		H	CI_	Na^{+}	Ca ²⁺
	-	РФ-2-11, тор	фянисто-перег на алл	гнойно-квазигл ювиальных пес	теевая поверхн чаных отложен	РФ-2-11, торфянисто-перегнойно-квазиглеевая поверхностно-засоленная газогидротермально слаботурбированная на аллювиальных песчаных отложениях (Drainic Sapric Histosols (Sulfidic))	ия газогидротер	мально слабот ulfidic))	урбированная	
Корка, 0-0.5	0-0.5	4.9	40.4	1		, — , —	, 	.	1	I
TH, 0.5-5	-5	4.8	33.8	7.75	0.89	3.79	0.12	1.29	19.50	2.29
H, 5-20	(4.9	23.6	5.90	0.47	0.52	0.12	0.98	9.77	0.83
H, 20-35	35	4.7	23.7	3.69	0.31	0.68	80.0	0.85	9.55	1.00
H, 35–50	50	4.8	24.6	5.32	0.42	0.38	60.0	0.89	9.33	1.12
Q, 50(55)–60	2)—60	4.4	1.2	0.25	90.0	0.17	80.0	0.43	11.75	0.54
Qimp, 70–78	82-0-78	4.5	2.9	0.45	0.05	0.48	0.10	0.65	12.59	0.85
	_	РФ-2-16, к сил	6, квазиглеезем окислев сильнотурбированный	, кисленно-глеег нный песчаный	зый поверхност г (Fluvic Oxygle	РФ-2-16, квазиглеезем окисленно-глеевый поверхностно-засоленный импрегнированный газогидрогермально сильнотурбированный песчаный (Fluvic Oxygleyic Gleysol (Arenic, Drainic, Epiprotosalic, Sulfidic))	импрегнирова ic, Drainic, Epi	нный газогидро protosalic, Sulfi	отермально dic))	
Корка, 0—1	0-1	4.7	2.3		0.08	0.95	0.10	26.30	263.03	0.28
Q1, 1-7		6.1	I	0.18	0.03	0.20	0.79	0.71	11.48	0.01
Q3, 7-13	3	5.9	I	0.19	0.03	0.18	0.42	0.37	14.79	0.07
Q2imp,ox, 13 20	ox, 13–	5.4	1.7	0.29	0.04	0.28	0.23	0.74	11.48	0.07
Q1imp,ox, 20– 40	ox, 20-	5.1	1.6	0.50	0.04	0.42	0.15	0.56	11.75	0.09
Q1imp,ox, 40– 65	ox, 40-	5.2	2.3	0.14	0.02	0.74	0.11	1.51	8.71	0.30
поч	- "	ЭФ-2-18, глеез н	а зем окисленно та аллювиальні	-глеевый повер ых отложениях	, хностно-засол (Fluvic Oxygle)	РФ-2-18, глеезем окисленно-глеевый поверхностно-засоленный газогидротермально сильнотурбированный песчаный на аллювиальных отложениях (Fluvic Oxygleyic Gleysol (Arenic, Epiprotosalic, Sodic, Sulfidic))	термально сил с, Epiprotosalic	ьнотурбирован , Sodic, Sulfidic	ный песчаный ())	
Корка, 0-0.5	0-0.5	8.9	5.6	1	1	1	1.41	102.33	562.34	0.93
G2, 0.5–5	-5	8.9	3.2	0.74	0.08	0.84	1.10	2.88	58.88	0.13
G2, 5–15	15	5.9	2.4	09.0	0.04	0.28	0.62	0.81	16.98	0.22
Qox, 15–25	-25	5.6	2.2	0.50	0.03	0.19	0.40	09.0	14.79	0.40
Q, 25–40	10	5.7	1.5	0.46	0.03	0.32	0.37	1.07	13.49	0.26
G, 45–59	29	6.4	0.1	0.34	0.04	0.354	0.51	1.29	12.30	0.09
G, 59–65	55	8.1	I	0.84	0.04	0.734	0.34	3.80	22.39	0.24
G, 75–85	35	9.1	2.3	0.53	90.0	0.500	69.0	3.80	8.91	0.03
Примеч	ание. ПП	иди вдетоп – Г	прокаливании,	Примечание. ППП — потеря при прокаливании, прочерк — нет данных.	нных.					

шения для обеих дуг возле диапира имеют общий диапазон разброса значений от 0.5 до 2 и почти совпадают друг с другом. Значения отношения ширина/высота около единицы свидетельствует о тумбовидной форме микроповышений с крутыми, часто почти отвесными боковыми сторонами. Цепочки таких микроповышений выглядят как ряд низких толстых столбиков или пней.

Распределения двух участков на аллювиальной равнине сильно смещены в сторону больших значений, образуя своеобразный веер. По мере удаления от болота, отношение ширина/высота микроповышения увеличивается. Это означает, что микроповышения становятся похожими сначала на сильновыпуклую шляпку гриба, которая, по мере удаления от болота, постепенно расплющивается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На северо-востоке Баргузинской котловины условия распространения участков с сильновыраженным микрорельефом и строение почв на этих участках позволяют считать, что в области перехода от болотного массива с активными грифонами термальных вод к аллювиальной равнине формируются фестончатые структуры турбированных почв под воздействием восходящих потоков газогидротермальных флюидов. Эти структуры образуют генетический ряд микроповышений. На краю болота микроповышения состоят из органогенного материала с редкими внедрениями снизу минерального материала. По мере уменьшения мощности органогенных горизонтов при переходе на пологий склон аллювиальной равнины микроповышения возникают на месте прорыва поверхностных горизонтов материалом глеевого горизонта, выдавленного снизу вверх. При этом тумбообразные резко возвышающиеся кочки на краю болота постепенно приобретают более сглаженные низкие слабовыпуклые формы бугорков с широким основанием на вогнутых поверхностях аллювиальной равнины.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-04-00454 А.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Рис. S1. Длинный дугообразный вал-диапир при переходе к болоту с растительными кочками: A — вид с востока на запад приблизительно с 1/3 его длины; B — восточный концевой участок (в противоположную сторону с предыдущей точки съемки); C — срединная часть вала, вид на восток приблизительно с 1/4 его длины; D — западный концевой участок (в противоположную сторону с предыдущей точки съемки).

Рис. S2. Микроповышения с сохранившимися фрагментами органогенных горизонтов: A, C, E, G —

фотографии микрорельефа; B, D, F, H — отдельные микроповышения; A, B — ареал СПП-2; C, D — ареал СПП-7; E, F — ареал СПП-17; G, H — ареал СПП-24.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
- 2. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 487 с.
- 3. *Басков Е.А., Суриков С.Н.* Гидротермы Земли. Л.: Недра, 1989. 243 с.
- 4. Вилор Н.В., Андрулайтис Л.Д., Зарубина О.В., Данилов Б.С. Геохимия сейсмоактивных региональных разломов (Байкальская рифтовая зона, Восточная Сибирь) // Геохимия. 2015. № 1. С. 64—82. https://doi.org/10.7868/S0016752514110107
- 5. Геннадиев А.Н., Гептнер А.Р., Жидкин А.П., Чернянский С.С., Пиковский Ю.И. Экзотемпературные и эндотемпературные почвы Исландии // Почвоведение. 2007. № 6. С. 661–675.
- 6. *Герасимова М.И.* Классификация почв России: путь к следующей версии // Почвоведение. 2019. № 1. С. 32–42. https://doi.org/10.1134/S0032180X190010027
- Гольдфарб ИЛ. Влияние гидротермальной деятельности на условия формирования и морфологический облик почв (на примере основных гидротермальных систем Камчатки) // Почвоведение. 1996. № 12. С. 1413—1419.
- 8. Гольфарб И.Л. Влияние гидротермального процесса на почвообразование (на примере камчатки). Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2005. 25 с.
- 9. *Горячкин С.В., Мергелов Н.С., Таргульян В.О.* Генезис и география почв экстремальных условий: элементы теории и методические подходы // Почвоведение. 2019. № 1. С. 5—19. https://doi.org/10.1134/S0032180X19010040
- 10. *Жамбалова А.Д.* Засоленные почвы зон разломов Кучигерских гидротерм и их геохимические особенности. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Улан-Удэ, 2018. 22 с.
- 11. Завадская А.В., Семенков И.Н., Крупская В.В., Закусин С.В., Паничева Д.М. Трансформация почвенного и растительного покровов термальных экосистем под действием температурного фактора (на примере длины реки Гейзерной, Кроноцкий заповедник) // Тр. Кроноцкого гос. природного заповедника. Петропавловск-Камчатский, 2017. Т. 5. С. 26—39.
- 12. Замана Л.В. Мерзлотно-гидрогеологические и мелиоративные условия Баргузинской впадины. Новосибирск: Наука, 1988. 126 с.
- 13. Исаев В.П. Природные газы Баргузинской впадины. Иркутск: Изд-во Иркутского ун-та, 2006. 220 с.
- 14. *Касимов Н.С.* Геохимия ландшафтов зон разломов (на примере Казахстана). М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. 119 с.

- Клещева Е.А. Индикационные особенности растений юга Сибири по отношению к фактору увлажнения почвы // Экология. 2010. № 6. С. 425–431.
- 16. Корнблюм Э.А., Михайлов И.С., Ногина Н.А., Таргульян В.О. Базовые шкалы свойств морфологических элементов почв. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1982. 55 с.
- 17. *Костюг Д.Н., Геннадиев А.Н.* Почвы и почвенный покров долины гейзеров // Почвоведение. 2014. № 6. С. 643–653. https://doi.org/10.7868/S0032180X14060069
- 18. Лунина О.В., Гладков А.С., Неведрова Н.Н. Рифтовые впадины Прибайкалья: тектоническое строение и история развития. Новосибирск: Академическое изд-во "Гео", 2009. 316 с.
- 19. *Лысак С.В.* Тепловой поток в зонах активных разломов на юге Восточной Сибири // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 8. С. 791–803.
- 20. Лысак С.В. Тепловой поток континентальных рифтовых зон. Новосибирск: Наука, 1988. 200 с.
- Малышев Л.И. Особенности и генезис флоры Сибири (Предбайкалье и Забайкалье). Новосибирск: Наука, 1984. 264 с.
- 22. Методы изучения лесных сообществ. СПб.: НИИ-Химии СПбГУ, 2002. 240 с.
- 23. Найданов Б.Б., Бадмаева Н.К., Аненхонов О.А., Пы-халова Т.Д. Галофитная растительность Западного Забайкалья: Флора и синтаксономия // Растительный мир Азиатской России. 2010. № 2(6). С. 66—72.
- 24. Намсараев Б.Б., Бархутова Д.Д., Данилова Э.В., Брянская А.В., Бурюхаев С.П., Гармаев Е.Ж., Горленко В.М., Дагурова О.П., Дамбаев В.Б., Зайцева С.В., Замана Л.В., Хахинов В.В., Татаринов А.В. Геохимическая деятельность микроорганизмов Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Академическое изд-во "Гео", 2011. 302 с.
- 25. Плюснин А.М., Замана Л.В., Шварцев С.Л., Токаренко О.Г., Чернявский М.К. Гидрогеохимические особенности состава азотных терм Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 2013. № 5. С. 647–664.
- Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
- 27. Почвы Баргузинской котловины. Новосибирск: Наука, 1983. 270 с.
- 28. Разумова В.Н. Древние коры выветривания и гидротермальный процесс. М.: Наука, 1977. 156 с.
- 29. Самкова Т.Ю., Рылова С.А., Кляпицкий Е.С. Пространственная неоднородность термального поля и ее отражение в структуре растительного покрова юго-восточного участка Больше-Банного месторождения (Южная Камчатка) // Вестник Краунц. Науки о Земле. 2016. № 3. Вып. 31. С. 18—27.
- 30. Семенков И.Н., Завадская А.В., Крупская В.В., Закусин С.В., Клинк Г.В., Паничева Д.М. Трансформация почвенного и растительного покрова в местах разгрузки гидротермальных вод долины реки Гейзерной (Кроноцкий государственный заповедник) // Материалы докл. Первой открытой конф. молодых ученых "Почвоведение: горизонты будущего", посвященной 90-летию института. Т. 1. М., 2017. С. 24—28.

- 31. *Серебряков И.Г.* Экологическая морфология растений. Жизненные формы покрытосеменных и хвойных. М.: Высш. школа, 1962. 377 с.
- 32. *Серебряков И.Г.* Жизненные формы высших растений и их изучение // Полевая геоботаника. М., 1964. Т. 3. С. 146–205.
- 33. Солнцева Н.П., Гольдфарб И.Л. Геохимические особенности ландшафтов современных парогидротермальных месторождений Камчатки (на примере Паужетского месторождения) // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5, География. 1994. № 2. С. 65—73.
- 34. *Татаринов А.В., Яловик Л.И., Канакин С.В.* Особенности формирования и минеральные ассоциации литокомплексов грязевых вулканов на юге Восточной Сибири // Вулканология и сейсмология. 2016. № 4. С. 34—49. https://doi.org/10.7868/S0203030616030056
- 35. *Толмачев А.И.* Введение в географию растений. Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1974. 244 с.
- 36. Убугунов В.Л., Хитров Н.Б., Убугунова В.И., Жамбалова А.Д., Рупышев Ю.А., Аюшина Т.А., Парамонова А., Цыремпилов Э.Г., Насатуева Ц.Н. Эндогенный фактор и морфогенетическое строение почв в зоне влияния Кучигерских гидротерм (Байкальская рифтовая зона, север Баргузинской котловины) // Природа внутренней Азии. Nature of Inner Asia. 2018. № 4. С. 54—72. https://doi.org/10.18101/2542-0623-2018-4-54-72
- Функционирование субарктической гидротермальной экосистемы в зимний период / Под ред. Боголицына К.Г., Болотова И.Н. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 252 с.
- 38. Хитров Н.Б., Убугунов В.Л., Убугунова В.И., Рупышев Ю.А., Аюшина Т.А., Жамбалова А.Д., Цыремпилов Э.Г., Парамонова А.Е., Насатуева Ц.Н. Морфологическое строение почв в ближайшей зоне влияния Кучигерских гидротерм (Баргузинская котловина) // Почвоведение. 2019. № 12. С. 1430—1453. https://10.1134/S0032180X19120074
- 39. Чернявский М.К. Геоэкологические особенности термальных источников Баргузинского Прибайкалья и использование их в бальнеологических целях. Автореф. дис. ... канд. географ. наук. Улан-Удэ, 2006. 22 с.
- 40. Чернявский М.К., Плюснин А.М., Дорошкевич С.Г., Будаев Р.Ц. Рекреационно-бальнеологические особенности северо-восточной части Баргузинской котловины // География и природные ресурсы. 2018. № 2. С. 63—72. https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-2
- 41. *Шеляг-Сосонко Ю.Р.* Очерк флоры и растительности Ялтинского горно-лесного государственного заповедника // Ботанический журн. 1978. Т. 63. № 10. С. 1430—1439.
- 42. Эллис А.Дж. Исследованные геотермальные системы // Геохимия гидротермальных рудных месторождений. Пер. с англ. М.: Мир, 1982. С. 497—534.
- 43. *Юрцев Б.А.* Флора Сунтар-Хаята: проблемы истории высокогорных ландшафтов северо-востока Сибири. Л.: Наука, 1968. 235 с.
- 44. Armstrong D.C. Acid sulphate alteration in a magmatic hydrothermal environment, Barton Peninsula, King

- George Island, Antarctica // Mineralogical Magazine. 1995, V. 59, P. 429–441.
- Bockheim J.G., Ballard T.M. Hydrothermal soils of the crater of Mt. Baker // Soil Sci. Soc. Am. Proc. 1975. V. 39, P. 997–1001.
- 46. *Burns B*. Vegetation change along a geothermal stress gradient at the Te Kopia steamfield // J. Royal Soc. New Zealand. 1997. V. 27. P. 279—293. https://doi.org/10.1080/03014223.1997.9517539
- 47. Byrdina S., Grandis H., Sumintadireja P., Caudron C., Syahbana D.K., Naffrechoux E., Gunawan H., Suantika G., Vandemeulebrouck J. Structure of the acid hydrothermal system of Papandayan volcano, Indonesia, investigated by geophysical methods // J. Volcanology Geothermal Res. 2018. V. 358. P. 77–86. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.06.008
- 48. *Cross D*. Soils and geology of some hydrothermal eruptions in the Waiotapu District // New Zealand J. Geol. Geoph. 1963. V. 6. P. 70–87.
- 49. Guidelines for soil description. Fourth edition. FAO. Rome, 2006. 97 p.
- Gwynn M., Allis R., Hardwick C., Hill J., Moore J. A New Look at the Thermal Regime Around Roosevelt Hot Springs, Utah // GRC Transactions. V. 40. 2016. P. 551–558.
- 51. IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports № 106. FAO, Rome. 192 p.
- 52. *Lloyd E.F.* The hot springs and hydrothermal eruptions of Waiotapu // New Zealand J. Geol. Geoph. 1959. V. 2. P. 141–176.
- 53. Maussen K., Villacorte E., Rebadulla R.R., Maximo R.P., Debaille V., Bornas Ma.A., Bernard A. Geochemical

- characterization of Taal volcano-hydrothermal system and temporal evolution during continued phases of unrest (1991–2017) // J. Volcanology Geothermal Res. 2018. V. 352. P. 38–54. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.01.007
- 54. Neale C.M.U., Jaworowski C., Heasler H., Sivarajan S., Masih A. Hydrothermal monitoring in Yellowstone National Park using airborne thermal infrared remote sensing // Remote Sensing Environ. 2016. V. 184. P. 628–644. https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.016
- Rodman A.W., Shovic H.F., Thoma D. Soils of Yellowstone National Park. Yellowstone Center for Resources, Yellowstone National Park, Wyoming, YCR-NRSR-96-2. 1996. 324 p.
- 56. Schoen R., White D.E., Hemley J.J. Argillization by descending acid at Steamboat Springs, Nevada // Clays and Clay Minerals. 1974. V. 22. P. 1–22.
- 57. Stoffregen R. Genesis of Acid-Sulfate Alteration and Au-Cu-Ag Mineralization at Summitville, Colorado // Economic Geology. 1987. V. 82. P. 1575–1591. https://doi.org/0361-0128/87/726/1575-17\$2.50
- Trettin C.C., Bartelli L.J. Characterization of Soils in Yellowstone National Park // University of Wyoming National Park Service Research Center Annual Report. V. 6, Article 25. 1982. P. 133–136. http://repository.uwyo.edu/uwnpsrc_reports/vol6/iss1/25
- Vucetich C.G., Wells N. Soils, agriculture, and forestry of Waiotapu Region, Central North Island, New Zealand (Guthrie, Waiotapu, Rerewhakaaitu, Atiamuri, Reporoa Districts) // New Zealand Soil Bureau Bulletin. V. 31. Wellington, 1978. 100 p.
- 60. Wilson G.W., Fredlund D.G., Barbour S.L. The effect of soil suction on evaporative fluxes from soil surfaces // Can. Geotechnical J. 1997. V. 34. P. 145–155.

Genetic Sequence of Microhighs in the Region with Gas-Hydrothermal Turbation of Soils

N. B. Khitrov^{1,*}, V. L. Ubugunov², V. I. Ubugunova², Yu. A. Rupyshev², T. A. Ayushina², A. D. Zhambalova², E. G. Tsyrempilov², A. E. Paramonova², and Ts. N. Nasatueva²

¹Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia

²Institute of General and Experimental Biology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, 670037 Russia

*e-mail: khitrovnb@gmail.com

Ground banks and hillock-like microhighs of unclear genesis were found along swamp border and at the concave swampy surfaces of alluvial plain in the region of Kuchiger hydrothermal springs at the northern part of Barguzin Depression (Buryatia). Classic formation of hillock in grassy swamp is replaced by diapir formation due to the pressure of uprising gas-hydrothermal fluids from seismically active Plutonic fault. Morphological and some other properties of soils of the transitional sites from swamp with active hydrothermal springs to alluvial plain with well expressed microrelief composed of microhigh chains and a network of microvalleys are described. The empirical statistical cumulative distribution curves of microreleif morphometric parameters were obtained. The studied microhighs form a genetic sequence of gas-hydrothermal turbated soils comprising organic variants with minimal intrusion of sandy material from below at the swamp border and predominantly mineral soils with an upward pushed gley horizon with different degree of oxidation at the alluvial plain.

Keywords: Baikal Rift Zone, gas-hydrothermal fluids, soil morphology, microrelief, soil salinity, pyrite

ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УЛК 502.171

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПОЧВЕННО-ПРОДУКЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ЭКОСИСТЕМ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2020 г. Т. А. Трифонова^{а, b, *}, Н. В. Мищенко^b, Ж. Д. Петросян^b

аМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

^bВладимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, ул. Горького, 87, Владимир, 600000 Россия *e-mail: tatrifon@mail.ru

Поступила в редакцию 09.04.2019 г. После доработки 11.07.2019 г. Принята к публикации 20.09.2019 г.

Для оценки состояния почвенных и растительных ресурсов территории нескольких речных водосборных бассейнов использован показатель почвенно-продукционного потенциала, рассчитываемый по наземным и дистанционным данным (индекс поглощенной растительностью при фотосинтезе радиации, FPAR), а также показатели запаса фитомассы, данные о продукции фитоценозов и структуре землепользования, листовой индекс, LAI. Показано, что экосистемы речных бассейнов, расположенные в разных природно-климатических зонах, неоднозначно реагируют на изменения климатических параметров. Полученные данные позволяют прогнозировать динамику почвеннопродукционного потенциала в условиях изменения таких климатических характеристик, как температура и осадки. Показано, что продукционный потенциал продолжает со временем увеличиваться только на тех территориях, где сумма биологически активных температур является ограничивающим фактором, т.е. в бассейнах зоны смешанных лесов. Установлено, что в речных бассейнах с ограниченным количеством осадков повышение температуры приведет к уменьшению почвеннопродукционного потенциала.

Ключевые слова: климатические параметры, глобальный листовой индекс (LAI), индекс поглощенной растительностью при фотосинтезе радиации (FPAR), изменение климата

DOI: 10.31857/S0032180X20020136

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широко обсуждается проблема изменения климата и возможные трансформации природно-антропогенных комплексов [17]. Одним из важнейших параметров экологического мониторинга является продуктивность растительного покрова. Данный показатель зависит от состояния почвенного покрова, который в значительной мере формирует основу продукционного потенциала ландшафта [2, 4]. Также необходимо учитывать степень антропогенного преобразования территории [3, 9, 10, 28].

Изучение листового полога наземными методами проводится сравнительно давно [22]: оценивается характер облиствления древесного яруса, его усыхание, влияние климатических условий и хозяйственной деятельности человека на эти процессы. Именно наземные методы позволили изучить взаимосвязь показателей листовых индексов подчиненных ярусов фитоценоза и древесной растительности, формирующей высокие пологи леса. Так, для нагорных дубрав южной лесостепи показано, что подчиненные

ярусы фитоценоза (подлесок, подрост, травяной покров) на первых этапах демутационных сукцессий перехватывают фотосинтетическое производство древесного яруса, но компенсируют потери листвы у древостоев примерно наполовину; в результате снижается суммарный листовой индекс. Насаждения с упрощенной структурой листового полога имеют максимальные значения листового индекса [16].

Для характеристики состояния почвенного и растительного покровов экосистем речных бассейнов нами предложено использовать показатель почвенно-продукционного потенциала, который характеризует способность природной или природно-антропогенной экосистемы в определенных почвенно-биоклиматических условиях в течение длительного времени воспроизводить продукцию (фитомассу). В основе его расчета лежит комплексная оценка нескольких параметров: удельной продуктивности, естественного плодородия почв, урожайности зерновых культур; биоклиматических параметров; почвенно-экологического индекса [20, 21].

Почвенно-продукционный потенциал позволяет оценить средний многолетний ресурс территории для производства фитомассы естественными и природно-антропогенными экосистемами [12, 19]. Однако следует отметить, что, не меняя сути предложенного показателя, мы продолжаем поиск получения исходных составляющих параметров более оперативным путем для обеспечения экологического мониторинга.

С целью оценки состояния и динамики почвенно-растительного покрова в настоящей работе предлагается анализировать индексы, рассчитанные по данным дистанционного зондирования, которые в последнее время все шире используются и позволяют повысить оперативность исследований [8, 20, 30, 31].

В современных научных исследованиях состояния растительного покрова наиболее популярным является вегетационный индекс NDVI, так как он прост в вычислении, имеет высокую чувствительность к изменению состояния растительности и умеренно чувствителен к влиянию отражения почвенного покрова [15, 29, 20, 24]. Обычно ограничением для использования NDVI в целях оценки состояния вегетирующей растительности является ее низкое проективное покрытие. В случае разреженной растительности почвенный покров оказывает существенное и неоднозначное влияние на значения этого показателя [18].

Для оценок состояния растительного покрова, свободных от влияния почв, используется глобальный листовой индекс (LAI) и показатель радиации, поглощенной растительностью при фотосинтезе (FPAR). LAI и FPAR – представляют собой биофизические параметры, описывающие структуру растительного покрова и скорость проходящего в нем энергомассобмена [27, 33, 34]. Их используют для расчета величины фотосинтеза, эвапотранспирации и первичной продуктивности экосистем [26, 29, 32]. Эти параметры необходимы для оценки процессов круговорота энергии, углерода, воды и изучения биогеохимических характеристик растительности. Их активно применяют для моделирования динамики растительного покрова [25, 35]. Кроме того, при расчете LAI/FPAR используется большее количество спектральных зон съемки (прошедших атмосферную коррекцию), чем при расчете NDVI, а также учитывается карта типов покровов поверхности Земли и дополнительная наземная информация [18].

Большая изменчивость характеристик листового полога, невысокая изученность его пространственно-временных параметров требуют оперативных данных о листовом индексе, поэтому на современном этапе использование дистанционных данных является предпочтительным.

Настоящая работа посвящена анализу почвенно-продукционного потенциала экосистем речных бассейнов, расположенных в различных природно-климатических зонах, а также выявлению особенностей биологического отклика этих экосистем на возможные изменения климатических параметров. Цель работы заключалась в демонстрации возможности использования данных дистанционного зондирования для мониторинга продукционного потенциала растительности и расчета итогового показателя почвенно-продукционного потенциала различных речных бассейнов.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено на основе бассейнового подхода, который развивается авторами. Ведущую системообразующую роль играет речной сток, он формирует экосистему речного бассейна через распределение водных ресурсов, особенности рельефа и микроклимата, тем самым влияя на почвенный покров и растительность. Рельеф бассейна и его водные потоки могут рассматриваться как внешняя экологическая среда для функционирования биоты, в которой живой компонент образует характерные для бассейна пространственные ряды. Поэтому актуальным является анализ параметров функционирования речного бассейна как единой экосистемы в рамках различных ландшафтных и климатических условий, а также анализ динамики его продукционных характеристик при различных сценариях изменения климатических условий.

В качестве объектов исследования использовали ключевые речные бассейны, расположенные в европейской части Российской Федерации. Это часть Восточно-Европейской холмистой равнины с высотами, обычно не превышающими 200 м над уровнем моря. Значительная протяженность района с севера на юг и относительно равнинный характер местности обусловливают проявление отчетливо выраженной зональности природных условий, заключающейся в закономерной смене географических ландшафтов.

Климатические условия района обладают общими чертами, позволяющими отнести климат к бореальному типу, характеризующемуся признаками континентальности: теплым летом и холодной снежной зимой. Однако большая протяженность территории в широтном и меридиональном направлениях обусловливает существенные различия в климатических условиях отдельных его частей: севера и юга, запада и востока. В направлении с севера на юг климат становится все более теплым, а с запада на восток, по мере удаления от Атлантического океана, более континентальным [23].

Для детального анализа выбрано несколько ключевых речных бассейнов, наиболее полно отражающих разнообразие природных комплексов

и ландшафтов изучаемой территории, это водосборные бассейны рек: Мезень, Онега, Клязьма, Самара, Воронеж и Сал.

Бассейны охватывают территорию Восточно-Европейской равнины во всех природных зонах от лесотундры и тундры (в низовьях р. Мезень), через зоны бореальных, суббореальных и неморальных лесов до сухих степей юга России в бассейне р. Сал. Ключевые бассейны принадлежат водосборам Северного Ледовитого океана (Мезень, Онега), Черного моря (Воронеж и Сал – притоки р. Дон, впадающего в Азовское море) и Волго-Каспийского бассейна внутреннего стока (Клязьма и Самара). Несмотря на большую величину охватываемой территории, все эти бассейны находятся в пределах единого геологического фундамента Восточно-Европейской (Русской) платформы, перекрытой толщами осадочного чехла, а также в пределах единого умеренного климатического пояса от умеренно холодного до умеренно теплого континентального типа климата [5, 11, 15], что обусловливает корректность при сравнительных оценках их функционирования под влиянием различных природно-климатических условий.

Бассейн р. Мезень относится к районам Крайнего Севера и расположен близ границы умеренного и субарктического климатических поясов, зон тайги и лесотундры, т.е. характеризуется прохладным летом и продолжительной холодной зимой. Преобладают еловые и сосновые леса. Почвы болотные, подзолистые торфянистые глеевые иллювиально-гумусовые суглинистые и песчаные на озерно-ледниковых и флювиогляциальных отложениях, местами подстилаемых моренными суглинками. Иногда встречаются мерзлотные торфяные почвы верховых болот в комплексах с тундровыми почвами.

Бассейн р. Онега относится к области умеренно континентального климата, т.е. присутствует прохладное лето и продолжительная холодная зима при достаточном и избыточном увлажнении. Преобладает лесная растительность, господствующая порода из хвойных лесов — ель (Picea obovata), к которой примешиваются сосна обыкновенная (Pinus sylvestris) и береза (Betula pendula). Почвенный покров представлен подзолистыми и болотно-подзолистыми контактно-глееватые песчаными и супесчаными почвы на двучленных отложениях с близким залеганием коренных карбонатных и кристаллических пород.

Бассейн р. Клязьмы расположен на территории с умеренно континентальным климатом с теплым летом, умеренно холодной зимой и ярко выраженными переходными сезонами. Растительный покров территории бассейна представлен двумя основными типами растительности: бореальный (в северной части) и неморальный (в центральной и юго-восточной частях). Растительность носит сме-

шанный характер. Леса занимают более 50% площади бассейна. Почвы Среднерусской провинции дерново-подзолистые среднегумусированные. Супесчаные и песчаные, средне- и слабоподзолистые глеевые и глееватые почвы на древнеаллювиальных и флювиогляциальных отложениях, местами подстилаемых доренными суглинками и болотные торфяные почвы характерны для полесья Мещеры. Дерново-подзолистые песчаные, суглинистые и глинистые почвы возвышенностей. Серые лесные глинистые и тяжелосуглинистые почвы на слабокарбонатных покровных отложениях характерны для Владимирского ополья.

Бассейн р. Воронеж расположен в зоне умеренного климата. Зима умеренно морозная, как правило, с устойчивым снежным покровом, который образуется только в январе—феврале. Исторические широколиственные леса сильно вырублены и встречаются лишь небольшими перелесками по оврагам и небольшими рощицами среди полей. Почвы— среднерусские типичные мощные и среднемощные тучные черноземы оподзоленные, выщелоченные, среднегумусные и лугово-черноземные, и темно-серые и серые лесные на глинистых и тяжелосуглинистых лёссовидных породах с пятнами осолоделых, солонцеватых и засоленных почв по запалинам.

Бассейн р. Сал. Климат умеренно континентальный, степной. Степи объединяют сообщества ксерофильных дерновинных травянистых растений. Остепненные луга более мезофитны, в них преобладают луговые виды — преимущественно корневищные злаки. Бассейн расположен на стыке двух почвенных зон: черноземной и каштановой. Черноземы средние и маломощные малогумусные на глинистых и лёссовидных суглинках и глинах. На востоке преобладают почвы каштанового и темнокаштанового типа солонцеватые тяжелосуглинистые и глинистые в комплексах с солонцами.

Бассейн р. Самара. Климат умеренно континентальный. От севера к югу выражено проявляются черты континентального засушливого климата. В заволжских лесостепях появляется целый ряд степных видов восточной ориентации. Почвенный покров представлен серыми лесными почвами, выщелоченными, типичными и южными черноземами, каштановыми почвами, а также солонцами и солончаками. Черноземы обыкновенные, в том числе остаточно-карбонатные, среднемощныме, мало- и среднегумусные и лугово-черноземные глинистые и суглинистые на элюво-делювиальном основании коренных пород и на древних аллювиальных отложениях.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Комплексом наземных и дистанционных данных, полученных с помощью космоснимков (Мо-

dis), проведена оценка почвенно-продукционного потенциала.

Оценка продукционного потенциала растительности по дистанционно определяемым индексам LAI (листовой индекс) и FPAR (индекс, отражающий количество поглощенной растениями радиации при фотосинтезе). Эти показатели представляют собой биофизические параметры, описывающие структуру растительного покрова и скорость проходящего в нем энергомассобмена.

LAI — площадь листовой поверхности (с одной стороны листа) на единицу площади территории — характеризует структуру растительного покрова и может трактоваться как показатель первичной продукции экосистемы.

FPAR указывает на долю радиации в фотосинтетически активном диапазоне волн (0.400—0.700 мкм), поглощаемую растительным покровом. Индексы LAI и FPAR рассчитывали в программном комплексе ArcGis по июльским космоснимкам (Modis) 2005, 2010 и 2015 гг. Данные космоснимков пересчитывали и усредняли для территории речных бассейнов с использованием функций модуля Spatial analyst.

Методы анализа временных рядов данных. Анализ изменения показателей почвенно-продукционного потенциала и его отдельных параметров за период 2005—2015 гг. проводили с использованием статистических методов по динамике временных рядов, что позволило проследить как изменяются уровни ряда в абсолютном и относительном выражении. Для выявления направления и размеров изменений уровней во времени для рядов динамики рассчитывал следующие показатели: абсолютные изменения, относительные изменения. В качестве индекса динамики (*I*) параметров почвенно-продукционного потенциала использовали среднее относительное изменение, которое рассчитывали по уравнению:

$$I = \sqrt[K]{\frac{Y_n}{Y_1}},$$

где Y_1 — первое значение ряда; Y_n — n-ое значение ряда; K = n - 1 — количество изменений уровней ряда (r = 1...K).

Значение индекса динамики <1 — демонстрирует рост показателя, >1 — уменьшение; показатель, равный 1, характеризует стабильность ситуации.

Оценка почвенно-продукционного потенциала с использованием дистанционных и наземных данных. Нами предложен показатель почвенно-продукционного потенциала, который характеризует способность природной или природно-антропогенной экосистем воспроизводить фитопродукцию в определенных почвенно-климатических условиях. Для оперативной и обобщающей характеристики почвенно-продукционного потен-

циала целесообразно использование материалов дистанционного зондирования, что позволяет существенно повысить динамичность и достоверность проведения мониторинговых работ.

Почвенно-продукционный потенциал является важнейшим фактором, обеспечивающим прирост фитомассы естественных экосистем и количество биологических ресурсов территории. Он зависит от многих факторов: естественного плодородия, структуры землепользования, агрохимических свойств почвы, климата и т.д. Для его характеристики выбраны наиболее важные на наш взгляд показатели.

В качестве дистанционного параметра для оценки почвенно-продукционного потенциала использовали индекс поглощенной растительностью радиации при фотосинтезе FPAR, рассчитываемый для конкретных речных бассейнов по данным спутниковой системы Modis.

Наземные параметры включают следующие данные: наиболее значимый показатель почвенного плодородия — запас гумуса в метровом слое (т/га) (Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620431); климатические характеристики — сумма биологически активных температур $\Sigma(t > 10^{\circ}\text{C})$, количество осадков за период, для которого рассчитывается индекс FPAR за основные месяцы активной вегетации растений (май—июль) (https://гр5.ru).

Почвенно-продукционный потенциал (ППП) рассчитывали для каждого года в ряду наблюдений (2005—2015) по предложенной формуле:

$$\Pi\Pi\Pi = \left(\frac{F}{F_{\text{max}}} + \frac{r}{r_{\text{max}}} + \frac{\Sigma(t > 10)}{t_{\text{max}}} + \frac{K}{K_{\text{max}}}\right),$$

где F — индекс поглощенной растительностью при фотосинтезе радиации (FPAR); r — запас гумуса в почве, т/га в слое 1 м; $\sum (t > 10)$ — сумма температур выше 10° С; K — количество осадков за период с апреля по июль. В качестве максимальных значений параметров (F_{\max} , r_{\max} , t_{\max} , k_{\max}) использовали максимальное значение параметра в ряду наблюдений.

Также рассчитывали среднее значение почвенно-продукционного потенциала ($\Pi\Pi\Pi_{cp}$) для всего анализируемого периода.

Почвенно-продукционный потенциал рассчитывали для территории целого речного бассейна, как единой функционирующей системы, без разделения на угодья. Параметры, входящие в его состав, не имеют привязки к определенным угодьям.

Почвенно-продукционный потенциал позволяет оценить вклад различных факторов окружающей среды в формирование фитопродукции в динамике, а также по средним многолетним значениям. Информативным явилось также сопоставление рассчитанных значений почвенно-продукционно-

Бассейн	Год	FPAR	LAI	Среднее		· ·	осительное нение	Индекс динамики 2005—2015	
реки				FPAR	LAI	FPAR	LAI	FPAR	LAI
Клязьма	2005	0.66	2.42	0.69	2.76			1.07	1.14
	2010	0.66	2.67			1.00	1.10		
	2015	0.76	3.18			1.15	1.19		
Мезень	2005	0.69	2.10	0.70	2.29			1.02	1.06
	2010	0.69	2.4			1.00	1.14		
	2015	0.72	2.37			1.04	0.99		
Онега	2005	0.78	3.01	0.75	2.92			0.98	0.97
	2010	0.73	2.92			0.94	0.97		
	2015	0.75	2.83			1.03	0.97		
Сал	2005	0.31	0.50	0.28	0.52			0.86	0.94
	2010	0.29	0.61			0.94	1.22		
	2015	0.23	0.44			0.79	0.72		
Самара	2005	0.52	1.49	0.45	1.2			0.95	0.92
	2010	0.35	0.84			0.67	0.56		
	2015	0.47	1.28			1.34	1.52		
Воронеж	2005	0.72	3.15	0.71	3.15			1.05	0.89
	2010	0.61	3.82			0.85	1.21		

1.31

Таблица 1. Дистанционные индексы (FPAR и LAI), характеризующие растительный покров ключевых речных бассейнов европейской части РФ (2005–2015)

го потенциала с конкретными показателями фитопродуктивности, определенными наземными (запас фитомассы и продукция) и дистанционными методами (листовой индекс LAI), а также со структурой землепользования в регионе и особенностями антропогенной нагрузки.

0.8

2.47

2015

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Параметры почвенно-продукционного потенциала речных бассейнов разных природных зон

Для анализа данных дистанционного зондирования были рассчитаны значения индекса поглощенной растениями при фотосинтезе радиации FPAR (табл. 1) и составлены карты его распределения в ключевых речных бассейнах на европейской территории РФ. На рис. 1 приведен пример распределения данного индекса в бассейне р. Воронеж. Климатические характеристики бассейнов представлены в табл. 2.

Результаты расчета среднего показателя почвенно-продукционного потенциала ($\Pi\Pi\Pi_{cp}$) за период с 2005 по 2015 гг. (рис. 2) свидетельствуют о том, что его максимальное значение приходится на бассейн р. Воронеж. Самые низкие значения в бассейнах Мезени, Онеги и Сал. Бассейны рек Самары и Клязьмы занимают промежуточное по-

ложение и имеют примерно одинаковые средние значения.

0.65

Бассейны рек Мезени и Онеги находятся в одной таежной природной зоне. Бассейн р. Мезени самый северный из всех ключевых территорий, расположен на границе умеренного и субарктического климатических поясов, зон тайги и лесотундры, т.е. здесь прохладное лето и продолжительная холодная зима, непродолжительный вегетационный период, а средний показатель почвенно-продукционного потенциала минимальный среди всех бассейнов, составляет 1.8.

В этой же зоне тайги, юго-восточнее, расположен бассейн р. Онеги. Его территория относится к области умеренно континентального климата. Следствием этого являются более высокие значения FPAR, суммы биологически активных температур и значения $\Pi\Pi\Pi_{cp}$ (2.31).

Оценка запаса гумуса в метровом слое, с учетом его накопления в торфяных болотах, показала максимальное его содержание в северных речных бассейнах Онеги и Мезени, где большие площади заняты болотами. Однако в итоговом расчете почвенно-продукционного потенциала данные запасы гумуса не учитывались, так как они большей частью не реализуются в виде продукции растительного покрова экосистемы.

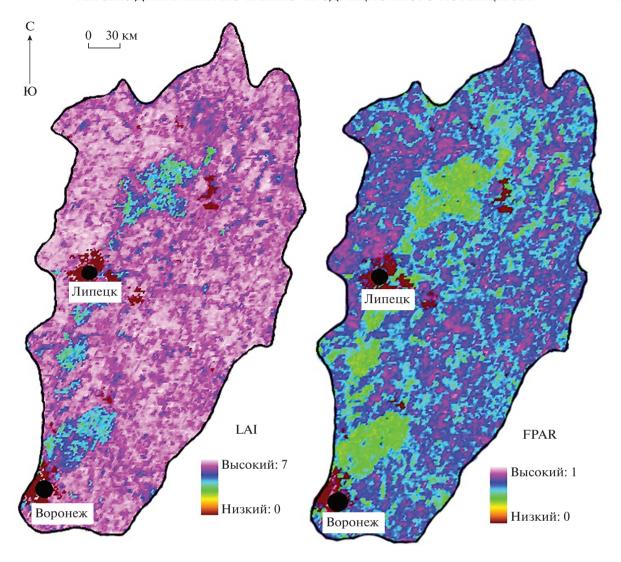


Рис. 1. Распределение листового индекса (LAI) индекса поглощенной растениями фотосинтетически активной радиации (FPAR) в бассейне р. Воронеж (июль, 2010 г.).

Следует отметить, что осадков, в общем, выпадает на территории достаточно (только за трехмесячный период с мая по июль в среднем за 2005—2015 гг. в бассейне Онеги этот показатель составляет 176 мм, в бассейне Мезени — 117 мм), значения поглощенной фотосинтетически активной радиации по сравнению с другими бассейнами — одни из самых высоких. Следовательно, именно низкий температурный показатель является главным фактором, ограничивающим рост почвенно-продукционного потенциала в бассейнах Мезени и Онеги.

Почвенно-продукционный потенциал в бассейне р. Воронеж, расположенном в лесостепной зоне, существенно выше, чем в других (ППП_{ср} 3.3). Из всех сравниваемых речных бассейнов здесь самые плодородные почвы (среднерусские типичные мощные и среднемощные тучные черноземы оподзоленные, выщелоченные, среднегумусные и лугово-черноземные, и темно-серые и серые лесные почвы на глинистых и тяжелосуглинистых, лёссовидных породах) и они, в первую очередь, обеспечивают высокий почвенно-продукционный потенциал. Также здесь высокие значения суммы биологически активных температур и поглощенной фотосинтетически активной радиации. Единственный из анализируемых факторов, который отличается нестабильностью и может накладывать ограничение на рост показателя потенциала — это количество осадков.

Бассейны рек Сал и Самара расположены в степной зоне и их почвенно-продукционный потенциал существенно меньше, чем в бассейне р. Воронеж. В бассейне р. Самара его среднее за 2005—2015 гг. значение составляет 2.57, а в бассейне р. Сал — 2.2. В двух бассейнах фиксируются невысокие значения FPAR и небольшое количество

Таблица 2. Климатические характеристики (сумма биологически активных температур ($\Sigma t > 10^{\circ}$ C) и сумма осад-
ков) ключевых речных бассейнов европейской части РФ (2005–2015)

	Сумма		Среднее			носительное нение	Индекс динамики 2005—2015		
Бассейн реки	Год	$\Sigma t > 10^{\circ} \text{C}$	осадков (апрель— июль)	$\Sigma t > 10^{\circ} \text{C}$	$\Sigma t > 10^{\circ} \text{C}$ суммы осадков (апрель—июль)	$\Sigma t > 10^{\circ} \text{C}$	суммы осадков (апрель— июль)	$\Sigma t > 10^{\circ} \text{C}$	суммы осадков (апрель— июль)
Клязьма	2005	2778.5	268.0	2865.9	236.5			0.98	1
	2010	3145.6	169.0			1.13	0.63		
	2015	2673.5	272.5			0.85	1.61		
Мезень	2005	1218.9	71.8	1205.6	116.9			0.91	1.63
	2010	1284.8	88.5			1.05	1.23		
	2015	1113.1	190.5			0.87	2.15		
Онега	2005	2202.8	123.5	2003.1	175.5			0.9	1.45
	2010	1978.4	127.0			0.9	1.03		
	2015	1828.3	276.0			0.92	2.17		
Сал	2005	3712.5	100.0	3736.2	130.8			0.9	1.41
	2010	3872.6	92.9			1.04	0.93		
	2015	3623.4	199.5			0.94	2.15		
Самара	2005	2968.3	69.6	3063.4	78.2			0.9	1.44
	2010	3355.8	22.0			1.13	0.32		
	2015	2866.2	143.0			0.85	6.5		
Воронеж	2005	3044.9	180.0	3215.2	160.7			1.03	1.08
	2010	3463.7	91.2			1.14	0.51		
	2015	3236.9	211.0			0.93	2.31		

осадков, но есть и отличия в структуре почвенно-продукционного потенциала этих территорий.

Почвенный покров бассейна р. Самара характеризуется высоким содержанием гумуса (второе место после бассейна р. Воронеж). Практически такой же, как в бассейне р. Воронеж, суммой биологически активных температур, в то же время суммарный потенциал оказывается ниже из-за небольшого количества осадков и невысоких показателях поглощенной растительностью радиации (FPAR).

Очень низкий почвенно-продукционный потенциал бассейна р. Сал связан с неблагопритным сочетанием факторов. Прежде всего, это степной климат. Большую часть года здесь преобладают восточные ветры, несущие в теплый период года суховеи и пыльные бури. Осадков выпадает 400—650 мм в год. Бассейн расположен на стыке двух почвенных зон — черноземной и каштановой. Черноземы средние и маломощные малогумусные на глинистых и лёссовидных суглинках и глинах. Запас гумуса в почвах значительно ниже, чем в бассейне р. Самары и составляет в среднем 198 т/га. Здесь наименее эффективно используется фото-

синтетически активная радиация. Хотя суммарная солнечная радиация этой территории самая высокая среди анализируемых ключевых участков, но коэффициент поглощения растениями фотосинтетически активной радиаци низкий, всего 0.28. Высокие значения суммы биологически активных температур в сочетании с небольшим количеством осадков не обеспечивают рост продуктивности.

Бассейн р. Клязьма находится в зоне смешанных лесов и имеет $\Pi\Pi\Pi_{\rm cp}$, примерно равный таковому в бассейне Самары степной зоны. Для ландшафтов данного бассейна характерна высокая доля поглощенной фотосинтетически активной радиации, благодаря наличию крупных лесных массивов, большое количество осадков, однако плодородие почв существенно хуже, и сумма биологически активных температур ниже по сравнению с ключевыми участками, расположенными в степной и лесостепной зонах.

Таким образом, два речных бассейна Самары и Клязьмы, располагающиеся в разных природных зонах, имеют практически одинаковые значения показателя почвенно-продукционного потенци-

ала, но за счет разных составляющих. В бассейне Клязьмы это обеспечивается хорошими показателями FPAR и количества осадков, а в бассейне Самары — богатыми запасами гумуса и высокой суммой биологически активных температур.

Динамика почвенно-продукционного потенциала в исследуемых речных бассейнах

Динамично изменяющимися показателями в оценке почвенно-продукционного потенциала являются три параметра: значения поглощенной фотосинтетически активной радиации (FPAR), сумма биологически активных температур и количество осадков. Эти параметры могут существенно меняться от года к году, тогда как запас в почве гумуса является более стабильным, и его изменения не оказывают влияния на динамику почвенно-продукционного потенциала в среднесрочной перспективе. Наиболее изменчивым является показатель количества осадков, его индекс за 2005—2015 гг. меняется от 1 до 1.63 в разных бассейнах. Разброс значений индексов динамики FPAR и суммы биологически активных температур примерно одинаков.

Анализ изменений почвенно-продукционного потенциала не выявил значительных его изменений к 2015 г. по сравнению с 2005 г. в большинстве речных бассейнов. Однако внутри этого временного промежутка в некоторых бассейнах отмечаются резкие изменения. Исключением является бассейн Мезени, для которого характерен наиболее существенный рост почвенно-продукционного потенциала.

Разброс значений индекса динамики для почвенно-продукционного потенциала меньше, чем для его отдельных составляющих и имеет значения от 1.02 (бассейн Клязьмы) до 1.13 (в бассейне р. Мезень). Следовательно, разнонаправленные колебания отдельных показателей, определяющих почвенно-продукционного потенциала, могут уравновешивать друг друга.

Почвенно-продукционный потенциал в бассейне р. Воронеж выше, чем в других бассейнах на протяжении всего анализируемого периода. Количество осадков в целом за период среднее, но оно существенно изменяется по годам. Например, в 2015 г. оно было самым высоким за учитываемый промежуток времени (более существенные изменения происходят только в бассейне Самары). В бассейне р. Воронеж почвенный покров обеспечивает максимальное значение почвеннопродукционного потенциала, а количество осадков, главным образом, определяет его динамику (индекс динамики осадков 1.08), наряду со значениями FPAR. Сумма биологически активных температур изменяется меньше и, соответствен-

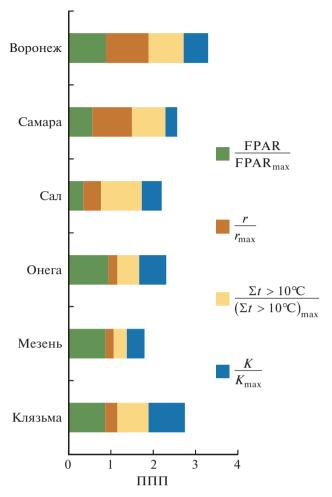


Рис. 2. Почвенно-продукционный потенциал ключевых речных бассейнов (средние значения 2005—2015 гг.).

но, оказывает меньшее влияние на общую динамику почвенно-продукционного потенциала.

Это подтверждается тем, что большое снижение почвенно-продукционного потенциала произошло к 2010 г., когда значительно уменьшилось количество осадков, что сказалось на состоянии растительности, снизилась и доля поглощенной растениями фотосинтетически активной радиации. Сумма биологически активных температур в этот период немного увеличилась.

К 2015 г. продукционный потенциал увеличился, видимо, это, связано с увеличением количества осадков. По остальным параметрам условия 2015 г. самые благоприятные из анализируемого временного ряда. В этот год два показателя здесь имеют максимальные для территории значения: содержание гумуса в почве и значения поглощенной фотосинтетически активной радиации; сумма биологически активных температур также высокая.

Наиболее существенные изменения почвенно-продукционного потенциала в положитель-

ную сторону отмечаются в бассейне Мезени. Индекс динамики за 10 лет составил 1.13. На изменения почвенно-продукционного потенциала в бассейне оказало влияние, прежде всего, количество осадков и значения фотосинтетически активной радиации, так как сумма биологически активных температур менялись незначительно.

Полученные данные позволяют предположить, какой будет динамика почвенно-продукционного потенциала в условиях изменения климатических параметров. Как уже отмечалось, во всех речных бассейнах за десятилетний период сумма биологически активных температур увеличилась, и только в бассейне Мезени она практически не изменилась.

Можно допустить, что в дальнейшем продукционный потенциал продолжит расти только на тех территориях, где сумма биологически активных температур была ограничивающим фактором, т.е. в бассейнах зоны смешанных лесов, где ключевым участком был бассейн р. Клязьмы. За десятилетний период на его территории отметили тенденцию к небольшому росту почвенно-продукционного потенциала.

В речных бассейнах с недостаточным количеством осадков повышение температуры может привести к снижению потенциала, что мы наблюдаем на анализируемом отрезке времени в речных бассейнах Самары и Воронежа, где на фоне увеличения суммы температур выше 10°С, продукционный потенциал не увеличился, а немного снизился. В бассейне р. Сал почвенно-продукционный потенциал увеличился, но здесь увеличение биологически активных температур сопровождалось повышением количества осадков.

В речных бассейнах таежной зоны рост потенциала ограничен не только низкими температурами, но, прежде всего, невысоким плодородием почвы.

Сравнительный анализ почвенно-продукционного потенциала, параметров продуктивности растительного покрова и структуры землепользования речных бассейнов

Почвенно-продукционный потенциал характеризует разнообразные сочетания наиболее важных естественных факторов, которые влияют на формирование фитопродукции в экосистеме. Однако благоприятные естественные факторы не всегда могут реализоваться в виде продукции, поскольку последняя также зависит и от воздействия комплекса антропогенных факторов. Конкретные показатели фитопродуктивности мы оценивали с помощью наземных и дистанционных методов. Листовой индекс LAI, определяемый по данным дистанционного зондирования, рассматривали как косвенную характеристику ее продуктивности на определенный момент времени

и использовали, в основном, для оценки динамики состояния растительности, так как по наземным данным получение такой информации для больших территории весьма трудоемко. Удельная фитомасса и продукция, рассчитанные по наземным данным, являются более усредненными и описывают состояние растительности за многолетний период [1, 2].

Для определения почвенно-продукционного потенциала и характеристики продукционного состояния растительности речного бассейна используются усредненные для территории значения индекса фотосинтетически активной радиации, поглощенной растениями, и листового индекса. Однако эти индексы отличаются в разных угодьях (пример распределения индексов LAI и FPAR для бассейна р. Воронеж приведен на рис. 1). Анализ вклада отдельных угодий также представляет интерес. Например, значения дистанционных индексов LAI и FPAR для лесной растительности в 2015 г. приведены в табл. 3. Согласно дистанционным индексам, продукционный потенциал лесной растительности максимальный в бассейне р. Онега. Листовой индекс лесов Мезени существенно ниже, чем в бассейне Онеги, что может быть связано с тем, что на территории бассейна р. Мезень много редколесья (табл. 4).

Леса, расположенные на водосборах Клязьмы и Воронежа, имеют примерно одинаковый продукционный потенциал. В бассейне Клязьмы так же, как в бассейне Мезени, имеется большое количество редколесья, что ухудшает общий продукционный потенциал лесной растительности.

Мы сопоставили запасы фитомассы и продукцию речных бассейнов, рассчитанные по средним многолетним данным [1, 13], структуру землепользования, значения листового индекса и почвенно-продукционный потенциал (табл. 4, 5).

В бассейне *р. Воронеж* высокие значения почвенно-продукционного потенциала обеспечиваются, главным образом, через аграрную продукцию: площади земель сельскохозяйственного назначения составляют здесь около 80%. Однако, хотя продукционный потенциал речного бассейна и определяется сельскохозяйственной деятельностью, но вклад естественных экосистем здесь существеннее, чем в бассейнах степной зоны за счет высокой продуктивности и накопления большого запаса фитомассы.

Максимальные среди анализируемых объектов значения почвенно-продукционного потенциала соответствуют высоким показателям продуктивности фитомассы, что подтверждается и максиальными за период 2005—2015 гг. значениями LAI, хотя даный показатель здесь не стабилен и, например, в 2015 г. територия бассейна р. Воронеж была на третьем месте после бассейнов Клязьмы и Онеги. Динамика листового индекса демон-

Таблица 3.	Вначения листового индекса и фотосинтетически активной р	радиации для речных бассейнов евро-
	ги РФ (2015 г.)	

Бассейн реки	FPAR	LAI	FPAR	LAI
Вассеин реки	лесная раст	гительность	целый (бассейн
Клязьма	0.68	2.57	0.76	3.18
Мезень	0.72	1.82	0.72	2.37
Онега	0.80	2.79	0.75	2.83
Сал	_	_	0.23	0.44
Самара	0.57	1.79	0.47	1.28
Воронеж	0.67	2.66	0.80	2.47

Таблица 4. Структура землепользования бассейнов европейской части РФ (MODIS Land Cover (MCD12Q1 Product))

				Угодья,	%		
Бассейн реки	Общая площадь угодий, тыс. км ²		редколесье и древесно- кустарниковая растительность	луговые	пахотные	заболоченные	прочие
Мезень	77.6	53	39	1	_	7	_
Клязьма	42.7	58	20	6	15	_	1
Онега	56.0	83	9	1	_	6	1
Сал	20.3	_	_	62	38	_	_
Самара	47.1	3	1	7	88	_	1
Воронеж	19.4	8	2	5	83	_	2

Таблица 5. Продуктивность речных бассейнов европейской части РФ

Бассейн реки	Удельная фитомасса, т/га	Продукция, т/(га год)	Среднее значение LAI (2005-2015)
Клязьма	293.5	11.56	2.76
Мезень	122.27	5.75	2.29
Онега	190.25	5.96	2.92
Сал	9.61	8.30	0.52
Самара	16.05	15.81	1.20
Воронеж	116.91	20.66	3.15

стирурет ухудшение состояния растительности к 2015 г. по сравнению с 2010 г., когда отмечался рост. Индекс динамики LAI показывает, что листовой индекс в бассейне р. Воронеж снизился больше, чем в остальных бассейнах. За аналогичный период уменьшился и почвенно-продукционный потенциал. Следовательно, в данном бассейне в целом самое благоприятное сочетание факторов, обеспечивающих продукционный потенциал, но состояние растительности характеризуется нестабильностью. Следует полагать, что здесь существенна роль хозяйственной деятельности человека.

Оценка стуруктуры землепользования показывает, что наибольшую сельскохозяйственную нагрузку испытывают бассейны рек степной зоны (бассейны рек Сал и Самары). В этих бассейнах почвенно-продукционный потенциал территории реализуется, в основном, в виде сельскохозяйственной продукции. Поскольку основная площадь этих бассейнов занята сельскохозяйственными угодьями, то антропогенное воздействие и состояние этих угодий являются определяющими факторами формирования почвенно-продукционного потенциала территории. Естественные фитоце-

нозы здесь оказывают минимальное влияние на продуктивность и накопление фитомассы в бассейне. Продукция естественных экосистем в бассейне Сал низкая (8.30 т/га в год), запас фитомассы самый невысокий из всех ключевых участков (9.61 т/га), что соответствует самому низкому значению листового индекса (LAI 0.52), и за весь период наблюдений он в этом бассейне ниже, чем в остальных. В бассейне Самары продукция естественных экосистем высокая (15.8 т/га в год), но их вклад не велик по причине небольшой площади. Динамика листвого индекса показывает тенденцию к ухудшению состояния растительного покрова обоих бассейнов.

В бассейне Клязьмы отмечены средние значения показателя продукции, значения LAI – на третьем месте после Воронежа и Онеги, а для накопления фитомассы здесь складываются наиболее благоприятные условия. Запас фитомассы в бассейне Клязьмы составляет 293.3 т/га, это самое высокое значение среди исследуемых участков. Основной вклад в формирование фитомассы вносят леса, они занимают около 39% от территории всех угодий, кроме того, по причине зарастания сельскохозяйственных угодий эти площади увеличиваются, соответственно усиливаются фотосинтетические процессы, идет накопление фитомассы в бассейне. Накоплению лесной фитомассы способствуют и благоприятные климатические условия. С 2005 по 2015 гг. продукционные возможности растительности улучшаются, что показывает индекс динамики LAI, который имеет значение больше единицы (1.14). В остальных бассейнах этот индекс ниже. Индекс динамики почвенно-продукционного потенциала немного выше единицы. Следовательно, по комплексу параметров, составляющих почвенно-продукционный потенциал и характеризующих состояние растительного покрова в бассейне Клязьмы на протяжении 10 лет (2005-2015), сложилась стабильная ситуация, и не выявляются негативные тенденции.

В бассейнах рек Мезень и Онега динамика листового индекса не отражет негативных измнений состояния растительности. Площади, занятые сельскохозяйственными угодьями, минимальные. Лесные угодья здесь преобладают в структуре землепользования, они вносят основной вклад в формирование листового индекса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оценки состояния почвенных и растительных ресурсов территории был использован показатель почвенно-продукционного потенциала, рассчитываемый по наземным и дистанционным данным, а также показатели запаса фитомассы, данные о продукции фитоценозов и структуре землепользования, листовой индекс LAI (по снимкам

Modis). Показано, что экосистемы речных бассейнов, расположенные в разных природно-климатических зонах, по-разному реагируют на изменения климатических параметров.

- 1. Максимальные среди анализируемых объектов значения почвенно-продукционного потенциала в бассейне р. Воронеж (ППП $_{\rm cp}=3.3$) соответствуют высоким показателям продуктивности фитомассы, что подтверждается и максиальными за период 2005—2015 гг. значениями LAI. Динамика листового индекса демонстирурет ухудшение состояния растительности к 2015 г.
- 2. Речные бассейны, расположенные в различных природных зонах и отличающиеся структурой земельный угодий, могут иметь одинаковый почвенно-продукционный потенциал, но который обеспечивается различными его составляющими. Самые низкие его значения отмечаются в бассейнах северных рек (Мезени, Онеги) и южной реки (Сал).

Почвенный покров бассейнов рек Мезени и Онеги одинаково беден гумусом; осадков выпадает на территории достаточно, однако значения поглощенной фотосинтетический активной радиации по сравнению с другими бассейнами наиболее высокие, следовательно, именно температурный показатель является главным фактором, ограничивающим рост почвенно-продукционного потенциала. В бассейне р. Сал, расположенном в степной зоне, отмечается неблагоприятное сочетание высокой суммы биологически активных температур и малого количества осадков, что значительно снижает продуктивность этой экосистемы.

- 3. Два речных бассейна Самары и Клязьмы, располагающиеся в разных природных зонах, имеют сходные значения показателя почвеннопродукционного потенциала, но за счет разных составляющих. В бассейне Клязьмы это высокие показатели FPAR и количество осадков, а в бассейне Самары запас гумуса и сумма биологически активных температур.
- 4. Анализ значений почвенно-продукционного потенциала не выявил значительных изменений к 2015 г. по сравнению с 2005 г. во всех исследованных бассейнах. Однако внутри этого временного промежутка в некоторых бассейнах отмечаются резкие изменения. Наиболее существенный рост показателя отмечается в бассейне р. Мезень.
- 5. Для накопления фитомассы наиболее благоприятные условия складываются в бассейне Клязьмы. С 2005 по 2015 гг. продукционные возможности растительности здесь улучшаются, на что указывает индекс динамики LAI, который имеет значение больше единицы.
- 6. При прогнозировании трансформаций различных экосистем при изменении климата необходимо анализировать динамику всех природно-

климатических параметров, поскольку различное их сочетание может приводить к неоднозначным результатам.

Полученные нами данные позволяют предположить, какой будет динамика почвенно-продукционного потенциала в условиях повышения температуры в результате возможного глобального изменения климата. Можно допустить, что в дальнейшем продукционный потенциал продолжит увеличиваться только на тех территориях, где сумма биологически активных температур была ограничивающим фактором, т.е. в бассейнах зоны смешанных лесов, где ключевым участком был бассейн р. Клязьмы.

В речных бассейнах с недостаточным количеством осадков повышение температуры приведет к снижению потенциала, что наблюдаем на анализируемом отрезке времени в речных бассейнах Самары и Воронежа. В речных бассейнах таежной зоны рост потенциала ограничен не только низкими температурами, но, прежде всего, невысоким плодородием почвы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-05-00363.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Базилевич Н.И*. Биологическая продуктивность экосистем северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
- Базилевич Н.И., Гребенщиков О.С., Тишков А.А. Географические закономерности структуры и функционирования экосистем. М.: Наука, 1986. 237 с.
- 3. *Белов А.В., Соколова Л.П.* Экологический потенциал растительности как фактор природопользования в Байкальской Сибири // География и природ. ресурсы. 2014. № 3. С. 53—60.
- Исаченко А.Г. Интенсивность функционирования и продуктивность геосистем // Известия РАН. Сер. географическая. 1990. № 5. С. 5–17.
- Карта почвенно-экологического районирования Восточно-Европейской равнины. М 1: 2500000. М., 1997.
- Королюк Т.В., Щербенко Е.В. Распознавание почвенного покрова лесостепных ландшафтов по материалам разносезонной многозональной съемки // Почвоведение. 2003. № 3. С. 275—288.
- 7. *Кренке А.Н., Пузаченко М.Ю., Пузаченко Ю.Г.* Уточнение содержания тематических карт на основе данных дистанционного зондирования // Изв. РАН. Сер. геогр. 2011. № 4. С. 86—96.
- 8. *Кузьменко Е.И., Максютов Ш., Владимиров И.Н.* Использование ландшафтной карты для оценки продуктивности геосистем южной тайги Западной Сибири // География и природ. ресурсы. 2013. № 3. С. 143—151.
- 9. *Кумачева В.Д.*, *Назаренко О.Г*. Оценка продуктивности растительности в степных агроландшафтах с

- различной антропогенной нагрузкой // Экология и биология почв: Материалы Междунар. науч. конф., Ростов-на-Дону, 21—22 апр., 2005. Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2005. С. 251—255.
- Люри Д.И. Долговременная динамика продуктивности лесостепных ландшафтов: двухсотлетняя история и прогноз // Экологические и социльноэкономические аспекты развития России в условиях глобальных изменений природной среды и климата. М.: ГЕОС, 1997. С. 43–62.
- 11. *Мишон В.М.* Река Воронеж и ее бассейн: ресурсы и водно-экологические проблемы. Воронеж: ВГУ, 2000. 294 с.
- 12. *Мищенко Н.В., Трифонова Т.А.* Оценка состояния почвенно-растительного покрова методами гео-информационного анализа. Владимир: ВлГУ, 2007. 92 с.
- Продуктивность экосистем северной Евразии [Электронный ресурс]. http://biodat.ru/db/prod/index.htm (дата обращения 20.08.2016).
- 14. Пузаченко М.Ю., Пузаченко Ю.Г., Козлов Д.Н., Федяева М.В. Картографирование мощности органогенного и гумусового горизонтов лесных почв и болот южнотаежного ландшафта (юго-запад Валдайской возвышенности) на основе трехмерной модели рельефа и дистанционной информации (Landsat-7) // Исследование Земли из космоса. 2006. № 4. С. 70-79.
- 15. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 7. Донской район / Под ред. Мордухай-Болтовского Д.Д. Л.: Гидрометеоиздат, 1964. 267 с.
- 16. Романовский М.Г., Федорова А.И., Абиссаломова О.В. Продуктивность и листовой полог нагорных дубрав южной лесостепи // Вестник ВГУ. Сер. География. Геоэкология. 2005. № 2. С. 90—97.
- 17. Смирнова Л.Г., Чендев Ю.Г., Кухарук Н.С., Нарожняя А.Г., Кухарук С.А., Смирнов Г.В. Изменение почвенного покрова в связи с короткопериодическими климатическими колебаниями // Почвоведение. 2019. № 7. С. 773—780. https://doi.org/10.1134/S0032180X19070116
- 18. *Сурин В.Г., Шубина М.А.* Мониторинг состояния природно-техногенных комплексов по космическим снимкам // Оптич. журн. 2006. № 4. С. 88—92.
- 19. *Трифонова Т.А., Мищенко Н.В.* Почвенно-продукционный потенциал экосистем речных бассейнов на основе наземных и дистанционных данных. М.: ГЕОС, 2013. 271 с.
- Трифонова Т.А., Мищенко Н.В. Оценка почвеннопродукционного потенциала речных бассейнов с использованием данных дистанционного зондирования // География и природные ресурсы. 2016. № 3. С. 17–25.
- 21. *Трифонова Т.А., Ширкин Л.А., Мищенко Н.В.* Моделирование стационарных состояний системы фитоценоз почва (на примере бассейна р. Клязьма) // Почвоведение. 2012. № 8. С. 889—898.
- 22. Уткин А.И. Биологическая продуктивность лесов (методы изучения и результаты) // Лесоведение и лесоводство. М., 1975. С. 9–189.

- 23. Федеральный портал. URL: http://protown.ru/information/hide/hide 2487.html
- 24. *Чалиев А.А.* Расчет рядов динамики. Учебные пособия по статистике. 2016. [Электронный ресурс] http://chaliev.ru/statistics/ryady-dynamiki.php
- 25. Bateni S.M., Entekhabi D., Margulis S., Castelli F., Kergoat L. Coupled estimation of surface heat fluxes and vegetation dynamics from remotely sensed land surface temperature and fraction of photosynthetically active radiation // Water Resources Research. 2014. V. 50. № 11. P. 8420–8440. https://doi.org/10.1002/2013wr014573
- 26. Dong T., Meng J., Wu B., Shang J., Liu J., Huffman T. Modified vegetation indices for estimating crop fraction of absorbed photosynthetically active radiation // Int. J. Remote Sens. 2015. V. 36. № 12. P. 3097—3113. https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1042122
- 27. Elham Davoodi, Hoda Ghasemieh, Okke Batelaan, Khodayar Abdollahi. Spatial-temporal simulation of LAI on basis of rainfall and growing degree days // Remote Sens. 2017. V. 9. № 12. P. 1–17. https://doi.org/10.3390/rs9121207
- 28. Gao Zh., Liu J., Cao M., Li K., Tao B. Impacts of landuse and climate changes on ecosystem productivity and carbon cycle in the cropping-grazing transitional zone in China // Sci. China. Series D. 2005. V. 48. № 10. P. 1479—1491.
- Hirofumi Hashimoto, Weile Wang, Cristina Milesi, Michael A. White, Sangram Ganguly, Minoru Gamo, Ryuichi Hirata, Ranga B. Myneni and Ramakrishna R. Nemani Exploring Simple Algorithms for Estimating Gross Primary Production in Forested Areas from Satellite Data //

- Remote Sens. 2012. V. 4. P. 303–326. https://doi.org/10.3390/rs4010303
- Huttich C., Herold M., Schmullius C., Egorov V., Bartalev S.A. SPOT-VGT NDVI and NDWI trends 1998—2005 as indicators of recent land cover change processes in Northern Eurasia // Proceeding of the 2nd Workshop of the EARSel SIG on Land Use and Land Cover, Bonn, 28–30 September. Bonn, 2006. P. 336–344.
- 31. Laidler G.J., Treitz P.M., Atkinson D.M. Remote sensing of arctic vegetation: relations between the NDVI, spatial resolution and vegetation cover on Boothia Peninsula, Nunavut // Arctic. 2008. V. 61. № 1. P. 1–13.
- 32. Liu Z., Wu C., Wang S., Peng D., Gonsamo A., Fang B., Yuan W. Improved modeling of gross primary production from a better representation of photosynthetic components in vegetation canopy // Agricultural and Forest Meteorology. 2017. V. 233. P. 222–234. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.12.001
- 33. *Majasalmi T., Rautiainen M., Stenberg P.* Modeled and measured FPAR in a boreal forest: validation and application of a new model // Agricultural and Forest Meteorology. 2014. V. 189–190. P. 118–124. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.01.015
- MODIS/Terra Leaf Area Index/FPAR 8-day L4 Global 1km ISIN Grid. http://edcdaac.usgs.gov/modis/ mod15a2.html
- 35. Serbin S.P., Gower S.T. Spatial and temporal validation of the modis LAI and FPAR products across a boreal forest wildfire chronosequence // Remote Sensing of Environment. 2013. V. 133. P. 71–84. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.01.022

Dynamics of Soil-Productive Potential of River Basin Ecosystems Functioning in Different Climatic Conditions Assessed Basing on Remote Sensing Data

T. A. Trifonova^{1, 2, *}, N. V. Mishchenko², and J. D. Petrosyan²

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia ²Stoletovs Vladimir State University, Vladimir, 600000 Russia *e-mail: tatrifon@mail.ru

To assess the state of soil and plant resources of the territory of several river catchments, the indicator of soil-productive potential (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation based on ground and remote data, FPAR), as well as indicators of phytomass reserve, data on phytocenosis production and land use structure, leaf index (LAI) were used. It is shown that ecosystems of river basins located in different climatic zones react ambiguously to climate change. The data obtained make it possible to forecast the dynamics of soil-productive potential in the conditions of changes in climatic characteristics such as temperature and precipitation. It is shown that the productive potential continues to grow with time only in those areas where the amount of biologically active temperatures is a limiting factor, i.e. in the basins of mixed forests zone. It is found that in river basins with limited precipitation, the temperature increase will lead to a decrease in soil productive potential.

Keywords: climate parameters, remote sensing data, leaf area index (LAI), fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FPAR), climate change

ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УЛК 631.48:902.2:504.38:902.6:561

ПОЧВЕННО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА НЕО-ЭНЕОЛИТИЧЕСКОМ ПОСЕЛЕНИИ "ОРОШАЕМОЕ" В НИЖНЕМ ПОВОЛЖЬЕ

© 2020 г. А. Ю. Овчинников^{а, *}, А. А. Выборнов^b, М. А. Кулькова^c, О. Г. Занина^a, Д. А. Лопатина^d, Н. С. Дога^b, А. И. Юдин^e, В. М. Алифанов^a

^аИнститут физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук, ул. Институтская, 2, Пущино, 142290 Россия

 b Самарский государственный социально-педагогический университет, ул. М. Горького, 65/67, Самара, 443099 Россия

^cРоссийский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Набережная реки Мойки, 48, Санкт-Петербург, 191186 Россия

^dГеологический институт РАН, Пыжевский пер., 7, Москва, 119017 Россия

^eНаучно-исследовательский центр по сохранению культурного наследия,

ул. Глебучев овраг, 492, Саратов, 410003 Россия

*e-mail: ovchinnikov_a@inbox.ru Поступила в редакцию 14.07.2019 г. После доработки 05.09.2019 г. Принята к публикации 24.09.2019 г.

Представлены результаты междисциплинарных исследований, проведенных на нео-энеолитическом археологическом поселении "Орошаемое" (возраст 5-7 тыс. лет до н. э.) Саратовская область. Изученные почвы представлены светло-каштановыми карбонатными (Eutric Cambisol (Loamic, Protocalсіс, Ochric)), в археологическом раскопе — антропогенно-преобразованным вариантом. В исследовании применяли комплекс почвенных, палеопочвенных, палеоклиматических, палеоботанических методов и метод радиоуглеродного датирования. Получена и уточнена информация о смене периодов увлажненности и аридизации территории, об этапах почвообразования и осадконакопления, о растительном покрове в голоцене на археологическом памятнике. Согласно полученным данным, в период $7245 \pm 60 \text{ BP}$ по настоящее время происходила периодическая смена аридных условий к гумидным и наоборот. В периоды аридизации на памятнике происходило медленное и кратковременное осадконакопление, что было связано с высокой скоростью выветривания и переноса (выдувания) отложений. В связи с этим мощности отложений лёссовидных суглинков (или "стерильных" горизонтов), сформировавшихся в эти периоды, небольшие по сравнению с разновременными культурными слоями. В периоды гумидизации шло интенсивное осадконакопление с процессами почвообразования. Полученные данные показали, что последние 5 тыс. лет происходит нарастание и усиление процессов гумилизации климата. Сделаны предварительные расчеты осадконакопления и почвообразования в голоцене на исследуемой территории. Интенсивность и скорость процессов осадконакопления и почвообразования на протяжении голоцена в регионе проявлялись по-разному. Скорость формирования почвы варьировала от 35 до 0.8 см/100 дет. Результаты позволили дополнить и реконструировать природно-климатические особенности этой территории. Периодическая смена экологических условий в голоцене рассматриваемого региона сказывалась на жизни племен, регулировала особенности расселения, региональные и, вероятно, глобальные миграции. Реконструкция природно-климатических особенностей археологического поселения и сравнение с литературными данными выявили неодинаковую палеогеографическую обстановку в Нижнем Поволжье. Показано, что существующая в литературе хронология и система ландшафтно-климатических изменений в голоцене для южных аридных регионов Восточно-Европейской равнины требуют уточнения и детализации.

Ключевые слова: палеопочвоведение, палеоэкология, голоцен, Eutric Cambisols (Protocalcic) **DOI:** 10.31857/S0032180X20020082

ВВЕДЕНИЕ

Для территории Нижнего Поволжья, и особенно Заволжья, стоянки неолитического и энеолитического времени недостаточно хорошо изучены [37—39]. В регионе слабо исследованы палео-

почвы, а также история развития и эволюции почв в предголоцен-голоценовое время. Актуальность исследования заключалась в применении комплексного методического подхода к изучению археологического объекта. Цель исследования состо-

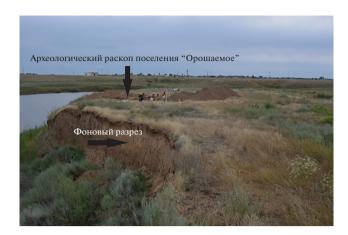


Рис. 1. Общий вид ландшафта и естественного обнажения. Стрелками-курсорами показаны: археологический раскоп поселения "Орошаемое" и фоновый разрез.

яла в выявлении связей между периодичностью изменений климата, этапов осадконакопления и почвообразования, наличием и особенностями палеопочв и/или культурных слоев в профилях почв и существовавших почвенно-экологических условий в регионе и, в связи с этим, расселения и миграций древнего человека.

Объектом исследования явилось поселение "Орошаемое" (50°09′27.45″ N, 48°31′33.81″ E), обнаруженное в 2014—2018 гг. [12—14]. Уникальность этого объекта состоит в том, что в почвах существуют археологические культурные слои (**КС**), охватывающие практически весь голоцен. В КС хранится большой объем информации не только об истории развития древнего человека, но и природной среды.

Главной особенностью объекта является то, что КС не располагаются один на другом, а прерываются горизонтами суглинка, не содержащими артефактов, поэтому они названы "стерильными". По находкам верхний КС определяется временем хвалынской энеолитической культуры. Здесь найдены немногочисленные фрагменты керамики с горизонтальными рядами скобковидных наколов и рядами гребенчатого штампа; фрагмент венчика с утолщением на внешней стороне. Каменный инвентарь представлен кварцитовыми скребками и наконечником в форме флажка. Средний КС включал находки прикаспийской культуры. В ходе работ обнаружено более 100 фрагментов керамики с характерной воротничковой формой венчика, орнаментация в виде отпечатков зубчатого штампа и прочерков. Среди обломков посуды найдены неорнаментированные фрагменты стенок сосудов и плоских днищ. Каменная коллекция представлена кварцитовыми (72%) и кремневыми (28%) изделиями. В основном присутствуют артефакты, изготовленные на крупных кварцитовых пластинах или

сколах: скребки, симметричные острия, ножи. Кроме этого, в коллекции присутствуют двусторонне обработанные наконечники стрел (из кварцита) в форме рыбки, типичные для прикаспийской культуры. Находки нижнего КС, залегающего на "материке", относятся к орловской неолитической культуре. Посуда КС представлена плоскими днищами, стенками и серией выразительных венчиков. Сосуды орнаментированы отступающими наколами треугольной формы и прочерками. Узоры состоят из горизонтальных рядов, зигзагов, сетки. Каменный инвентарь представлен пластинами с ретушью, концевыми скребками на отщепах и пластинах. Во всех трех КС были обнаружены остеологические останки. В хвалынском и прикаспийском КС найдены останки дикой лошади, тура, сайги и овцы. В орловском КС преобладают кости тура сайги и кулана, обнаружены кости домашней собаки.

Почвенные исследования проводили с использованием комплексного методического подхода. Следует отметить, что комплексное изучение археологических объектов выполняется редко, как в России, так и за рубежом [2, 16, 19–21, 33, 42–46], а необходимость в такой методологии связана с недостаточностью геологической, палеогеографической и палеопедологической информации о современных почвах и почвообразующих породах, как в Нижнем Поволжье, так и на Восточно-Европейской равнине в целом. Предлагаемый подход для этой территории применялся впервые.

Мы предполагали, что проведенные исследования позволят уточнить и реконструировать изменения разных компонентов природной среды и климата, выявить и расширить представления о закономерности этих изменений во времени и пространстве, а также дадут возможность связать изменения природной среды и развития человеческого общества в исследуемом регионе.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Изучение неоднородности свойств почв КС проводили в археологическом раскопе неолитического поселения "Орошаемое" (возраст поселения 5—7 тыс. лет до н. э.) и в фоновом разрезе за пределами раскопа (рис. 1). Поселение располагалось в 1.5 км к северу от с. Александров-Гай Саратовской области, на одном из мысов правого коренного берега р. Большой Узень. Археологический раскоп поселения (разрез 3-2017) располагался в обнажении обрывистого берега реки, в 30 м от раскопа был заложен фоновый разрез (разрез 4-2017).

Современные почвы двух разрезов представлены светло-каштановыми карбонатными (Eutric Cambisol (Loamic, Protocalcic, Ochric)), а в архео-

логическом раскопе антропогенно-преобразованными [25, 24, 47].

Для решения поставленных задач применяли комплекс методов. Почвенно-археологический метод включал в себя полевые почвенные, палеопочвенные и археологические исследования в бровках (стенках) раскопа и фоновом разрезе. Морфологический метод – изучение почвенных профилей, стратиграфии генетических и антропогенно-преобразованных горизонтов почв (КС), "стерильных" горизонтов и почвенных свойств. Методы определения физических [9, 23] и химических [1, 5, 11, 34] показателей для интерпретации свойств почв и определения их принадлежности [24, 25, 47]. Метод магнитной восприимчивости (МВ). Метод диагностики сильномагнитных кристаллических окислов железа для характеристики важнейших генетических признаков почв. На основании установленной зависимости по данным измерений МВ определяли количество атмосферных осадков в прошлые исторические и геологические эпохи [3, 4, 40, 41, 49, 50]. Измерения показателя магнитной восприимчивости проводили в лабораторных условиях на приборе Kappabridge KLY-2.

Для определения возраста артефактов (костей животных, нагара на сосудах, фрагментах керамики) и уточнения временной принадлежности КС использовали метод радиоуглеродного датирования [28, 29].

Микробиоморфный метод применяли для изучения компонентов биогенных тел: углистых частиц, панцирей диатомовых водорослей, спикул пресноводных губок, пыльцы, спор, фитолитов, растительного детрита, грибных гифов, с последующим анализом всего комплекса в целом. Обработку проб проводили по методике Гричука [15] и Маделла [48] с использованием микроскопа Carl Zeiss при увеличении в 100 и 400 раз. Высушенную легкую фракцию исследовали в сканирующем электронном микроскопе Vega 3 Tescan в режиме высокого и переменного вакуума с использованием анализаторов BSE и SE.

Использованный комплекс методов является оригинальным и для данной территории ранее не применялся.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Морфологические исследования

Исследуемая почвенная толща археологического раскопа и фонового разреза (мощность около 2—3 м) состояла из пачки переслаивающих друг друга горизонтов. В археологическом раскопе эти горизонты были представлены КС разных археологических эпох, переслаивающимися со "стерильными", в которых отсутствовали артефакты (рис. 2). В фоновом разрезе толща по стратигра-



Рис. 2. Фото стенки археологического раскопа 2018 г., разрез 3-2017, поселение "Орошаемое", глубина 3 м.

фии и морфологии была схожа с толщей в археологическом раскопе, но была сложена разновременными погребенными почвами и прерывающими их горизонтами лёссовидных суглинков.

Рассматриваемая почвенная толща из переслаивающих друг друга горизонтов (КС, погребенных почв и лёссовидных суглинков) вызвала научный интерес не только у археологов, но и почвоведов. Профили почв дали возможность идентифицировать периодичность процессов почвообразования и осадконакопления в исследуемом регионе.

Морфологическое сравнение почв археологического раскопа и фонового разреза показало, что стратиграфия профилей двух разрезов во многом схожа (табл. 1). Однако в фоновом разрезе состав почвенных горизонтов несколько меньше, горизонты имеют большую мощность по сравнению с горизонтами в археологическом раскопе, вероятно, из-за берегового склона, естественного сложения и отсутствия здесь антропогенной преобразованности в разные эпохи голоцена. В фоновом разрезе данные серые (гумусовые) горизонты отчетливо проявляются в виде погребенных голоценовых почв, а субгоризонтально расчленяют их светло-бурые или с явным буроватым оттенком горизонты лёссовидного суглинка. В археологическом раскопе темноокрашенные горизонты или КС выражены ярче по сравнению с фоновым разрезом. По нашему мнению, более темный оттенок этим горизонтам придала антропогенная преобразованность. Слоистость почвенных толщ двух разрезов показывает, что существовала повсеместная изменчивость природных условий.

Наличие в почвенной толще темноокрашенных горизонтов, вероятно, связано с гумидизацией климата на данной территории, с развитием растительности и почвообразовательными процессами.

Переслаивание серых темноокрашенных горизонтов более светлыми бурыми горизонтами,

Поселени	е "Орошаемое"	Фонс	овый разрез
горизонт	глубина, см	горизонт	глубина, см
_	_	Ad	0-4
Аст.пах.са	0-15	Аст.пах.	4–16
A1Bca	15-28	A1Bca	16–30
A1 ₁ Bca	28-50	BA1 ₁ ca	30–63
BA1 ₂ ca	50-60	BA1 ₂ ca	63-125(130)
[Al ₂]ca	60-90		
[Al ₃]ca	90-130	[A1 ₃]ca	125(130)—175
[BA1 ₄]ca	130-155	[BA1 ₄]ca	175—225
[A1 ₅ B]ca	155-180	[A1 ₅ B]ca	225—287 (дно)
[BA1 ₅]ca	180—228 (лно)	_	

Таблица 1. Состав почвенных горизонтов в профилях археологического поселения "Орошаемое" (разрез 3-2017) и фонового разреза 4-2017. Глубины разрезов приведены по состоянию на 2017 г.

наоборот, предполагает этапы осадконакопления, замедления почвообразовательных процессов, этапы аридизации. Отсутствие артефактов в данных горизонтах в археологическом раскопе предполагает, что заселение территории человеком не происходило, или население в эти этапы мигрировало на другие территории. Вероятнее всего, мигрировать население вынуждали природные катаклизмы: возможные суховеи, скудная растительность, непригодная для строительства жилищ и выпаса скота.

В разрезе археологического раскопа все КС были сформированы в голоцене, что подтверждается данными радиоуглеродного датирования и согласно глубинам: 7245 ± 60 BP (SPb-2141); 7010 ± 110 BP (SPb-2143); 6889 ± 100 BP (SPb-2090); 5934 ± 100 BP (SPb-2091); 5890 ± 120 BP (SPb-1729); 5806 ± 26 BP (UGAMS-23059); 5667 ± 100 BP (SPb-1474) (рис. 3).

Физические и физико-химические исследования

Неоднородность (слоистость) строения почвенных профилей, отражающая изменения окружающей среды, требовала подтверждения и объяснения. Для этих целей определяли физические и физико-химические свойства почв археологического раскопа и фонового разреза (табл. 2).

Гранулометрический состав почв весьма однороден. Фракция 1—0.25 мм полностью отсутствует. В обоих разрезах господствуют фракции тонкого песка и крупной пыли, содержание которых составляет 54—73%. В профиле почвы археологического раскопа чуть меньшее содержание фракции 0.25—0.05 мм по сравнению с фракцией 0.05—0.01 мм и приурочено к разновременным КС, что обусловлено усилением выветривания при почво-

образовании (антропогенная нагрузка). В "стерильных" горизонтах противоположная ситуация.

В фоновом разрезе распределение тех же фракций примерно одинаковое по всему профилю, что предполагает естественные процессы осадконакопления и почвообразования. Анализ МВ в разрезе археологического раскопа показал, что ее распределение и пики максимальных значений коррелируют с разновременными КС. В фоновом разрезе пики ярко выражены в погребенных почвах и современном гумусовом горизонте. Как видно из рис. 3, минимальные значения МВ приурочены к "стерильным" горизонтам.

Анализ физико-химических свойств почв: $C_{\text{орг}}$, CO_2 карбонатов, pH среды, содержание Ca^{2+} и Mg^{2+} — также выявил стратиграфическую изменчивость KC, "стерильных" горизонтов и погребенных почв.

По содержанию $C_{\rm opr}$ почвенные горизонты имеют различия. В профиле фонового разреза $C_{\rm opr}$ распределяется равномерно в силу естественных процессов. Максимальных значений $C_{\rm opr}$ достигает только в горизонтах Ad и Act.пах. В почвах археологического раскопа наибольшие его значения совпадают с разновременными KC, тогда как в "стерильных" горизонтах и на границах перехода к ним, значения уменьшаются. Вероятно, приуроченность больших значений $C_{\rm opr}$ именно к KC связана с дополнительным привносом органического вещества в процессе хозяйственной деятельности человека.

Распределение CO₂ карбонатов неравномерное в профилях двух почвенных разрезов. Максимальных значений содержание карбонатов достигает во время накопления нижнего "стерильного" горизонта, когда, вероятно, преобладали наиболее аридные условия в регионе. Уменьше-

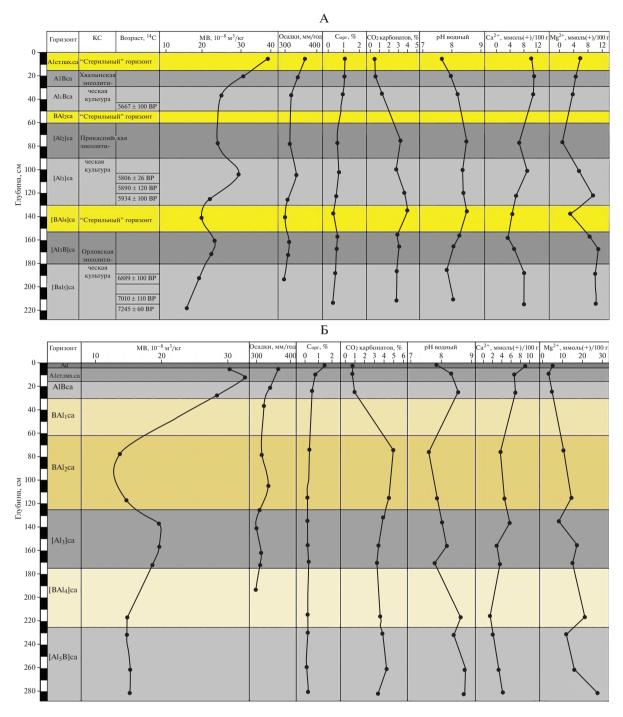


Рис. 3. Физические и физико-химические свойства почв раскопа археологического поселения "Орошаемое" (A) и фонового разреза (Б).

ние его значений указывает на нарастание гумидизации, которое, по-видимому, началось 6 тыс. лет назад. Уменьшение и низкие значения содержания карбонатов в верхней части профилей двух разрезов связано с увеличением годового количества осадков, мелиоративными мероприятиями в прошлом столетии и иллювиированием в нижележащие горизонты.

В распределении Ca²⁺ также наблюдаются некоторые особенности. В фоновом разрезе максимальные значения приходятся на погребенные почвы и современный гумусовый горизонт. В разрезе археологического раскопа максимальные значения приурочены к KC.

В распределении Mg^{2+} в фоновом разрезе картина иная, противоположная содержанию Ca^{2+} .

Таблица 2. Гранулометрический состав почв

Гомировия	Глубина, см		Содержа	ние фракции	и, %; размер o	фракции, мм		
Горизонт	1 лубина, см	1-0.25	0.25-0.05	0.05-0.01	0.01-0.005	0.005-0.001	< 0.001	<0.01
		Поселе	ние "Орошас	емое", разрез	3-2017			
Аст.пах.са	0-10	0	18	44	9	8	21	38
A1Bca	15-25	0	25	31	10	8	26	44
A1 ₁ Bca	30-40	0	23	34	9	9	25	43
[A1 ₂]ca	70-80	0	16	41	9	7	27	43
[A1 ₃]ca	95-105	0	18	39	6	11	26	43
[A1 ₃]ca	115-125	0	20	41	5	9	25	39
[BA1 ₄]ca	130-140	0	29	34	5	10	22	37
[A1 ₅ B]ca	155-160	0	13	41	7	9	30	46
[A1 ₅ B]ca	160-170	0	27	37	7	8	21	36
[BA1 ₅]ca	180-190	0	24	35	8	6	27	41
[BA1 ₅]ca	205-215	0	39	27	7	6	21	34
	ı	ļ	Фоновый ра	азрез 4-2017	Į.	•	<u>I</u>	ī
Ad	0-4	0	46	27	6	7	14	27
Аст.пах.	5—15	0	37	31	7	3	22	32
A1Bca	20-30	0	27	35	6	8	24	38
BA1 ₂ ca	70-80	0	40	27	5	6	22	33
BA1 ₂ ca	110-120	0	17	43	8	8	24	40
[A1 ₃]ca	130-140	0	21	40	6	9	24	39
[A1 ₃]ca	150-160	0	26	36	5	7	26	38
[A1 ₃]ca	165-175	0	32	31	6	6	25	37
[BA1 ₄]ca	210-220	0	36	24	6	11	23	40
[A1 ₅ B]ca	225-235	0	30	28	6	9	27	42
[A1 ₅ B]ca	255–265	0	26	29	6	10	29	45
[A1 ₅ B]ca	275—285	0	23	31	7	10	29	46

Максимальные значения ${\rm Mg}^{2+}$ соответствуют нижним частям погребенных почв и нижним частям "стерильных" горизонтов. Видимо, нестабильная обстановка окружающей среды и смена климатических условий способствовали в большей степени накоплению ${\rm Mg}^{2+}$ в почвах, или замещению магнием кальция. Аналогичная картина была неоднократно встречена на севере степной зоны при изучении археологических объектов Среднего Поволжья [31, 32].

Палеоботанические исследования

В ходе исследования с применением палеоботанических методов была реконструирована растительность в разные этапы формирования профилей. Преобладание значений содержания $C_{\rm opr}$ в КС (незначительное превышение значений по сравнению с нижележащими "стерильными" го-

ризонтами) предполагает, что на данной территории в эти периоды существовали благоприятные климатические условия, способствовавшие развитию растительности, относительно "стерильных" горизонтов. Об этом свидетельствуют КС, показывающие, что территория заселялась человеком, который мог заниматься скотоводством и строить хозяйственные постройки.

Образцы из горизонта Ad фонового разреза (глубина отбора 0—4 см), КС хвалынской (глубина отбора 40—50 см), прикаспийской (глубина отбора 95—105 см) и орловской культур (глубина отбора 155—160 см) исследованы методом микробиоморфного анализа. Для сравнения проведено исследование образца из верхней части нижнего "стерильного" горизонта (глубина отбора образца 130—140 см).

Палинологический анализ. В спектре из современного дернового горизонта фонового разреза

около половины составляет пыльца маревых, заметно содержание злаковых (15%) и полыни (16%), остальные таксоны представлены единично. В спектрах из КС хвалынской, прикаспийской и орловской культур доминирует пыльца маревых (70—90%), остальные таксоны отмечены единично. При этом относительно заметным содержанием характеризуются злаковые и сложноцветные, включая полынь (до 9%). Пыльца деревьев и кустарников (сосны, ольхи, березы) единична и относится к группе дальнего переноса, перемещаемой ветром на расстояния свыше 500 км и, скорее всего, является заносной. В пробе из нижнего "стерильного" горизонта палиноморфы обнаружены единично.

Палинологический анализ позволяет реконструировать степные ландшафты с господством маревых с незначительным участием злаковых и злаково-разнотравных ассоциаций, произраставших в условиях сухого климата. Однако не во всех в случаях доминирование пыльцы маревых свидетельствует об аридизации климата. Не исключается, что монодоминантный и резко обедненный состав растительности, реконструируемый на основе анализа данных спектров, присутствие пыльцы рудеральных растений, свидетельствуют о сильном преобразовании растительного покрова вокруг поселений человека за счет разведения скота и активной хозяйственной деятельности.

Микробиоморфный/фитолитный анализ. В образце из современного горизонта Ad фонового разреза содержание фитолитов низкое (50 ед.). Они разнообразны, выявлено 16 морфотипов. Фитолиты единичные, мелкие (20, 50 мкм). Можно заключить, что растительность низкорослая и разреженная. Возможно, почвы имели промывной режим в результате оросительных мероприятий с зоной аккумуляции ниже дернового горизонта. В образце обнаружен детрит, представленный в основном тканями злаков и остатками корней, что характерно для дернового горизонта. Присутствует много спикул губок и пресноводных диатомовых хорошей сохранности, без признаков переотложения, вероятно, из-за периодического орошения. Анализ тканей и палиноморф подтверждает участие злаков в составе растительности. Присутствие древесной растительности и мхов не выявлено, что совпадает с результатами палинологического анализа.

В разновременных КС также выделены формы фитолитов (рис. 4). Образец, отобранный из КС хвалынской культуры, содержит мелкие, размером 2—10 мкм, минеральные частицы и насыщен мелким детритом, без клеточной структуры, размером до 35 мкм. Целых фитолитов мало, большинство из них повреждено. В образце присутсвовали фитолиты сорной растительности, и, вероятно, тростника. Так как в образце фитолиты

тростника единичны, возможно, это компонент естественного растительного покрова, использование его людьми в бытовых целях сомнительно. Фитолиты культурных злаковых растений в образце этого КС не выявлены.

Образец, отобранный из КС прикаспийской культуры, состоит из минеральных частиц и бесструктурного детрита. Встречаются единичные гифы грибов. Другие растительные компоненты не обнаружены. Вероятная растительность — разнотравье (полыни, маревые, бобовые), злаковая растительность отсутствовала. Это подтверждается результатами палинологического анализа пробы, в спектре которой преобладают маревые, а содержание злаковых незначительно (3.5%).

Образец, отобранный из КС орловской культуры, представляет собой углистые частицы (крупные, размером около 50 мкм), бесструктурный детрит и лигнифицированные ткани кустарников. Минеральная масса в кутанах органического вещества. Единично встречаются гифы грибов. В образце обнаружены грибы сапротрофы. Редко встречаются удлиненные гладкие формы и фитолиты тростника. В целом, в данном образце фитолитов мало, но тростника наибольшее количество из всех изученных образцов. Образец в основном состоит из угля и остатков детрита. Вероятно, это был зольник, часть очага или кострища.

Образец, отобранный из нижнего "стерильного" горизонта, состоит из минеральных частиц и бесструктурного детрита, но они значительно крупнее по сравнению с образцами из хвалынского и прикаспийского КС. Минеральная масса сосредоточена в кутанах органического вещества. Встречаются единичные гифы грибов. Диатомовые и спикулы губок не выявлены. Единично отмечены удлиненные гладкие формы, редкие фитолиты тростника. Вероятная растительность — разнотравье, возможно, редкие злаки и тростник.

Если учесть ветровую эрозию, следы которой выявлены во внешнем облике фитолитов (сглаженность, окатанность краев), то можно предположить недалекий (1-2 км) перенос и снос материала с поверхности, и, как следствие, обедненный микробиоморфный состав. В этом случае низкое содержание фитолитов тростника можно интерпретировать, как хозяйственное использование (настил, навес).

ОБСУЖДЕНИЕ

Реконструкция растительности на поселении "Орошаемое"

Микробиоморфный анализ показал, что вся рассматриваемая почвенная толща эолового происхождения. Это подтверждается отсутствием в образцах гидроморфных форм фитолитов. В периоды формирования разновременных КС условия среды

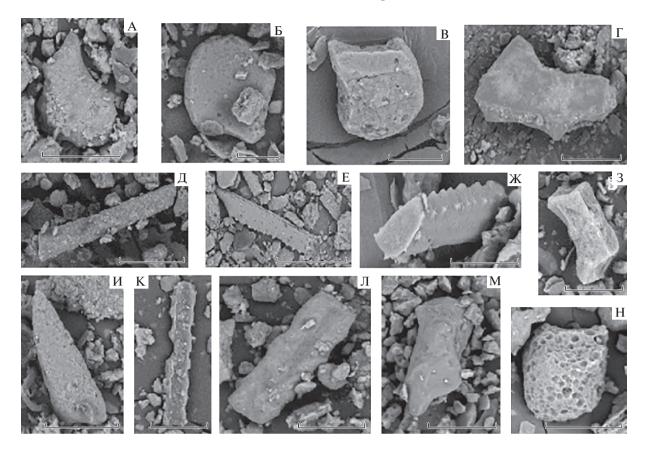


Рис. 4. Формы фитолитов, выделенные на археологическом поселении "Орошаемое". $A-\Gamma$ — формы, характерные для тростника; Д — удлиненные гладкие; Е, Ж — удлиненные иглистые; 3 — трапециевидная; И — ланцетная; К — удлиненная лопастная; Л — удлиненная с волнистым краем; М, Н — нарушенные фитолиты. Линейка 20 мкм.

были благоприятными для проживания человека на данной территории или его возвращения на прежнее местообитание. Анализ всех образцов показал, что в рассматриваемые периоды существования КС, вероятно, произрастала растительность, соотносимая с современной сухостепной зоной. По данным фитолитного анализа, основным компонентом растительности являлся произраставший по берегам водоемов тростник, что подтверждается количеством (20%) и разнообразием (4 морфотипа) форм, а по данным палинологического анализа – преобладали маревые. В основном, на протяжении голоцена, растительность сильно не менялась. Некоторое увеличение минеральной части в образце "стерильного" горизонта (глубина 130-140 см) может говорить об интенсивности осадконакопления в данный период.

Нужно отметить, что КС поселения "чистые" в отношении земледелия. На самом поселении домашние животные не содержались, вероятно, для скота существовали другие хозяйственные постройки. В то же время существовавшая растительность не позволяла пасти скот, либо быстро биогенно трансформировалась (вытаптыва-

лась). Скотоводство было периодическим, вероятно, преобладал кочевой образ жизни.

Территория поселения была закрытой или изолированной, предположительно существовали навесы. В изученных образцах присутствуют формы, характерные для тростника. Незначительное его содержание в образцах не предполагает многократного сооружения настила (циновки или устланный пол). Анализ показал отсутствие на поселении остатков жизнедеятельности домашних животных, что отчасти опровергает факт занятия скотоводством, либо загоны для скота могли располагаться вне поселения.

Представляется, что антропогенная нагрузка на территорию (сравнение с современностью) была минимальна или соотносима с современной. Скотоводство было периодическим или кочевали со скотом. По мнению Демкина с соавт. [18], в сухостепной зоне Заволжья без сложных мелиоративных мероприятий было возможно лишь экстенсивное скотоводство с круглогодичным выпасом, а циклы производственной деятельности кочевого населения (маршруты, сроки перекочевок) были обусловлены особенностями природной обстановки и видовым составом ста-

да, почвенно-растительных, геолого-геоморфологических, гидрологических условий места их расселения.

Реконструкция эволюции эколого-климатических условий на поселении "Орошаемое"

Литературный анализ показал [6–8, 21, 26, 27, 30, 33, 35, 36], что для территории Нижнего Поволжья существуют реконструкции периодичности эволюции климата и природной среды, но, на наш взгляд, они требуют дополнительной детализации и уточнения.

На поселении была выполнена реконструкция климатических условий формирования отложений методом геохимической индикации процессов осадконакопления. Собственные результаты сравнивали с имеющимися в литературе данными, основанными на палинологических и радиоуглеродных анализах [7]. Существующие материалы основаны на исследованиях, проведенных в Астраханской области на правобережье р. Волги. Исследованный ключевой участок — разрез "Соленое Займище" (47°54′ N, 46°10′ E) – располагался намного южнее и ближе к Каспийскому морю по сравнению с поселением "Орошаемое" (рис. 5). Расстояние по прямой от разреза "Соленое Займище" до разреза поселения "Орошаемое" составляет около 300 км. Интересно сравнить два участка, расположенных разных в Нижнего Поволжья, на сколько природные условия разнились или были схожими.

Локальные особенности расположения участка поселения "Орошаемое", который находится на берегу р. Б. Узень, были более благоприятными в периоды гумидных климатических обстановок. Метод геохимической индикации [28] подтвердил, что этот участок был увлажнен, защищен от ветров и являлся удобным для определенных видов хозяйственной деятельности древним человеком.

Необходимо уточнить, что преобладание в гранулометрическом составе фракций 0.25—0.05 и 0.05—0.01 мм косвенно указывает на эоловое происхождение всей почвенной толщи. Следовательно, очевидна вероятность суховеев и пыльных бурь в разные этапы голоцена. Суховеи могли заставлять человека мигрировать. Подобная закономерность процессов осадконакопления и почвообразования отмечена при изучении песчаных почв на разновременных археологических памятниках южных районов Волго-Уральского междуречья [21].

В периоды аридизации на памятнике происходило медленное и кратковременное осадконакопление, что было связано с высокой скоростью выветривания и переноса (выдувания) отложений. В связи с этим мощности отложений лёссовидных суглинков (или "стерильных" горизонтов), сфор-



Рис. 5. Местоположение разрезов обозначено маркерами "Соленое Займище" (Астраханская область) и "Орошаемое" (Саратовская область), Нижнее Поволжье.

мировавшихся в эти периоды, небольшие по сравнению с разновременными культурными слоями.

Итак, формирование нижней погребенной почвы (горизонт [А15В]са, рис. 4) и нижнего КС (горизонт [BA1₅]са) продолжалось, согласно радиоуглеродным датам, с 7245 \pm 60 до 6889 \pm 100 BP, что совпадает с финальной стадией периода АТ-1 голоцена и началом стадии АТ-2, регрессивной стадией развития Каспийского моря. В данное время климатические условия в регионе были теплыми и относительно сухими [6-8, 10], что также совпадает с нашими данными по изменению количества осадков. Формирование наиболее гумусированного горизонта [А15В]са орловского КС происходило, видимо, уже в начале стадии периода АТ-2 голоцена (второй главный климатический оптимум). В это время климат был влажный и теплый с интенсивными почвообразовательными процессами и относительно развитой растительностью, что также подтверждается нашими данными. Основной пик гумидизации климата и существования благоприятных условий среды произошел после 6889 ± 100 BP, что совпадает с периодом АТ-2. Об этом свидетельствуют показатели МВ, измерения выпадения осадков, содержания Сорг. Палеоботанический анализ подтвердил преобладание фитолитов тростника в образцах, а их внешний вид говорит о их произрастании на данной территории или о недалеком (1-2 км)переносе.

В интервале от 6889 ± 100 до 5934 ± 100 ВР происходила смена климата в сторону аридизации, затухали почвообразовательные процессы и активизировались процессы осадконакопления. В это время происходит завершение формирования орловского КС и погребение его вышележащим "стерильным" горизонтом, вплоть до 5934 ± 100 BP. В этот период происходит сокращение количества годовых осадков, резко уменьшается величина MB почв, содержание $C_{\rm opr}$ и некоторых физикохимических показателей. Вероятно, происходила смена от гумидизации к аридизации. Время формирования стерильного горизонта полностью соотносится со стадией периода АТ-2 голоцена [7, 30]. Согласно данным Болиховской [7], по озерным отложениям Соленого Займища в это время в Нижнем Поволжье существовал влажный и теплый климат, способствующий произрастанию степных и лесных сообществ. Однако наши данные показывают, что для исследуемой территории Нижнего Заволжья климатические условия были несколько другими. В это время затухали почвообразовательные процессы и активизировалось осадконакопление. То есть изменение уровня Каспийского моря по-разному проявлялось на территориях Нижнего Поволжья. В это время начинает формироваться следующий Прикаспийский КС и следующая погребенная почва (в фоновом разрезе). Таким образом, сформированный "стерильный" горизонт разрывает два культурных слоя (орловский и прикаспийский). Данный горизонт буроватого оттенка по сравнению с выше- и нижележащими КС не содержит артефактов. В нем уменьшается значение МВ, содержания C_{opr} , Ca^{2+} и Mg^{2+} . Однако количество карбонатов возрастает, что может говорить о засушливости климата.

Согласно стратиграфии профиля, следующий интервал зафиксирован от 5934 ± 100 до $5806 \pm$ ± 26 BP. В это время начинает формироваться прикаспийский КС, и по многим физическим и физико-химическим показателям фиксируется увеличение значений МВ, количества осадков, содержания Сорг и других параметров, тогда как содержание СО₂ карбонатов несколько уменьшается. Этот интервал коррелирует с окончанием АТ-2 и началом SB-1 голоцена [7], когда происходит переход к аридизации и похолоданию. На территории поселения "Орошаемое" продолжали существовать гумидные условия с интенсивным почвообразованием, которые несколько отличались от условий Соленого Займища. Возможно, опубликованные Н.С. Болиховской данные требуют хронологической корреляции и уточнения. По Нейштадт [30] данный временной интервал отмечен как АТ-3, но для изучаемой территории он не очевиден, и не приведен в хронологии Болиховской.

Следующий интервал перехода от начала формирования Прикаспийской культуры к началу формирования хвалынской культуры и зафиксирован в интервале $5806 \pm 26...5667 \pm 100$ ВР. Стратиграфия профиля показывает, что эти два КС, также прерывает "стерильный" горизонт. Судя

по физическим и физико-химическим показателям, переход и изменение природных условий началось гораздо раньше, еще при формировании прикаспийского КС, и эти показатели в "стерильном" горизонте становятся минимальными. Наши материалы и литературные данные показывают, что этот временной интервал следует уточнить и по хронологии, возможно, соотнести его с этапом SB-1, когда на территории Нижнего Поволжья начинается похолодание климата, и процессы почвообразования сменяются процессами осадконакопления. По Нейштадт [30] и Хотинскому [35] данный период обозначен как АТ-3, что предполагает благоприятную эколого-климатическую обстановку. По данным Климанова [26, 271 для данной территории в период АТ-3 было характерно увеличение осадков на 50-100 мм по сравнению с современностью, согласно нашим данным, увеличение осадков не происходило. Присутствующий в разрезе стерильный горизонт, разрывающий прикаспийский и хвалынский КС, идентифицирует условия среды как неблагоприятные для развития интенсивных почвообразовательных процессов. Очевидно, необходимо уточнение временной границы периодов AT-2 и SB-1 для рассматриваемой территории.

Согласно полученным данным, последние 5 тыс. лет происходило нарастание и усиление процессов гумидизации климата. Анализ литературных данных [17, 18] по почвам курганов I—IV вв. н. э. в Нижнем Поволжье и Заволжье демонстрирует относительно стабильную почвенно-ландшафтную обстановку, нарастающую увлажненность климата в исследуемом регионе к современности, что коррелирует с нашими данными. По данным Хотинского [35] такая тенденция на Русской равнине не прослеживается. По нашему мнению, при палеоэкологических реконструкциях необходимо учитывать особенности развития территорий.

Согласно литературным данным [17], основанным на расчетах магнитных свойств почв, в конце IV — первой четверти III тыс. до н. э. климат в регионе был несколько засушливее современного. На рубеж III—II тыс. до н. э. приходилась наименьшая среднегодовая норма атмосферных осадков. І в н. э. характеризовался гумидизацией климата, которая во II—III вв. н. э. сменилась очередным аридным периодом, а затем в IV в н. э. — вновь этапом повышенной увлажненности. Согласно нашим материалам, тренд гумидизации климата по направлению к современности требует дополнительной детализации.

Ивановым с соавт. [22] по самарскому региону в голоцене выявлено увеличение гумусового горизонта в интервале времени 4.5—1.5 тыс. лет со скоростью 1 см/100 лет. В настоящей работе мы попытались восстановить скорости осадконакопления и гумусообразования, основываясь

стратиграфией профилей и радиоуглеродном датировании КС. Интенсивность и скорость пропессов осалконакопления и почвообразования на протяжении голоцена в регионе проявлялись по-разному. В период $7245 \pm 60...5934 \pm 100$ BP формирование почвы происходило со скоростью примерно 6-7 см/100 лет. В период $5934 \pm$ $\pm 100...5667 \pm 100 \; \mathrm{BP} - \mathrm{co}$ скоростью примерно 29-35 см/100 лет. В период 5667 ± 100 BP — по настоящее время со скоростью около 0.8 см/100 лет. Сравнивая настоящие материалы с данными по Самарскому Поволжью, можно сказать, что за последние 5-5.5 тыс. лет увеличение мощности гумусовых горизонтов в Нижнем и Среднем Поволжье было примерно одинаковым. На этих территориях существовали стабильные почвенно-экологические процессы. В интервале 5.5-6 тыс. лет назад, вероятно, преобладали процессы осадконакопления и несколько затухающими почвообразовательными процессами. В интервале 6—7.5 тыс. лет назад существовали примерно равные по интенсивности процессы осадконакопления и почвообразования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реконструкция природно-климатических особенностей на нео-энеолитическом археологическом поселении "Орошаемое" и сравнение с данными литературы показали, что в разных районах Нижнего Поволжья на протяжении всего голоцена существовала неоднородная палеогеографическая обстановка.

Изучение светло-каштановых карбонатных (Eutric Cambisol (Loamic, Protocalcic, Ochric)) и светло-каштановых карбонатных антропогеннопреобразованных почв и всей почвенной толщи выявило периодичность в изменении климата, этапах осадконакопления (вероятно, эолового происхождения) и почвообразования (наличие палеопочв и/или КС).

Для изученной территории получена и уточнена информация о смене периодов увлажненности и аридизации территории, об этапах почвообразования и осадконакопления, о растительном покрове в голоцене. Сделаны предварительные расчеты осадконакопления и почвообразования в голоцене на исследуемой территории. Результаты позволили дополнить и реконструировать природно-климатические особенности рассматриваемой территории.

Периодическая смена экологических условий в голоцене рассматриваемого региона, несомненно, сказывалась на жизни племен, регулируя особенности расселения, региональные и, вероятно, глобальные миграции.

Существующая в литературе хронология и система ландшафтно-климатических изменений в

голоцене южных аридных регионов Восточно-Европейской равнины, в частности Нижнего Поволжья, требуют уточнения и детализации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках Госзадания № 0191-2019-0046. Аналитические работы и снимки фитолитов выполнены на электронном микроскопе в ЦКП ИФХиБПП РАН в рамках Госзадания № АААА-А18-118013190181-6. Палинологический анализ выполнен в рамках Госзадания ГИН РАН № АААА-А18-118021690155-7. Экспедиционные и лабораторные исследования осуществляли при финансовой поддержке РФФИ (проекты: № 17-04-00078 A, 19-29-05178 мк).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Агрохимические методы исследования почв. М., 1965. 436 с.
- 2. Александровский А.Л. Культурный слой: генезис, география, систематика, палеоэкологическое значение // Матер. междисциплинарной науч. конф. "Археология и естественные науки в изучении культурного слоя объектов археологического наследия". М.: Товарищество научных изданий КМК, 2018. С. 7–16.
- 3. *Алексеев А.О., Алексеева Т.В., Махер Б.А.* Магнитные свойства и минералогия соединений железа степных почв // Почвоведение. 2003. № 1. С. 62–74.
- 4. Алексеев А.О., Демкин В.А., Алексеева Т.В. Использование минералогических и петрофизических параметров состояния соединений железа в палеопочвах археологических памятников для реконструкции климатических условий степей Восточной Европы // Нижневолжский археологический вестник, 2000. Вып. 3. С. 240—251.
- 5. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 487 с.
- 6. Болиховская Н.С. Палиноиндикация изменения ландшафтов Нижнего Поволжья в последние десять тысяч лет // Вопросы геологии и геоморфологии Каспийского моря. М.: Наука, 1990. С. 52–68.
- 7. *Болиховская Н.С.* Эволюция климата и ландшафтов Нижнего Поволжья в голоцене // Вестник Моск. ун-та. 2011. Сер. 5. География. № 2. С. 13—27.
- Болиховская Н.С., Касимов Н.С. Ландшафтно-климатические изменения на территории Нижней Волги в последние 10 тысяч лет // Проблемы палеогеографии и стратиграфии плейстоцена. Вып. 2. М., 2008. С. 99—117.
- 9. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М.: Высшая школа, 1973. 399 с.
- 10. Варущенко С.И., Варущенко А.Н., Клиге Р.К. Изменение режима Каспийского моря и бессточных водоемов в палеовремени. М.: Наука, 1987. 239 с.

- 11. Воробьева Л.А., Ладонин Д.В., Лопухина О.В., Рудакова Т.А., Кирюшин А.В. Химический анализ почв. Вопросы и ответы. М., 2012. 186 с.
- 12. Выборнов А.А., Юдин А.И., Васильева И.Н., Косинцев П.А., Кулькова М.А., Гослар Т., Дога Н.С. Новые данные по неолиту-энеолиту Нижнего Поволжья // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17. № 3. С. 235—241.
- 13. Выборнов А.А., Юдин А.И., Васильева И.Н., Косинцев П.А., Кулькова М.А., Дога Н.С., Попов А.С. Исследования поселения Орошаемое в Нижнем Поволжье // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 3. С. 140—145.
- 14. Выборнов А.А., Юдин А.И., Васильева И.Н., Косинцев П.А., Кулькова М.А., Дога Н.С., Попов А.С. Новые материалы исследований на поселении Орошаемое в Нижнем Поволжье // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. Т. 19. № 3. С. 185—190.
- Пыльцевой анализ / Под ред. Криштофович А.Н. М.: Госгеолиздат, 1950. 571 с.
- 16. *Демкин В.А.* Палеопочвоведение и археология: интеграция в изучении истории природы и общества. Пущино, 1997. 213 с.
- 17. Демкин В.А., Демкина Т.С., Алексеев А.О., Хомутова Т.Э., Золотарева Б.Н., Каширская Н.Н., Удальцов С.Н., Алексеева Т.В., Борисов А.В., Демкина Е.В., Журавлев А.Н. Палеопочвы и климат степей Нижнего Поволжья в I—IV вв. н. э. Пущино, 2009. 96 с.
- 18. Демкин В.А., Лукашов А.В., Приходько В.Е. Развитие почв сухостепного Заволжья в голоцене и особенности освоения территории с древнейшего времени до наших дней // Эволюция и возраст почв СССР. Сб. научн. тр. Пущино, 1986. С. 192—208.
- Демкина Т.С., Борисов А.В. Продуцирование СО₂ образцами подкурганных палеопочв степной зоны эпох относительной аридизации и климатического оптимума // Почвоведение. 2018. № 8. С. 943—951.
- Иванов И.В., Александровский А.Л., Макеев А.О. и др. Эволюция почв и почвенного покрова. Теория, разнообразие природной эволюции и антропогенных трансформаций почв. М.: ГЕОС, 2015. 925 с.
- 21. *Иванов И.В., Васильев И.Б.* Человек, природа и почвы Рын-песков Волго-Уральского междуречья в голоцене. М.: Интеллект, 1995. 264 с.
- 22. Иванов И.В., Луковская Т.С. Изменения экологических условий Самарской области в голоцене // Раннесарматская культура: формирование, развитие, хронология: Матер. IV междунар. конф. "Проблемы сарматской археологии и истории". Вып. 1. Самара, 2000. С. 60—70.
- Качинский Н.А. Методы механического и микроагрегатного анализа почвы. М.: Изд-во АН СССР, 1943. 45 с.
- Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 224 с.
- Климанов В.А. Климат малого климатического оптимума на территории Северной Евразии // ДАН. 1994. Т. 335. № 2. С. 232—236.

- 27. *Климанов В.А.* Особенности изменения климата Северной Евразии в позднем плейстоцене и голоцене // Бюл. МОИП. Отд. Геологии. 1994. Т. 69. Вып. 1. С. 58–62.
- 28. *Кулькова М.А.* Методы прикладных палеоландшафтных геохимических исследований: учеб. пособие. СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2012. 152 с.
- 29. *Кулькова М.А.* Радиоуглерод (¹⁴С) в окружающей среде и метод радиоуглеродного датирования: учебно-методическое пособие. СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2011. 40 с.
- 30. *Нейштадт М.И.* К вопросу о некоторых понятиях в разделении голоцена // Известия АН СССР. Сер. Географическая. 1983. Вып. 2. С. 103—108.
- 31. *Овчинников А.Ю.*, *Андреев К.М.* Почвенно-археологическая характеристика поселения Калмыковка I в Самарском Поволжье // Самарский научный вестник. 2018. Т. 7. № 3(24). С. 208–214.
- 32. Овчинников А.Ю., Лопатина Д.А., Андреев К.М., Занина О.Г., Андреева О.В., Бурыгин М.А. Почвенноархеологическая характеристика поселения Кочкари I в Самарском Поволжье // Известия Самарского научного центра РАН. 2018. Т. 20. № 3(2). С. 461–466.
- 33. Палеопочвы как индикаторы эволюции биосферы. М.: НИА Природа, 2007. 282 с.
- 34. Теория и практика химического анализа почв. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
- 35. *Хотинский Н.А*. Взаимоотношение леса и степи по данным изучения палеогеографии голоцена // Эволюция и возраст почв СССР. Пущино, 1986. С. 46—53.
- Хотинский Н.А. Климат и человек в голоцене аридных и гумидных зон Северной Евразии // Аральский кризис. М., 1991. С. 48–66.
- Юдин А.И. Варфоломеевская стоянка и неолит степного Поволжья. Саратов: Изд-во СГУ, 2004. 200 с.
- 38. *Юдин А.И.* Стоянка Кумыска и энеолит степного Поволжья. Саратов: Изд-во СГУ, 2012. 212 с.
- 39. Юдин А.И., Выборнов А.А., Васильева И.Н., Косинцев П.А., Кулькова М.А., Гослар Т., Филиппсен Б., Барацков А.В. Неолитическая стоянка Алгай в Нижнем Поволжье // Самарский научный вестник. 2016. № 3(16). С. 61–68.
- 40. Alekseev A.O., Alekseeva T.V., Kalinin P.I., Borisov A.V., Hajnos M., Sokolowska Z. Modifications of the mineralogical composition and surface properties of soils as related to steppe climate dynamics in historical time // Eurasian Soil Science. 2008. V. 41. № 13. P. 1424—1432. https://doi.org/10.1134/S106422930813011
- 41. Alekseeva T., Alekseev A., Maher B.A., Demkin V. Late Holocene climate reconstructions for the Russian steppe, based on mineralogical and magnetic properties of buried palaeosols // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2007. V. 249. P. 103–127. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.01.006
- 42. Bennett N.J., Blythe J., Tyler S., Ban N.C. Communities and change in the anthropocene: understanding social-ecological vulnerability and planning adaptations to multiple interacting exposures // Regional Environ-

- mental Change. 2016. V. 16. № 4. P. 907–926. https://doi.org/10.1007/s10113-015-0839-5
- 43. Hoffecker J.F., Holliday V.T., Anikovich M.V., Sinitsyn A.A., Popov V.V., Sinitsyn S.N., Levkovskaya G.M., Pospelova G.A., Forman S.I., Giaccio B. From the Bay of Naples to the River Don: the Campanian Ignimbrite eruption and the Middle to Upper Paleolithic transition of Eastern Europe // J. Human Evolution. 2008. V. 55. P. 858–870. https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2008.08.018
- 44. Holliday V.T., Hoffecker J.F., Goldberg P., Macphail R.I., Forman S.L., Anikovich M.V., Sinitsyn A.A. Geoarchaeology of the Kostenki-Borshchevo sites, Don River, Russia // Geoarchaeol. 2007. V. 22. P. 181–228. https://doi.org/10.1002/gea.20163
- 45. *Horák J., Klir T.* Pedogenesis, pedochemistry and the functional structure of the waldhufendorf field system of the deserted medieval village spindelbach, the Czech Republic // Interdisciplinaria Archaeologica Natural Sciences in Archaeology. 2017. V. 8. P. 43–57. https://doi.org/10.24916/iansa.2017.1.4
- Innes J.B., Blackford J.J., Rowley-Conwy P.A. Late Mesolithic and early Neolithic forest disturbance: a high res-

- olution palaeoecological test of human impact hypotheses // Quaternary Sci. Rev. 2013. V. 77. P. 80–100. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.07.012
- 47. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Update 2015. FAO, Rome, 2015. 192 p.
- 48. *Madella M., Alexandre A., Ball T.* International code for phytolith Nomenclature 1.0. // Annals of Botany. 2005. V. 96. P. 253–260. https://doi.org/10.1093/aob/mci172
- 49. Maher B.A., Alekseev A.O., Alekseeva T. Climate dependence of soil magnetism across the Russian steppe: significance for use of soil magnetism as a palaeoclimatic proxy // Quaternary Sci. Rev. 2002. V. 21. P. 1571–1576. https://doi.org/10.1016/S0277-3791(02)00022-7
- 50. *Maher B.A.*, *Alekseev A.*, *Alekseeva T.* Magnetic mineralogy of soils across the Russian steppe: climatic dependence of pedogenic magnetite formation // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2003. V. 201. № 3–4. P. 321–341. https://doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00618-7

Soil-Ecological Conditions on Neo-Eneolithic Settlement "Oroshaemoe" in the Lower Volga Region

A. Yu. Ovchinnikov^{1, *}, A. A. Vybornov², M. A. Kulkova³, O. G. Zanina¹, D. A. Lopatina⁴, N. S. Doga², A. I. Yudin⁵, and V. M. Alifanov¹

¹Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences, Puschino, 142290 Russia

²Samara State University of Social Sciences and Education, Samara, 443099 Russia

³Herzen State Pedagogical University of Russia, St. Petersburg, 191186 Russia

⁴Geological Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

⁵Research Center for the Preservation of Cultural Heritage, Saratov, 410003 Russia

*e-mail: ovchinnikov a@inbox.ru

The results of interdisciplinary research conducted at the neo-Eneolithic archaeological settlement "Oroshaemoe" (age 5–7 000 years BC) in Saratov oblast are presented. The studied soils are Eutric Cambisols (Loamic, Protocalcic, Ochric), in archaeological excavation — ones with artifacts. The study used a set of soil, paleopedological, paleoclimatic, paleobotanical methods, and radiocarbon dating. The data on changes in the periods of humidization and aridization of the territory, stages of soil formation and sedimentation, on the vegetation cover in the Holocene at the archaeological monument were obtained and refined. Preliminary calculations of sedimentation and soil formation in the Holocene in the study area were carried out. The obtained results allowed supplementing and reconstructing the climatic features of the area. Periodic changes in environmental conditions in the Holocene affected the life of the tribes, regulated the features of settlement, regional and possibly global migrations. Reconstruction of natural and climatic features of the archaeological settlement and comparison with published data revealed the uneven paleogeographic situation in the Lower Volga region. It is shown that chronology and system of landscape and climatic changes during the Holocene as presented in the publications for the southern arid regions of the East European plain needs to be revised and made more detailed.

Keywords: paleopedology, paleoecology, Holocene, Eutric Cambisol (Protocalcic)

——— **ХИМИЯ ПОЧВ** ——

УЛК 631.48

ОЦЕНКА КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВ С МЕДЬЮ МЕТОДОМ АФФИННОЙ ХРОМАТОГРАФИИ

© 2020 г. А. А. Дымов^a, *, Е. Ю. Милановский^{b, c}

^aИнститут биологии Коми научного центра УрО РАН, ул. Коммунистическая, 28, Сыктывкар, 167982 Россия
^bМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия
^cПочвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, Москва, 119017 Россия
*e-mail: aadymov@gmail.com

Поступила в редакцию 17.05.2019 г. После доработки 13.06.2019 г. Принята к публикации 20.09.2019 г.

Аффинная хроматография с иммобилизированными ионами металлов (ІМАС-хроматография) использована для фракционирования органических соединений шелочного экстракта из десных почв Республики Коми по критерию их способности образовывать комплексные соединения с ионами меди. На основе подбора условий разделения предложен алгоритм хроматографического фракционирования веществ на группы молекулярно гомогенных соединений, основанный на последовательном изменении рН и ионной силы элюента. Показано, что соединения щелочного экстракта содержат три фракции, компоненты которых различаются способностью образовывать комплексные соединения с медью. Установлено, что гумусовые вещества подзолов (Albic Podzol), подзолистых (Glossic Retisol) и торфянисто-подзолисто-глееватых почв (Histic Retisol) различаются по относительному содержанию лигандообразующих органических соединений. Максимальное содержание (по Сорг) комплексонов меди, характерно для органического вещества лесных подстилок рассматриваемых почв (14-21 г/кг). Соответствующие значения содержания органического вещества элювиальных горизонтах составляют 0.5–1.5 г/кг. Наиболее высокое содержание соединений углерода, способных связывать ионы меди, характерно для подзолистых почв, в то время как компоненты органического вещества из подзолов и торфянисто-подзолисто-глееватых почв характеризуются несколько меньшей аффинностью к меди. Представленный алгоритм может быть использован для оценки устойчивости почв к загрязнению тяжелыми металлами.

Ключевые слова: лесные почвы, почвенное органическое вещество, методы фракционирования **DOI:** 10.31857/S0032180X20020045

ВВЕДЕНИЕ

Почвы являются мощнейшим геохимическим барьером для загрязняющих компонентов. Одними из приоритетных загрязнителей служат тяжелые металлы (ТМ). Поступление поллютантов в окружающую среду связано с различными типами антропогенной деятельности [13, 19]. От свойств почв зависит дальнейшая судьба загрязнителей — аккумуляция в почве, либо миграция в геохимически подчиненные ландшафты и водоемы. Лидирующую роль в закреплении ТМ играет почвенное органическое вещество [1, 3, 7, 16, 30]. В настоящее время механизмы аккумуляции и миграции тяжелых металлов в почвах и геохимически сопряженных ландшафтах в основном исследованы методами потенциометрического титрования (рН-эффект) и ионообменного равновесия [15]. Показано существенное влияние форм нахождения тяжелых металлов в почвах на их современное состояние [9, 14]. Разработка хроматографических

методов, позволяющих проводить фракционирование органических соединений по критерию их комплексообразующей способности, позволяет существенно расширить понимание механизмов природной химической дифференциации профиля, аккумуляции и миграции загрязняющих компонентов для дальнейшего регулирования и нормирования их содержания.

Развитие инструментальных возможностей аналитической химии определяет постепенное переосмысление роли и функций, индивидуальных органических соединений и групп, обладающих близкими функциональными свойствами. Одним из перспективных методов изучения функциональных свойств органического вещества является металл-аффинная хроматография [11, 25].

Термин "лиганоднообменная хроматография" был введен в 1961 г. в коротком сообщении Гельфериха [24]. Концепция металл-аффинной хроматографии (IMAX immobilized-metal affinity chroma-

A Araposa
$$O-CH_2-CH-CH_2-O-CH-CH_2-N$$
 CH_2-COOH C

Рис. 1. Структура геля агарозы быстрого потока (А) и схема взаимодействия (зарядки) колонки с ионами меди (Б).

tography) сформулирована и опубликована Поратом [31]. В данном подходе используется свойство биологических макромолекул связываться с иммобилизованными на хроматографической матрице ионами металлов, таких как Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Со²⁺, Fe²⁺. Специфическое связывание осуществляется за счет наличия на поверхности молекул свободных электронодонорных групп. В условиях ІМАХ (нейтральные значения рН и высокие концентрации соли) в качестве потенциальных лигандов в органической молекуле могут выступать имидазольная группа гистидина (рК ~ 6.7), тиольная группа цистеина (рК ~ 8.5) и индольная группа триптофана (рК ~ 9.41). В таких взаимодействиях могут принимать участие С-концевые аминокислоты (рК ~ 7.7), а также остатки аспарагиновой и глютаминовой кислот (рК ~ 3.9). По прочности образуемых комплексов аминокислоты располагаются в ряд: His, Cys > Asp, Glu \gg другие аминокислоты. Взаимодействие между сорбентом и аналитом рН-зависимое. В связи с этим связанные вещества можно элюировать, уменьшая ионную силу буфера, изменяя рН, или использовать другие хелатирующие агенты (ЭДТА и др.) [20, 21, 31].

В настоящее время IMAC-хроматографию используют при проведении предварительной обработки образцов для обнаружения наркотиков [10], для оценки комплексообразующих свойств органических соединений морских вод [27], фракционирования и очистки белков и аминокислот при биохимических исследованиях [2, 8, 18, 32]. В последние десятилетия в международных журналах появились первые публикации использования металл-аффинной хроматографии при оценке комплексообразующих свойств смесей органических соединений водных объектов, гумусовых веществ (ГВ) и экстрактов из почв [23, 25, 28, 29].

Цель работы — оценка возможностей аффинной хроматографии с иммобилизованными металлами для изучения комплексообразующих

свойств органического вещества лесных почв Европейского Севера.

В задачи исследования входило: оценить возможности аффинной хроматографии с иммобилизованными ионами металлов для идентификации комплексообразующих органических соединений в составе лабильного почвенного органического вещества; охарактеризовать особенности молекулярно гомогенных фракций органического вещества с использованием индивидуальных органических соединений с различными ионогенными группами; выявить особенности комплексообразующих свойств ГВ преобладающих почв таежной зоны методом IMAC-хроматографии.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования были верхние генетические горизонты типичных почв Республики Коми: І — подзол иллювиально-железистый развивающийся на песчаных отложениях под сосняком лишайниковым, средняя тайга [22]; ІІ — подзолистая почва, развивающаяся на покровных суглинках под ельником кустарничковым, средняя тайга, Южный Тиман [5]; ІІІ — торфянисто-подзолистоглееватая почва, формирующаяся на моренных суглинках, под ельником чернично-сфагновым в северной тайге Приполярного Урала [4].

ГВ экстрагировали из почв 0.1 моль/дм³ NaOH при соотношении почва : раствор 1:10 в течение 20-24 ч. Экстракт ГВ очищали от минеральных примесей центрифугированием ($10\,000$ об./мин, 20 мин). К 0.5 см³ супернатанта добавляли 1.0 см³ стартового раствора (0.02 моль/дм³ фосфатный буфер с 0.5 моль/дм³ NaCl, pH 7.0).

Хроматографическое фракционирование ГВ проводили на геле агарозы (рис. 1) с ковалентно-сшитыми хелатными группами (IMAC Sepharose 6 FF, GE Healhtcare) на колонке 1 × 10 см (Віо-Rad). Динамическая связывающая емкость геля —



Рис. 2. Внешний вид колонки с IMAC-Sepharose 6FF до (A) и после (Б) "зарядки" катионами меди.

25 мг (Cu^{2+})/см³ геля [26]. Реакцию комплексообразования можно представить в виде схемы (рис. 1Б).

Для иммобилизации ионов меди на хроматографической матрице через колонку 1×10 см (Bio-Rad) с гелем IMAC Sepharose 6 FF прокачивали при помощи перистальтического насоса (Econopump) $10 \text{ см}^3 0.5 \text{ моль/дм}^3$ раствора CuSO₄. Равномерная голубая окраска геля позволяла визуально контролировать качественное состояние колонки (рис. 2).

Для удаления ионов меди, не прореагировавших с гелем, колонку промывали 40 см³ дистиллированной воды и 20 см³ стартового буфера (0.02 моль/дм³ фосфатный буфер с 0.5 моль/дм³ NaCl, pH 7.0). Повышение ионной силы буфера за счет NaCl минимизирует неспецифические ионные взаимодействия гумусовых веществ с аффинной матрицей. Разделение проводили на хроматографической системе BioLogic LP (USA). Детектирование оптической плотности при 280 нм. Скорость подачи элюэнтов — 2 см³/мин.

В колонку, уравновешенную стартовым раствором, вводили 440 мкл раствора ГВ. Компоненты пробы, не вступающие в реакцию взаимодействия с ионами меди, элюируются в составе первой хроматографической фракции. Ослабление

аффинных взаимодействий органических соединений с матрицей геля осуществляли понижением рН элюента. Фракцию 2 слабосвязанных органических соединений элюировали раствором $0.05\,$ моль/дм³ ацетатного буфера с $0.5\,$ моль/дм³ NaCl (pH 4). Фракцию 3 (прочносвязанные органические соединения) элюировали раствором $0.2\,$ моль/дм³ NaOH с $0.5\,$ моль/дм³ NaCl (pH 12). После завершения фракционирования ионы меди Cu^{2+} удаляли с колонки $0.2\,$ моль/дм³ раствором ЭДТА.

Для регенерации гель переносили на воронку Бюхнера и промывали последовательно 15-20 мл: дистиллированная вода, 25% пропанол \rightarrow 50% пропанол $\to 100\%$ пропанол $\to 100\%$ бутанол $\to 50\%$ пропанол $\rightarrow 25\%$ пропанол \rightarrow дистиллированная вода. Регенерированный гель загружали в хроматографическую колонку и насыщали ионами меди. Все используемые растворы фильтровали через мембранные фильтры с размером пор 0.22 мкм, на установках Millipor, дегазировали и контролировали значения рН. В качестве стандартов использовали ряд индивидуальных соединений: глицин (0.5 моль/дм^3) , щавелевую кислоту (0.5 моль/дм^3) , гистидин солянокислый (0.1 моль/дм^3) , аспарагиновую кислоту (0.1 моль/дм³), фенилаланин (0.1 моль/дм³) и др. Интегрирование и вычисление площадей хроматографических фракций осуществляли в программе Мультихром 2.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Подробные описания морфологических и физико-химических свойств почв опубликованы ранее [4, 5, 22]. В табл. 1 приведены наиболее общие физико-химические свойства исследуемых почв. Для рассматриваемых почв характерны близкие физико-химические свойства. Почвы кислые – значения рН водных вытяжек изменяются от 3.3 в органогенном горизонте торфянисто-подзолисто-глееватой почвы до 4.3 в подстилке подзола. Для почв характерна низкая степень насыщенности основаниями. В органогенных горизонтах характерно накопление грубогумусированного органического вещества. При этом органическое вещество подзолистых и торфянисто-подзолисто-глееватых почв в большей степени обогащено азотом по сравнению с иллювиально-железистыми подзолами. Содержание соединений углерода, извлекаемых децинормальным раствором щелочи, изменяется от 67–102 г/кг почвы в органогенных горизонтах до 1.3-4.5 г/кг почвы в минеральных горизонтах. Доля щелочнорастворимых соединений от $C_{\text{обш}}$ составляет 17—25% в подстилках и 18.4—32.5% в верхних минеральных горизонтах. Максимальная доля $C_{\text{шел}}$ (относительно $C_{\text{общ}}$) характерна для горизонтов с морфологическими признаками миграции органического вещества в торфянисто-подзолисто-глееватой почве. Со-

	Глубина,	р	Н	Нг*		нные юны	V**	Собщ	N _{общ}	C		С _{щел} , %
Горизонт	СМ				Ca ²⁺	Mg ²⁺				$\frac{C}{N}$	С _{щел} , %	$\frac{C_{opr}}{C_{opr}}$
		H ₂ O	KCl	смо	оль (экв))/кг		%				
					Под	зол (I)						
O(H)	1-3	4.3	3.3	45.9	8.8	1.4	18	43.7	0.69	54	7.48	17.1
E	3-13	4.2	3.3	3.6	0.3	0.1	10	0.87	0.02	37	0.16	18.4
	•			•	Подзол	истая (I	I)	•		•	•	
O(H)	6–8	4.0	2.9	73.7	11.4	3.0	16	35.8	1.58	26	6.67	18.6
EL	8-11	3.9	2.9	14.9	0.6	0.3	6	2.2	0.15	17	0.45	20.4
		•	Top	фянист	о-подзо	листо-г.	лееватая	ı (III)	•	•	•	•
O(H)	7—13	3.3	4.2	82.5	2.1	1.2	4	40.2	1.56	29	10.2	25.4
ELhi,g	13-30	3.8	5.0	7.8	0.3	0.1	5	0.4	0.03	15	0.13	32.5

Таблица 1. Физико-химические и химические свойства исследуемых почв

гласно ранее проведенным исследованиям [6], запасы углерода в рассматриваемых почвах на глубину 1 м составляют, кг/м²: 2.9 для подзолов; 9.2 для подзолистых почв; 12.1 для торфянистоподзолисто-глееватых почв. Несмотря на принадлежность к бореальным лесам, рассматриваемые почвы имеют ряд различий по условиям формирования, аккумуляции и разложения органического вещества. В качестве опорных были выбраны по два горизонта (нижняя часть подстилки и верхний минеральный горизонт), поскольку в большинстве случаев именно они подвергаются наиболее интенсивному воздействию при химическом загрязнении.

Методическая работа по выбору алгоритма фракционирования носила поисковый характер. Использовали различные комбинации условий фракционирования ГВ щелочного экстракта на молекулярно гомогенные фракции, в основе которых лежали приемы, используемые в лиганднообменной хроматографии белков:

- лигандный обмен при помощи гистидина, имидазола, хлорида аммония, или другими веществами, образующими более устойчивые комплексы с ионами металла (т.е. имеющими сродство к хелатированным ионам металла);
- разрушение хелатных соединений сильным хелатирующим агентом (ЭДТА), приводящее к освобождению соединений и десорбции металла;
- градиент рН элюента (линейный или ступенчатый), обеспечивающий протонирование донорных групп ГВ.

Для сложных смесей, которыми являются щелочные экстракты ГВ, в случае первых двух вариантах фракционирования наблюдалась низкая воспроизводимость и неоднозначность интерпретации

результатов. Вероятно, подходы с лигандным обменом и разрушением хелатных соединений ЭТДА применимы к более однородным по молекулярному составу смесям и требуют предварительной очистки и удаления низкомолекулярных органических соединений.

Высокую воспроизводимость результатов показал вариант разделения ГВ с градиентом рН: 10 мин буфер 1-0.02 моль/дм³ фосфатный буфер с 0.5 моль/дм³ NaCl, рН 7; 15 мин буфер 2 -0.05 моль/дм³ ацетатный буфер с 0.5 моль/дм³ NaCl, рН 4; 20 мин буфер 3-0.2 моль/дм³ NaOH с 0.5 моль/дм³ NaCl, рН 12. Примеры хроматограмм приведены на рис. 3 и 4.

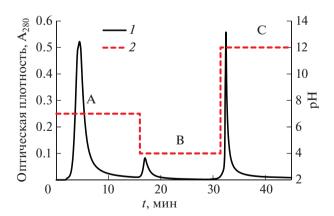


Рис. 3. Условия IMAC фракционирования 0.1 моль/дм³ NaOH экстракта ГВ: I — оптическая плотность, 2 — pH элюента; A — 0.02 моль/дм³ фосфатный буфер с 0.5 моль/дм³ NaCl, pH 7; B — 0.05 моль/дм³ ацетатный буфер с 0.5 моль/дм³ NaCl, pH 4; C — 0.2 моль/дм³ NaOH с 0.5 моль/дм³ NaCl, pH 12.

^{*} Гидролитическая кислотность.

^{**} Степень насыщенности основаниями.

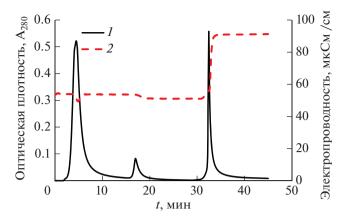


Рис. 4. Зависимость сигнала детекторов от времени: оптическая плотность (I), электропроводность (2) элюата.

С помощью выбранного алгоритма проведено фракционирование щелочнорастворимого органического вещества исследуемых почв (рис. 5) и выполнена оценка относительной доли отдельных фракций (табл. 2). Предложенный алгоритм позволил разделить ГВ на три молекулярно гомогенные фракции по их способности вступать во взаимодействия с ионами меди. По содержанию относительной доли было установлено, что ми-

нимальной способностью связывать ионы меди в органогенном горизонте характеризовалась торфяно-подзолисто-глееватая почва, а максимальной — подзолистая почва. Для минеральных горизонтов, наибольшая доля органических соединений, вступающих в реакцию с ионами меди, выявлена для ГВ торфянисто-подзолисто-глееватой почвы, минимальная — для подзолистой почвы.

Оценка содержания отдельных фракций с учетом содержания углерода в щелочной вытяжке и относительного содержания хроматографических фракций приведена в табл. 3. Среди органогенных горизонтов минимальным содержанием второй и третьей фракций характеризовался под-30л - 14.4 г/кг почвы, близкие значения получены для подстилки торфянисто-подзолисто-глееватой почвы. Содержание углерода связаных и прочносвязанных соединений в подзолистой почве составляет 21 г/кг почвы, при минимальном содержании углерода, извлекаемого щелочной вытяжкой. На первый взгляд комплексообразующая способность компонентов ГВ из минеральных горизонтов существенно меньше. Максимальное содержание соединений второй и третьей фракции выявлено для подзолистой почвы, в то время как для подзола и торфянисто-подзолисто-глееватой почвы оно в 2-3 раза меньше. Отчасти это связано с меньшим количеством органического углерода в

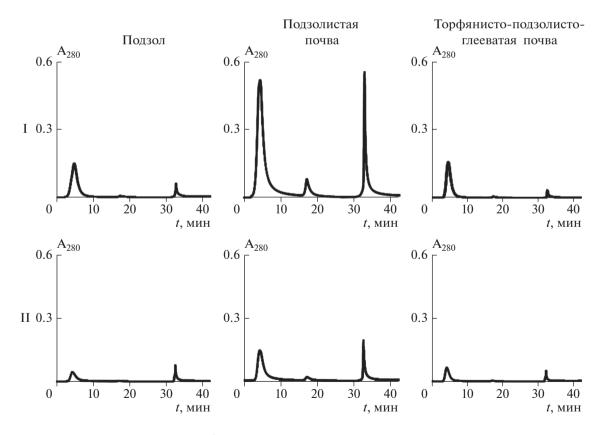


Рис. 5. Хроматограммы 0.1 моль/дм³ NaOH экстракта Γ В из I- подстилки, II- элювиального горизонта.

32.5

40

Хроматографическая фракция* Тип почв Сумма 2-3 3 Подстилка 3.2 ± 0.4 16 ± 5 81 ± 6 19.2 Π 68.7 ± 0.9 5.6 ± 0.6 25.8 ± 1.4 31.4 Ш 86 ± 3 4.4 ± 0.9 10.0 ± 2.4 14.4 Элювиальный горизонт Ι 60.8 ± 3.0 3.0 ± 0.9 39.3 36.3 ± 2.0

Таблица 2. Относительное содержание фракций в составе $0.1 \text{ моль/дм}^3 \text{ NaOH}$ экстракта органогенного и минерального горизонтов (среднее из трех измерений), %

Примечание. Здесь и в табл. 3: I — слабосвязанные органические соединения; 2 — связанные органические соединения; 3 — прочносвязанные с ионами меди органические соединения; почвы: I — подзол иллювиально-железистый; II — подзолистая; III — торфянисто-подзолисто-глееватая.

 5.5 ± 0.5

 10 ± 4

Таблица 3. Содержание углерода в составе 0.1 моль/дм³ NaOH экстракта и хроматографических фракциях, г/кг

Тип почв	C	Хрома	Сумма 2–3		
тип почв	$C_{0.1 \mathrm{NaOH}}$	1	2	3	Сумма 2—3
		Подс	тилка		
I	75	60.8	2.4	12.0	14.4
II	67	46.0	3.8	17.3	21.0
III	102	87.7	4.5	10.2	14.7
		Элювиальн	ый горизонт		!
I	1.6	1.0	0.0	0.6	0.6
II	4.5	3.0	0.2	1.2	1.5
III	1.3	0.8	0.1	0.4	0.5

Примечание. Допущения при расчете: все органические соединения щелочного экстракта элюируются с колонки, поглощают при $\lambda = 280$ нм, не различаются по коэффициентам экстинкции.

горизонте. С другой стороны, необходимо учитывать, что в составе щелочного экстракта из элювиальных горизонтов подзолов до 50% ГВ находится в составе устойчивых комплексных соединений с железом и алюминием [6, 12], не способных вступать во взаимодействия с иммобилизованной матрицей геля.

 65.9 ± 3.5

 60 ± 7

Π

Ш

Для возможной аппроксимации результатов на свойства почв в табл. 4 представлены константы устойчивости (рКа) с ионами меди индивидуальных соединений с различными функциональными группами. Исходя из полученных хроматограмм и приведенных логарифмов констант устойчивости, можно предположить, что в первый хроматографический пик попадают вещества, которые либо не вступают во взаимодействие с ионами меди на поверхности геля, либо слабо взаимодействуют с иммобилизованным на матрице лигандом. Вследствие чего они элюируются во время прохождения через систему стартового буфера. Диапазон значе-

ний рКа индивидуальных соединений, которые элюировались со временем удерживания, попадающим в значения интервала первой фракции, составляет рКа 4.4-8.6 (табл. 3). При этом индивидуальные соединения, попадающие в первую фракцию, несколько отличаются по времени удерживания (рис. 6). Можно предположить, что в первый пик входят вещества со свойствами, схожими с щавелевой, аспарагиновой кислотами и глицином. В эту фракцию преимущественно входят низкомолекулярные соединения с амино- (-NH₂) и карбоксильными (-СООН) функциональными группами. Время элюирования фракций органических соединений, которые не вступали во взаимодействие с ионами меди, соответствовало времени элюирования модельных веществ.

 27 ± 3

 30 ± 3

Вторая хроматографическая фракция содержит органические соединения, связанные с медью, элюирование которых с колонки происходит в присутствии ацетатного буфера с низким рН. Диа-

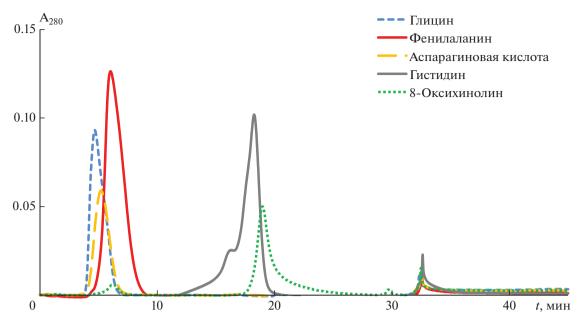


Рис. 6. IMAC-хроматограммы индивидуальных органических соединений по используемому в работе алгоритму фракционирования.

пазон значений логарифмов констант устойчивости таких индивидуальных соединений можно оценить от 8.6 до 10.2 (рис. 7). Время элюирования вто-

рой фракции ГВ щелочного экстракта из почвы также совпадает со временем элюирования индивидуальных веществ: гистидина солянокислого и

Таблица 4. Органические вещества, используемые в работе, и их константа устойчивости, при рН 7 и 25°С (по [17])

Вещество	Структурная формула	рКа комплексных соединений с ионами меди	Время элюирования, мин
ЭДТА	HOOCCH ₂ CH ₂ COONa NaOOCCH ₂ CH ₂ COOH	18.8 15.5 16.5	-
8-Оксихинолин	OH OH	12.2 23.4	19.0 32.5
Гистидин солянокислый	N—C—CH—COOH·HCl·H ₂ O HC CH NH ₂ N H	10.2 18.3	18.2 32.6
Аспарагиновая кислота	HOOC—CH ₂ —CH—COOH NH ₂	8.6 15.4	5.3 32.4
Фенилаланин	CH ₂ —CH—COOH	8.3 14.7	6.0 32.5
Глицин	H ₂ N-CH ₂ -COOH	8.1 15.2	4.5 32.3
Щавелевая кислота	НООС—СООН	4.4	4.4

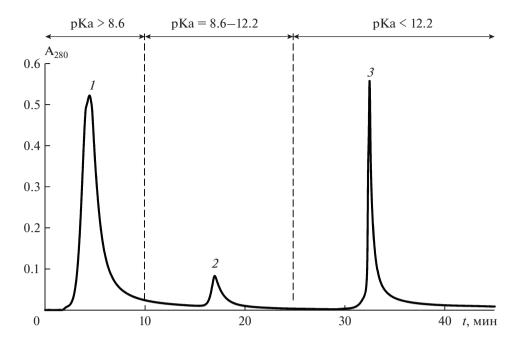


Рис. 7. IMAC-хроматограмма 0.1 моль/дм³ NaOH экстракта из подстилки подзолистой почвы: 1 — слабосвязанные органические соединения, 2 — связанные органические соединения, 3 — прочносвязанные с ионами меди органические соединения.

8-оксихинолина. Возможно, в этой фракции присутствуют соединения, содержащие N-гетероциклические ароматические структуры.

На основании времени элюирования пика 8оксихинолина, можно предположить, что диапазон значений рКа органических соединений прочносвязанных с ионами меди составляет более 12.2. Учитывая, что катионы меди полностью элюируются с колонки раствором 0.2 моль/дм³ ЭДТА, верхний предел их константы устойчивости, вероятно, ограничен 18. На основании исследования хроматографического поведения индивидуальных органических соединений можно предположить, что по комплексообразующим характеристикам (схожесть ионогенных групп) они аналогичны ГВ почв. Третий пик на хроматограммах модельных соединений связан со вторыми константами устойчивости, которые описаны для большинства исследуемых индивидуальных веществ. Вероятно, именно соединения, входящие в третью фракцию, играют наиболее существенную роль в длительной стабилизации катионов меди. Возможно, это наиболее сложные молекулярные структуры, содержащие в основе как ароматические структуры, так и карбоксильные группы. Можно предположить, что компоненты данной фракции представлены наиболее высокомолекулярными специфичными для почв биополимерами.

По сравнению с модельными органическими веществами хроматограммы образцов почвенного раствора демонстрировали более широкие пи-

ки, что указывает на смешанный состав близкородственных лигандов с очень схожим сродством к мели.

Необходимо отметить, что градация соединений, входящих в отдельные фракции, с логарифмами констант устойчивости (рКа) является условной, поскольку в зависимости от значений рН и электропроводности числовые значения констант могут несколько изменяться. Ранее проведенные работы [28] показали, что рКа соединений металлов с индивидуальными веществами имеют незначительное влияние на удерживающую способность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опробованы различные приемы разделения гумусовых веществ на молекулярно гомогенные фракции по сродству к взаимодействию с ионами меди. Наиболее эффективным приемом IMAC признано последовательное изменение рН элюента, приводящее к протонированию донорных групп. Предложенный алгоритм разделения щелочного экстракта ГВ позволяет выделить три фракции ГВ, компоненты которых различаются по способности связывать ионы меди (слабосвязанные органические соединения; связанные органические соединения). На основании использования индивидуальных веществ с известными функциональными группа-

ми и значениями pKa с ионами меди выявлено, что в первую фракцию ГВ попадают низкомолекулярные соединения не связывающие ионы меди, а также характеризуемые низкими показателями pKa (до 8.6), обусловленными низкомолекулярными соединениями с амино- и карбоксильными функциональными группами, во вторую фракцию — соединения, содержащие N-гетероциклические ароматические структуры. К третьей фракции прочносвязанных органических соединений отнесены наиболее высокомолекулярные соединения с pKa > 12.2.

По данному алгоритму фракционирования проанализированы ГВ подстилок и элювиальных горизонтов подзолов иллювиально-железистых, подзолистых почв и торфянисто-подзолисто-глееватых. Количественная оценка вклада углерода отдельных фракций показала, что наибольшей способностью связывать ионы меди, обладают ГВ подзолистой почвы. Опробованный вариант фракционирования может быть использован для оценки устойчивости почв к загрязнению тяжелыми металлами.

БЛАГОЛАРНОСТЬ

Авторы благодарят А.С. Половникову за техническую помощь при выполнении анализов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Безносиков В.А., Лодыгин Е.Д., Чуков С.Н.* Ландшафтно-геохимическая оценка фонового содержания тяжелых металлов в почвах таежной зоны // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 3. Биология. 2010. № 2. С. 114-128.
- 2. Даванков В.А., Навратил Дж., Уолтон Х. Лиганднообменная хроматография: пер. с англ. М.: Мир, 1990. 294 с.
- 3. Дымов А.А., Лаптева Е.М., Калашников А.В., Денева С.В. Фоновое содержание тяжелых металлов, мышьяка и углеводородов в почвах Большеземельской тундры // Теоретическая и прикладная экология. 2010. № 4. С. 43—48.
- 4. Дымов А.А., Жангуров Е.В., Старцев В.В. Почвы северной части Приполярного Урала: морфология, физико-химические свойства, запасы углерода и азота // Почвоведение. 2013. № 5. С. 507—516.
- Дымов А.А., Милановский Е.Ю. Изменение органического вещества таежных почв в процессе естественного лесовозобновления растительности после рубок (средняя тайга Республики Коми) // Почвоведение. 2014. № 1. С. 39–47.
- 6. Дымов А.А. Почвы послерубочных, постпирогенных ипостагрогенных лесных экосистем северо-востока европейской части России. Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М., 2018. 48 с.

- 7. *Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях: пер. с англ. М.: Мир, 1989. 439 с.
- 8. *Кельциева О.А., Гладилович В.Д., Подольская Е.П.* Металл-аффинная хроматография. Основы и применение // Научное приборостроение. 2013. Т. 23. № 1. С. 74—85.
- 9. *Ладонин Д.В.* Соединения тяжелых металлов в почвах проблемы и методы изучения // Почвоведение. 2002. № 6. С. 682–692.
- 10. Луговской А.А., Яковлева А.С., Щербаков А.В. Синтез сорбента для металл-хелатной аффинной хроматографии и его применение для выделения рекомбинантных белков // Труды федерального центра охраны здоровья животных. 2007. Т. 5. С. 248—255.
- 11. *Милановский Е.Ю*. Амфифильные компоненты гумусовых веществ почв // Почвоведение. 2000. № 6. С. 706—7015.
- 12. *Милановский Е.Ю*. Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно-гидрофильные соединения. М.: ГЕОС, 2009. 186 с.
- 13. Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Назаренко О.Г., Крыщенко В.С., Манджиева С.С. Формы соединений тяжелых металлов в почвах степной зоны // Почвоведение. 2008. № 7. С. 810—818.
- 14. *Орлов Д.С.*, *Минько О.И.*, *Демин В.В.*, *Сальников В.Г.*, *Измайлова Н.Б.* О природе и механизмах образования металл-гумусовых комплексов // Почвоведение. 1988. № 9. С. 43—52.
- 15. Пинский Д.Л. Ионообменные процессы в почвах. Пущино: Ин-т почвоведения и фотосинтеза РАН, 1997. 166 с.
- Семенов В.М., Когут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
- 17. Справочник биохимика: пер. с англ. М.: Мир, 1991. 544 с.
- Andersson L., Porath J. Isolation of phosphoproteins by immobilized metal (Fe³⁺) affinity chromatography // Analytical Biochemistry 1986. V. 154. P. 250–254.
- 19. Bauer T., Pinskii D., Minkina T., Nevidomskaya D., Mandzhieva S., Chaplygin V., Popileshko Y. Time effect on the stabilization of technogenic copper compounds in solid phases of Haplic Chernozem // Sci. Total Environ. 2018. V. 626. P. 1100—1107. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.134
- 20. Block H., Maertens B., Spriestersbach A., Brinker N., Kubicek J., Fabis R., Labhan J, Schäfer F. Immobilized-metal affinity chromatography (IMAC): a review // Methods Enzymol. 2009. V. 463. P. 439–473. https://doi.org/10.1016/j.pep.2007.09.019
- 21. *Cheung R.C.F., Wong J.H., Ng T.B.* Immobilized metal ion affinity chromatography: a review on its applications // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2012. V. 96. P. 1411–1420. https://doi.org/10.1007/s00253-012-4507-0
- 22. *Dymov A.A.*, *Gabov D.N*. Pyrogenic alterations of Podzols at the North-East European part of Russia: morphology, carbon pools, PAH content // Geoderma. 2015. V. 241–242. P. 230–237. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.11.021
- 23. Halko R., Neurocny T., Huttai M. Utilization of immobilized aluminium(III) metall ion affinity chromatog-

- raphy for analysis of humic acids // Polish J. Soil Sci. 2009. V. XLII/2. P. 149–157.
- 24. Helfferich F.T. Ligand exchange: A novel separation technique // Nature. 1961. V. 189. P. 1001–1002. https://doi.org/10.1038/1891001a0
- Hutta M., Gora R., Halko R., Chalanyova M. Some theoretical and practical aspects in separation of humic substances by combined liquid chromatography methods // J. Chromatography A. 2011. V. 1218. P. 8946– 8957. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2011.06.107
- Instruction 28-4046-21 AD affinity media IMAC Sepharose TM 6 Fast Flow. 22 p.
- 27. Nixon R.L., Ross A.R. Evaluation of Immobilized Metal-Ion Affinity Chromatography and Electrospray Ionization Tandem Mass Spectrometry for Recovery and Identification of Copper(II)-Binding Ligands in Seawater Using the Model Ligand 8-Hydroxyquinoline // Frontiers in Marine Science. 2016. V. 3.246. https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00246

- 28. *Paunovic I.*, *Schulin R.*, *Nowack B.* Fractionation of dissolved organic carbon from solution with immobilized metal ion affinity chromatography // European J. Soil Sci. 2008. № 4. V. 59. P. 198–207. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2007.00975.x
- 29. *Paunovic I., Schulin R., Nowack B.* Evaluation of immobilized metal-ion affinity chromatography for the fractionation of natural Cu complexing ligands // J. Chromatography A. 2005. V. 1100. P. 176–184. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2005.09.055
- Piccolo A. The Supramolecular Structure of Humic Substances: a Novel Understanding of Humus Chemistry and Implications in Soil Science // Adv. Agronomy. 2002. V. 75. P. 57–134. https://doi.org/10.1097/00010694-200111000-00007
- 31. *Porath J., Carlsson J., Olsson I., Belfrage G.* Metal chelate affinity chromatography a new approach to protein fractionation // Nature. 1975. V. 258. P. 598–599. https://doi.org/10.1038/258598a0
- 32. Protein purification: Principles, High Resolution Methods, and Application / Eds. Janson J.Ch., Ryden L. N.Y., 1998. 695 p.

IMAC-Chromatography Use to Asses the Complex-Forming Properties of Soil Organic Matter (with the Example of Copper Ions)

A. A. Dymov^{1, *} and E. Yu. Milanovskii^{2, 3}

¹Institute of Biology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, 167982 Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

³Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia

*e-mail: aadymov@gmail.com

Affinity chromatography with immobilized metal ions (IMAC chromatography) was used to fractionate organic compounds of an alkaline extract from forest soils of Komi Republic by their ability to form complex compounds with Cu^{2+} . Based on the selection of separation conditions, an algorithm for chromatographic fractionation of substances into groups of molecularly homogeneous compounds is proposed, based on a sequential change in pH and ionic strength of the eluent. The compounds of the alkaline extract are shown to contain three fractions, which components differ in their ability to form complex compounds with Cu^{2+} . It was established that humus substances of Albic Podzol, Glossic Retisol and Histic Retisol differ in the relative content of ligand-forming organic compounds. The maximum content (by Corg) of copper complexones is recorded in the organic matter of forest litters of soils studied (14–21 g/kg). The corresponding OM values of the eluvial horizons are 0.5-1.5 g/kg. The highest content of carbon compounds capable of binding copper ions is characteristic of Glossic Retisol, while the components of organic matter from Albic Podzol and Histic Retisol are characterized by somewhat lower affinity for copper. The presented algorithm can be used to assess soil vulnerability to heavy metal pollution.

Keywords: forest soils, soil organic matter, SOM fractionation methods

—— ХИМИЯ ПОЧВ ——

УЛК 631.417

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ УГЛЕРОДА И ПОЛИАРЕНЫ В ПЕДОГЕННОМ МАТЕРИАЛЕ ЛЕДЯНЫХ ЖИЛ БАТАГАЙСКОЙ ЕДОМЫ (ЯКУТИЯ)

© 2020 г. Ю. К. Васильчук^{а, *}, А. Д. Белик^а, Н. А. Буданцева^а, А. Н. Геннадиев^а, Дж. Ю. Васильчук^а

^aМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия *e-mail: vasilch_geo@mail.ru
Поступила в редакцию 21.08.2019 г.
После доработки 10.09.2019 г.
Принята к публикации 27.09.2019 г.

Исследованы изотопный состав углерода и содержание полициклических ароматических углеводородов в педогенном материале включений из повторно-жильных льдов Батагайской едомы (Якутия). Определены концентрации 11 полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), в сумме равные в среднем 170 нг/г (минимум 7 нг/г, максимум 430 нг/г), и величины δ^{13} С почвенных липидов, равные в среднем -29% (минимум -31.1%, максимум -26.2%). Доминирующими полиаренами в составе ассоциаций являются фенантрен и гомологи нафталина, в следовых количествах содержатся тяжелые ПАУ, в том числе бенз(а)пирен, рассматривающийся как индикатор пирогенных процессов. Содержание ПАУ и величины δ^{13} С в ледяных жилах обнаруживают тренд уменьшения с глубиной. Указанные величины δ^{13} С и содержание ПАУ указывают на почвенное происхождение включенного материала в толще повторно-жильных льдов. Сделано заключение о том, что одними из источников ПАУ были растительные остатки и природные пожары. Показано, что выявленный тренд изменения содержаний полиаренов с глубиной может быть связан со сменой ландшафтов в позднеплейстоценовое время.

Ключевые слова: едомные толщи, ледяные комплексы, полициклические ароматические углеводороды, изотопы углерода, позднеплейстоценовые ландшафты, подбуры, Entic Podzols

DOI: 10.31857/S0032180X20020148

ВВЕДЕНИЕ

Сочетание изотопного анализа углерода различных фракций органического вещества с анализом других маркеров - один из методов выявления генезиса отложений разного возраста, а также установления источников поступления органического материала в различные природные среды [41]. Такой подход применялся для почв [22, 32, 33], донных отложений [48], береговых отложений [26], органических остатков растений [34], а также для ледяных жил [43, 44]. В работе Ширрмайстера с соавт. [44] с помощью изотопного состава органического углерода в сочетании с данными о льдистости и содержании различных органических соединений были определены источники поступления органического вещества в ледяную жилу, а именно склоновые, эоловые и флювиальные отложения.

Работа по изотопному составу углерода и липидным биомаркерам была проведена Санчес-Гарсиа с соавт. [43] в едомном комплексе в районе дельты Лены. Было установлено, что изотопный состав углерода варьирует от —25 до —27‰

при небольшом утяжелении его с возрастом. Авторы считают, что изотопное утяжеление с возрастом связано с процессами эрозии и эпизодами оттаивания почв. Аналогичные значения $\delta^{13}C$ (от -24 до -27%) были выявлены Гуо с соавт. [26] для береговых отложений побережья моря Лаптевых. Вонк с соавт. при исследовании донных отложений устья р. Колыма описаны практически такие же значения $\delta^{13}C$ (от -23.9 до -27.3%) [50]. В названных объектах такие величины связывают с преобладанием терригенного материала, поскольку эти значения $\delta^{13}C$ соответствуют изотопному составу наземных растений.

Использование полиаренов (полициклических ароматических углеводородов, **ПАУ**) в качестве маркеров основано на их широком распространении и различном генезисе в окружающей среде. ПАУ принято разделять на петрогенные, пирогенные и биогенные [14]. Они образуются в результате природных пожаров [30, 53], могут являться нативным компонентом горных пород [7] и почв [12], поступают из многочисленных антропогенных источников: выхлопов автотранспорта,

выбросов предприятий электроэнергетики и металлургии, в которых используется органическое топливо и др. [21].

По некоторым данным, в процессе трансформации растительных остатков также могут образовываться ПАУ [13, 28, 48, 51, 53]. Ровинский с соавт. [13] приводят примеры образования ПАУ из биогенных стероидов, некоторых органических кислот, а также в процессе почвообразования. В обзоре источников ПАУ Стоянидис и Лане [47] в качестве биогенных ПАУ называют фенантрен, нафталин, ретен и перилен. Схема образования фенантрена из абиетиновой кислоты растений предложена Габовым с соавт. [1]. Согласно этой схеме, в молекулах абиетиновой кислоты, содержащихся в смоле хвойных деревьев, происходит дегидратация, затем идет окисление и декарбоксилирование промежуточных продуктов, в результате чего образуется фенантрен как наиболее устойчивый элемент из продуктов деградации молекулы.

По особенностям строения молекулы и составу ассоциаций ПАУ можно устанавливать характер их источника. На этом основано применение индикаторных соотношений различных ПАУ и их изомеров [14, 15]. Еще более информативно изучение комбинации изотопного анализа органического углерода с анализом содержания ПАУ для определения источников вещества в различных средах и процессов, происходящих в этих соединениях с течением времени [18, 24, 25, 29, 36, 52].

Исследования по реконструкции палеообстановок с помощью изотопного состава органического углерода и ПАУ в качестве биомаркеров описаны Лю с соавт. [35], которые в своем исследовании использовали эти показатели для описания распространения лесов и лесных почв в девонский период в Северной Америке. Индикация была проведена на основе выявления маркеров природных пожаров — пирена, бенз(а)пирена, а также ПАУ индикаторов древесных смол и древесины (ретена и перилена).

Почти во всех поверхностных отложениях и почвах присутствуют пирогенные ПАУ, привнесенные или из атмосферы, или с поверхностным смывом. Во многих природных объектах Арктики большая часть ПАУ биогенного и педогенного происхождения, техногенный компонент представлен в небольшом количестве. Это показали Тан с соавт. [48] на примере озера Шрэдер на Аляске, где состав ассоциаций ПАУ озерных отложений сильно отличался от состава ассоциаций загрязненных образцов других территорий и содержал значительно больше биогенных компонентов.

В криолитозоне ПАУ исследованы в различных средах. В почвах береговой зоны Карского моря (криоземах и литоземах) [17] состав ассоци-

аций ПАУ использовался для подтверждения антропогенного влияния на эти удаленные районы. В донных отложениях индикационные исследования ПАУ проводились с целью установления источников поступления вещества в Обской губе, Байдарацкой губе и Енисейском заливе [23]. В результате обнаружен значительный привнос пирогенных ПАУ, приносимых с почвенными частицами. Исследование ПАУ в буграх пучения и торфяниках проведено Габовым с соавт. [2—5, 10], которые развили концепцию биомаркеров в отношении ПАУ и предприняли попытку связать содержание отдельных ПАУ с конкретными растительными видами.

Целью работы является определение величин δ^{13} С, а также состава полиаренов в педогенном материале, включенном в ледяные жилы, и оценка возможности выявления по этим данным тенденций ландшафтной трансформации в позднем плейстоцене. В задачи входило определение значений δ^{13} С, содержания органического углерода, а также состава и содержания Π AУ.

Повторно-жильные льды, анализируемые в настоящем исследовании, имеют позднеплейстоценовый возраст [19, 39, 40, 49], то есть наиболее вероятными источниками ПАУ во льду может быть вещество почв, растительный детрит, а также органическое вещество осадочных пород. Структура ассоциаций ПАУ в ледяных отложениях в сочетании с изотопным составом липидной фракции органических включений может служить специфической характеристикой процессов, происходивших во время формирования повторно-жильных льдов.

Мощные ледяные жилы в едомных толщах обычно формируются в результате многократного повторного морозобойного растрескивания и затекания талой снеговой воды в трещину. Источниками поступления ПАУ в ледяные жилы по морозобойным трещинам могут являться:

- почвенные частицы и растительный детрит, принесенные ветром на поверхность снега, таяние которого обеспечивает образование элементарных жилок в морозобойных трещинах;
- почвенные частицы и растительный детрит,
 принесенные склоновыми процессами и текучими водами с наклоненных поверхностей;
- атмосферные аэрозоли, оседающие в зимний период на поверхности снега, и также содержащие почвенные частицы;
- вмещающая жилы порода (только в контактной зоне и в незначительной степени).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В данном исследовании изучали изотопный состав углерода почвенных липидов и концентрации ПАУ из включений педогенного материала в сингенетических повторно-жильных льдах, вскры-

вающихся в Батагайском овраге (67°34′49″ с.ш., 134°46′19″ в.д.). Овраг расположен в 10 км юго-восточнее пос. Батагай, в Верхоянском улусе, Республики Якутия (Саха). Высота его поверхности над уровнем моря около 325 м, овраг приурочен к северо-восточному склону горного повышения.

Климат района близок к умеренно-холодному. Среднегодовая температура воздуха — минус 14.8°С. Наиболее холодный месяц — январь с температурами от —43 до —51°С. Выпадает около 190 мм осадков в год. Самые сухие месяцы: март, январь и февраль — обычно не более 5 мм осадков. Большая часть осадков выпадает в июле до 43 мм, в среднем 37 мм. Преобладающее направление ветра зимой (январь) — юго-западное, летом (июль) — северное или северо-восточное.

Многолетнемерзлые породы в регионе характеризуются непрерывным по площади и по вертикали распространением, со средней годовой температурой грунта на глубине нулевых годовых амплитуд от -5.5 до -8.0°C, активный слой (слой сезонного протаивания) достигает мощности 0.2-0.4 м под лесом и мхом, и 0.4-1.2 м на открытых площадках.

Растительность северо-таежного и лесотундрового типа, в котором доминируют лиственница Кайандера (Larix cajanderi), береза (Betula middendorffii), береза карликовая (Betula nana), стланик кедровый (Pinus pumila), багульник (Ledum palustre), ольха (Alnus), ива (Salix), осина (Populus tremola), боярышник (Crataegus), лапчатка (Potentilla), осока рыхлая (Carex laxa), мать-и-мачеха, одуванчик (Taraxacum), подснежник (Galanthus), клайтония клубневидная (Claytonia tuberosa) (суккулентная трава семейства портулаковых), малина (Rubus idaeus), шиповник (Rosa canina), уохта (смородина-дикуша) (Ribes dikuscha), княженика (Rubus arcticus), брусника (Vaccinum vitis-idaea), голубика (Vaccinum uliginosum) и др. Основные почвы на данной территории: подзолы, подбуры, слаборазвитые каменистые почвы [20]. В 60-х гг. на территории Верхоянского района Якутии, в 7 км от пос. Батагай обнаружен овраг шириной 1.5 м и глубиной 5 м. С 90-х гг. этот овраг начал заметно увеличиваться. На сегодняшний день его размеры достигли в глубину 70–100 м, в длину 1 км [19, 39, 40, 491.

Батагайское обнажение представляет собой стену, которая в нижней части близка к вертикальной, вверху отвесная — больше 60°. Общая высота варьирует от 50 до 70 м, однако если считать с придонной частью кратера, то глубина достигает 90 м. Мерзлая стенка обнажения с поверхности до глубины 25—30 м обычно сложена сильнольдистыми едомными отложениями.

Отбор образцов льда осуществляли с помощью аккумуляторной дрели-шуруповерта Bosch GSR 36 VE-2-LIc буровой насадкой для льда. В повтор-

но-жильном льду выбуривали круглое отверстие, диаметром 5 см. Для зачистки места отбора приповерхностные 2 см льла снимали с помощью бура и далее отбирали более глубинные образцы из той же лунки. Образцы помещали в зип-пакеты и растапливали при комнатной температуре. Окончательное растапливание и отстаивание осадка в образцах происходило в течение 48 ч. Далее воду из образца сливали в пластиковые непрозрачные флаконы для дальнейшего анализа изотопного и макрокомпонентного состава льда. Фрагменты с почвенным материалом изо льда, включающие органическое вещество, отбирали в целлофановые пакеты, размораживали и просушивали при комнатной температуре. Координаты регистрировали с помощью GPS. В верхней части разреза едомной толщи из повторно-жильного льда 3 (рис. 1А) отбор льда выполнен с глубины 5-10 м (315-320 м над ур. м.). В нижней части разреза едомной толщи в основной стенке вскрыт повторно-жильный лед 2 (рис. 1Б), здесь отбор образцов льда выполнен с глубины 65-73 м (252-260 м над ур. м.).

Исследованные образцы представляли собой осадок, извлеченный из повторно-жильного льда после его оттаивания в пластиковом контейнере. Осадок высушивали. В сухих пробах исследовали содержание углерода.

Содержание углерода измеряли в Экологогеохимическом центре географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова с помощью CHNS-анализатора Vario Eliiiv 4.01, Elementar Analysen systeme GmbH, Германия. В качестве стандартного образца использовали сульфаниловую кислоту (Merck) со значением С 41.610%.

В лаборатории углеродистых веществ биосферы кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ образцы анализировали на содержание 11 ПАУ: флуорена, дифенила, гомологов нафталина, фенантрена, хризена, пирена, антрацена, бенз(а)антрацена, бенз(а)пирена, бенз(ghi)перилена, перилена. Анализ проводили в гексановой вытяжке методом спектрофлуориметрии (спектроскопии Шпольского) с криоприставкой. Этот метод имеет определенные преимущества: чувствительность и селективность. Метод применим к микроколичествам вещества и практически не вызывает изменений состава исследуемого объекта в процессе анализа [11].

Изотопный состав липидных соединений определяли с помощью масс-спектрометрии. Липиды извлекали из почвенных включений в ледяных жилах методом холодной экстракции хлороформом и гексаном [9]. При процедуре экстракции важно, чтобы изотопный состав анализируемого вещества не изменялся в процессе изотопного обмена с растворителем. Эксперименты по влиянию экстракции на состав анализируемого вещества



Рис. 1. Детально отобранные образцы из ледяных жил в обнажении Батагайской едомы: жила 3 в верхней части разреза (A) и жила 2 в нижней части разреза (Б). Фото Ю.К. Васильчука.

описаны рядом исследователей [27, 37, 45, 46]. В ходе этих экспериментов Мекенстоком с соавт. [37] было выявлено, что ни сорбция растворителя, ни обмен между жидкой и газовой фазой не влияют на состав анализируемого вещества [37].

В данном исследовании образцы педогенного материала, просеянные через сито 0.25 мм, заливали растворителем (хлороформом и гексаном) в соотношении 5 мл растворителя на 2 г образца. 20 образцов обрабатывали хлороформом, 5 из них параллельно обрабатывали гексаном. Образцы выстаивали в стеклянных пробирках в течение суток, затем надосадочную жидкость сливали и концентрировали путем выпаривания в стеклянных бюксах в тени при комнатной температуре. Концентрированный раствор помещался с помощью пипетки в оловянные капсулы и выпаривался до воздушно-сухого состояния.

Определения изотопного состава углерода выполняли в изотопной лаборатории географического факультета МГУ на масс-спектрометре Delta-V Plus со стандартной опцией элемент-анализатор EA 1112 HT O/H-N/C. Для измерений использовали международные стандарты IAEA-CH-3,

IAEA-CH-6, IAEA-600 и USGS-24. Точность определений δ^{13} С составила $\pm 0.2\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Процентное содержание органического углерода в ледяных жилах по вертикали изменяется от 1.19 до 3.19% (табл. 1).

Значения δ^{13} С для липидных соединений, извлеченных из педогенных включений в ледяных жилах, варьируют от -26.2 до -31.1%. Среднее значение δ^{13} С составляет -29.0% для липидов, полученных путем хлороформной экстракции, и -29.5% для липидов, полученных путем гексановой экстракции (рис. 2, 3). В жиле 3 изотопный состав хлороформных липидов становится немного легче с глубиной. Для гексановых липидов трудно говорить о тенденции, однако наиболее низкое значение δ^{13} С также наблюдается на наибольшей глубине. Величины δ^{13} С соответствуют органическому веществу наземных растений с типом фотосинтеза С₃ [6]. Средние значения несколько легче, чем обычно наблюдаются для органического вещества почв, что связано с тем, что

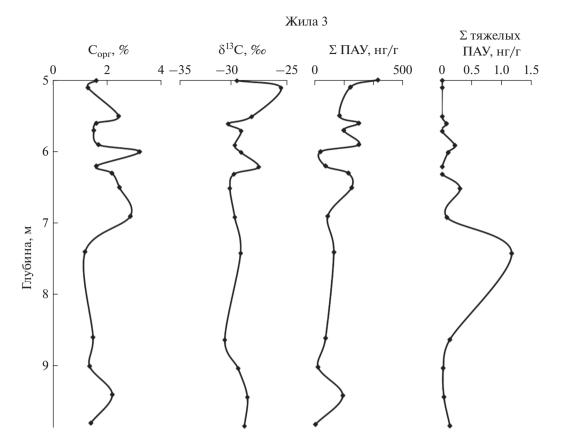


Рис. 2. Радиальное распределение значений содержания углерода, δ^{13} С и концентраций ПАУ в нижней ледяной жиле 3 на глубине 5—10 м.

изотопный состав липидной фракции, как правило, легче, чем изотопный состав валового органического вещества растений.

Концентрации суммы ПАУ в обеих ледяных жилах варьируют от 7 до 430 нг/г. Среднее содержание суммы ПАУ относительно высоко и равно 171 нг/г. медианное значение - 150 нг/г. Большую часть суммы ПАУ составляют гомологи нафталина и фенантрен (на эту группу соединений приходится от 70 до 100% от суммарного содержания). При этом фенантрен абсолютно преобладает в ассоциации (его участие варьирует от 81 до 100%) в жиле 3 до глубины 7 м (ниже преобладающими соединениями становятся гомологи нафталина) и в жиле 2. В некоторых случаях наблюдается также повышенное содержание дифенила и флуорена. Особенностью большинства образцов является присутствие тяжелых углеводородов – пирена, антрацена, бенз(а)антрацена, бенз(а)пирена в следовых количествах (их процентное участие в суммарном содержании ПАУ варьирует от 0 до 3.3%). Единственный резко выделяющийся максимум тяжелых ПАУ в ледяной жиле 3 — на глубине 7.4 м — фиксируется за счет бенз(ghi)перилена, который по данным Пастухова с соавт. [10] является практически иммобильным биомаркером.

Изменения величин δ^{13} С и содержания ПАУ с глубиной. В ледяной жиле 2 содержание ПАУ варьирует в основном за счет изменения содержания фенантрена (от 68 до 352 нг/г). Максимум фенантрена наблюдается на глубине 69.7 м. Следовые количества тяжелых ПАУ (бенз(а)антрацена, бенз(а)пирена) наблюдаются на глубинах 69.5 и 69.75 м. Средняя величина δ^{13} С составляет -30%.

В ледяной жиле 3 средняя величина δ^{13} С равна -28.9‰. Вариации ПАУ также выражены в основном за счет фенантрена, хотя в целом состав ассоциаций в этой жиле более разнообразен. Для жилы 3, особенно верхней ее части (глубина от 5 до 7 м), характерно чередование фрагментов льда с повышенным содержанием органического углерода и большим разнообразием ПАУ (однако малым их суммарным содержанием) с фрагментами жил, для которых характерна обратная ситуация (небольшое количество органического углерода. преобладание нафталина и фенантрена, практически нулевое содержание тяжелых ПАУ). При этом на глубине 5-7 м содержание ПАУ варьирует в противофазе с изотопным составом: чем больше содержание ПАУ, тем легче изотопный состав. Далее, от 7.4 до 9 м, содержание ПАУ значительно уменьшается (до 24 нг/г), параллельно с

Таблица 1. Содержание органического углерода, величины δ¹³С, ‰ и содержание ПАУ в образцах из Батагайских ледяных жил

		Жила	ла 2				Жи.	Жила 3		
Индекс	YuV-17-									
	Bat/11	Bat/15	Bat/19	Bat/20	Bat/36	Bat/39	Bat/41	Bat/43	Bat/49	Bat/53
C _{opr} , %	1.69	2.03	2.31	2.05	1.4	2.19	1.35	1.48	1.19	2.86
δ^{13} C, %0	-29.6	-30.04	-29.82	-30.39	-28.68	-28.48	-29.1	-29.98	-28.94	-29.32
Флуорен	0	4.12	3.01	0	0	0	0	0	0	0
Дифенил	0	0	0	0	0	0	99.9	0	0	7.99
Гомологи нафталина	26	10.77	9.37	7.83	5.46	113.47	9.57	26.17	19.89	8.12
Фенантрен	105.22	79.81	351.59	68.33	1.72	77.58	7.18	49.11	109.83	73.34
Хризен	0	0	0	0	90.0	0	0	0	0	0.55
Пирен	0.38	0.74	0.94	0.34	0.08	0.21	0.33	0	0	0
Антрацен	0	90.0	0.08	0.04	0	0	0	0	0.04	0
Бенз(а)антрацен	0.03	0.2	0	0.12	0.13	0	0	0.11	0	0
Бенз(а)пирен	0	0.15	0	0.1	0	0.03	0.02	0.02	0.01	0.08
Бенз(ghi)перилен	0	0	0	0	0	0	0	0	1.15	0
Перилен	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Сумма ПАУ	132	96	365	77	7	161	24	75	131	06
					Жи.	ла 3				
	YuV-17-									
	Bat/57	Bat/59	Bat/60	Bat/62	Bat/63	Bat/65	Bat/66	Bat/67	Bat/71	Bat/72
C _{opr} , %	2.46	2.18	1.6	3.19	1.68	1.51	1.6	2.42	1.3	1.6
δ ¹³ C, ‰	-29.64	-29.37	-27.73	-28.9	-29.33	-28.91	-29.77	-28.19	-26.24	-29.19
Флуорен	0	0	0	0	0	2.8	0	2.56	0	6.48
Дифенил	15.24	0	0	0	0	0	0	12.08	0	0
Гомологи нафталина	24.84	31.72	0	3.63	22.55	38.74	43.11	22.69	28.88	23.8
Фенантрен	210.48	195.56	74.35	36.82	278.79	156.12	257.48	131.23	214.95	399.44
Хризен	0	0.29	0	0	0	0	0	0	0	0
Пирен	0	0	0	1.3	0	0	0.71	0	0	0
Антрацен	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Бенз(а)антрацен	0.3	0	0	0	0.21	0	0	0	0	0
Бенз(а)пирен	0	0	0	0.1	0	0	0.07	0	0	0
Бенз(ghi)перилен	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Перилен	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Сумма ПАУ	251	228	74	42	302	198	301	169	244	430

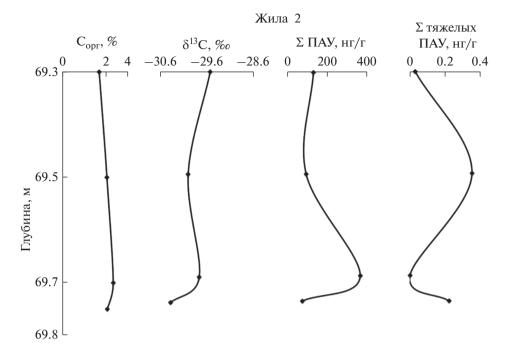


Рис. 3. Радиальное распределение значений содержания углерода (A), δ^{13} C (Б) и концентраций ПАУ (В, Г) в верхней ледяной жиле 2 на глубине 69.3—69.8 м.

ним уменьшаются значения δ^{13} С, а содержание органического углерода практически не меняется. На глубине 9.4 м содержание ПАУ снова увеличивается (до 191 нг/г) на фоне небольшого утяжеления изотопного состава (-28.48%), после чего на глубине 9.8 м уменьшается до практически следовых количеств (7 нг/г).

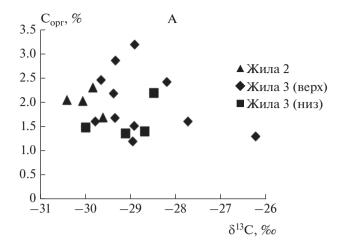
Наблюдается слабая тенденция к увеличению содержания тяжелых ПАУ с уменьшением содержания изотопа 13 С (рис. 4). Так, наиболее изотопно тяжелые образцы (значения δ^{13} С = -26.2 и -27.7‰) содержат только легкие ПАУ (фенантрен и гомологи нафталина), в то время как наиболее изотопно легкие образцы (значения δ^{13} С = -30.0 и -30.4‰) содержат ассоциацию ПАУ, включающую в себя и высокомолекулярные (имеющие 5 и 6 бензольных колец в молекуле) бенз(а)антрацен и бенз(а)пирен. При этом значимой корреляции изотопного состава с другими измеряемыми показателями не наблюдается.

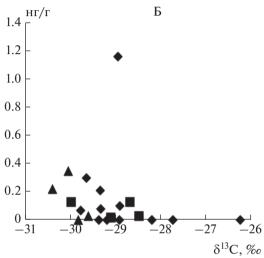
При интерпретации полученных данных авторы исходили из следующих допущений: во-первых, исследуемый включенный органический материал имеет преимущественно почвенное происхождение, на что указывает содержание органического углерода (от 1.19 до 3.19%), а также изотопный состав углерода липидной фракции (значения δ^{13} C от -26 до -31%). Согласно работе [6], величины δ^{13} C в почвах, как правило, равны -25...-26%, в то время как в горных породах значения δ^{13} C выше, в среднем -22%. Состав ассоциаций ПАУ в

педогенном материале изученных ледяных жил близок к составу ассоциаций ПАУ в некоторых арктических почвах, например, островов Северной Земли [17]. Доминирующими ПАУ в арктических почвах Северной Земли являются фенантрен и нафталин (аналогично составу Батагайских ледяных жил).

Второе допущение заключается в том, что в едомных толщах интенсивность микробиологической деятельности сильно замедляется, из чего можно сделать вывод, что исследуемое органическое вещество осталось практически неизмененным с момента его попадания в ледяную жилу.

Полученные нами данные показывают, что суммарное содержание ПАУ с глубиной уменьшается. Это происходит в основном за счет уменьшения содержания легких ПАУ; тяжелые ПАУ не имеют такого тренда. Можно допустить, что содержание и состав ассоциаций ПАУ в аллохтонном педогенном материале ледяных жил Батагайской едомной толщи в определенной мере отражают тренд изменения ландшафтов в позднеплейстоценовое время от перигляциальной степи и тундры к лиственничному редколесью, который выявлен Ашастиной с соавт. [19] на основе исследования растительных макрофоссилий, остатков насекомых и семян растений. Аналогичные палеогеографические выводы для данного региона были сделаны Мюллер с соавт. [38], которые на основе палинологических исследований позднеплейстоценовой толщи 50-тысячелетнего возраста на оз. Биллях в Верхоянье выявили





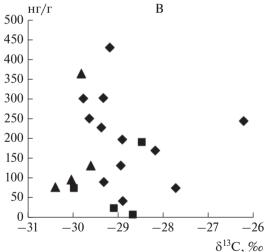


Рис. 4. Величины процентного содержания C_{opr} (A) и содержания тяжелых ΠAY (B) и суммы ΠAY (B) зависимости от изотопного состава.

смену тундрово-степной растительности лесотундровой.

Связь содержания ПАУ с составом растительных сообществ может заключаться в том, что в

условиях травянистого покрова, господствовавшего на территории Якутии в более ранний период позднего плейстоцена, в почву поставлялось и накапливалось в ней меньшее количество полиаренов, поскольку травянистая растительность по сравнению с древесной, содержит меньше смол и лигнина как потенциальных источников материала для образования автохтонных полиаренов.

Дополнительным объяснением этой связи может являться то, что смена травянистой растительности на древесную сопровождается увеличением числа и интенсивности природных пожаров, которые отражаются на содержании полиаренов и составе их ассоциаций. Так, исследуемые образцы из верхней части ледяной жилы отличает наличие тяжелых полиаренов (бенз(а)пирена, бенз(а)антрацена), которые считаются продуктами природного пирогенного воздействия [31, 35, 42]. Кроме того, пирогенное воздействие увеличивает суммарное содержание ПАУ [16].

Указанные выше количества ПАУ (сотни нг/г) в педогенном материале ледяных жил Батагайской едомы считаются весьма высокими для природных условий; в современных почвах они характерны, например, для аллювиальных гумусовых почв [8], где концентрации полиаренов достигают порядка 200 нг/г. Поэтому можно сделать вывод о том, что поступление вещества в ледяные жилы происходило из почв, сравнительно богатых органическим веществом.

Согласно полученным нами данным изотопный состав углерода липидов педогенного материала утяжеляется с уменьшением глубины. Наиболее легкие значения (величины δ^{13} C меньше -30%) наблюдаются в ледяной жиле 3 на глубине от 7.4 до 8.6 м.

Данный тренд изменения изотопного состава почвенных липидов несколько противоречит тенденции роста содержания ПАУ вверх по профилю ледяной жилы, что могло быть связано с эволюционным переходом в позднеплейстоценовое время от травянистой растительности к древесной. Вышеуказанный переход обусловливал увеличение содержания в опаде, поступающем в почвы, восков и смол, углерод которых имеет более легкий изотопный состав, то есть с уменьшением глубины и возраста он должен был облегчаться. Однако в описываемых ледяных жилах с уменьшением глубины изотопный состав углерода становится более тяжелым. Для решения этого вопроса требуются дополнительные исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изотопный состав углерода липидов в органическом материале, включенном в ледяные жилы Батагайской едомы соответствует составу растений с типом фотосинтеза C_3 , то есть имеет педо-

генное происхождение. По мере увеличения глубины ледяной жилы и возраста включений изотопный состав углерода почвенных липидов обнаруживает тенденцию к облегчению.

Высокое содержание ПАУ в ледяных жилах Батагайской едомы (до 430 нг/г, в среднем 170 нг/г) может указывать на то, что данный материал сформировался из богатых органическим веществом субстанций (гумусовых или заторфованных почвенных горизонтов). По сравнению с данными работ, выполненных для арктических почв, количество ПАУ в педогенном материале исследованных ледяных жил является несколько повышенным. В составе ассоциации ПАУ присутствуют гомологи нафталина и фенантрен в качестве доминирующих компонентов.

Комбинации полученных параметров (содержания органического углерода от 1.2 до 3.2%, значения δ^{13} C от -26.2 до -31.1%, преобладание в составе ПАУ фенантрена и гомологов нафталина) в педогенном материале ледяных жил Батагайской едомы являются, по-видимому, результатом сочетания следующих процессов: а) привнесения ПАУ с богатыми органическим веществом субстанциями (материалом гумусовых горизонтов древних почв и др.); б) привнесения некоторых количеств тяжелых углеводородов (в частности. бенз(а)пирена) с материалом, образовавшимся в результате природных пожаров; в) избирательного разложения липидных компонентов с последующим изотопным облегчением общей липидной фракции в процессе почвообразования (до момента попадания осадка в ледяные жилы).

Содержание полиаренов и состав ассоциации ПАУ в ледяных жилах Батагайской едомы могут являться отражением смены ландшафтов на данной территории.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке РНФ (№ 19-17-00126 — анализ стабильных изотопов и № 19-77-30004 — анализ ПАУ) и РФФИ (18-05-60272 Арктика — обобщение данных). Авторы благодарны сотрудникам кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова Н.И. Хлыниной, Е.В. Терской и А.Ю. Тришину за помощь в лабораторных и полевых работах.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Габов Д.Н., Безносиков В.А., Кондратенок Б.М. Полициклические ароматические углеводороды в подзолистых и торфянисто-подзолисто-глееватых

- почвах фоновых ландшафтов // Почвоведение. 2007. № 3. C. 282—291.
- 2. Габов Д.Н., Безносиков В.А., Яковлева Е.В. Накопление полициклических ароматических углеводородов в тундровых бугристых торфяниках в условиях изменения климата в высоких широтах // Геохимия. 2017. № 8. С. 741—756.
- 3. *Габов Д.Н., Василевич Р.С., Яковлева Е.В., Зуева О.М.* Ароматические соединения в бугристых торфяниках криолитозоны // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2017. № 6. С. 15—29.
- 4. Габов Д.Н., Яковлева Е.В., Василевич Р.С., Кузнецов О.Л., Безносиков В.А. Полициклические ароматические углеводороды в мерзлотных бугристых торфяниках криолитозоны // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1049—1062. https://doi.org/10.1134/S0032180X1909003X
- 5. Габов Д.Н., Яковлева Е.В., Зуева О.М. Водорастворимый фенол в бугристых торфяниках лесотундровой зоны // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем. 2016. С. 326—330.
- 6. *Галимов Э.М.* Геохимия стабильных изотопов углерода. М.: Недра, 1968. 225 с.
- 7. Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Флоровская В.Н., Алексеева Т.А., Козин И.С., Оглоблина А.И., Раменская М.Е. и др. Геохимия полициклических ароматических углеводородов в горных породах и почвах. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1996. 190 с.
- 8. *Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Цибарт А.С., Смирнова М.А.* Углеводороды в почвах: происхождение, состав, поведение (обзор) // Почвоведение. 2015. № 10. С. 1195—1195.
- 9. *Корчагина Ю.И.*, *Четверикова О.П.* Методы исследования рассеянного органического вещества осадочных пород. М.: Недра, 1976. 229 с.
- 10. *Пастухов А.В., Каверин Д.А., Габов Д.Н.* Полициклические ароматические углеводороды в мерзлотных бугристых торфяниках на европейском северо-востоке // Почвоведение. 2017. № 7. С. 814—823.
- 11. Пиковский Ю.И., Коротков Л.А., Смирнова М.А., Ковач Р.Г. Лабораторно-аналитические методы при определении углеводородного состояния почв (обзор) // Почвоведение. 2017. № 10. С. 1165—1178.
- 12. Пиковский Ю.И., Смирнова М.А., Геннадиев А.Н., Завгородняя Ю.А., Жидкин А.П., Ковач Р.Г., Кошовский Т.С. Нативные параметры углеводородного состояния почв различных биоклиматических зон // Почвоведение. 2019. № 11. https://doi.org/10.1134/S0032180X1911008X
- 13. Ровинский Ф.Я., Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А. Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. М.: Гидрометеоиздат, 1988. 224 с.
- 14. *Хаустов А.П., Редина М.М.* Полициклические ароматические углеводороды как геохимические маркеры нефтяного загрязнения окружающей среды // Экспозиция Нефть Газ. 2014. № 4(36). С. 92—96.
- 15. *Хаустов А.П., Редина М.М.* Геохимические маркеры на основе соотношений концентраций ПАУ в нефти и нефтезагрязненных объектах // Геохимия. 2017. № 1. С. 57–67.

- 16. *Цибарт А.С., Геннадиев А.Н.* Ассоциации полициклических ароматических углеводородов в пройденных пожарами почвах // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2011. № 3. С. 13—19.
- 17. Abakumov E.V., Tomashunas V.M., Lodygin E.D., Gabov D.N., Sokolov V.T., Krylenkov V.A., Kirtsideli I.Y. Polycyclic aromatic hydrocarbons in insular and coastal soils of the Russian Arctic // Eurasian Soil Sci. 2015. V. 48. № 12. P. 1300–1305.
- 18. Armstroff A., Wilkes H., Schwarzbauer J., Littke R., Horsfield B. Aromatic hydrocarbon biomarkers in terrestrial organic matter of Devonian to Permian age // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2006. V. 240. № 1–2. P. 253–274.
- 19. Ashastina K., Schirrmeister L., Fuchs M., Kienast, F. Palaeoclimate characteristics in interior Siberia of MIS 6-2: first insights from the Batagay permafrost mega-thaw slump in the Yana Highlands // Climate of the Past. 2017. V. 13. P. 795–818.
- Ashastina K. Palaeo-environments at the Batagay site in West Beringia during the late Quaternary: PhD. Friedrich-Schiller-Universität Jena. 2018. 151 p. https:// www.db-thueringen.de/receive/dbt_mods_00038013
- 21. Balmer J.E., Hung H., Yu Y., Letcher R.J., Muir D.C. Sources and environmental fate of pyrogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the Arctic // Emerging Contaminants. 2019. V. 5. P. 128–142.
- Bosch C., Andersson A., Kruså M., Bandh C., Hovorková I., Klánová J., Knowles T., Pancost R.D., Evershed R.P., Gustafsson Ö. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in central european soils with compound-specific triple isotopes (δ¹3C, Δ¹4C, and δ²H) // Environ. Sci. Technol. 2015. V. 49. № 13. P. 7657–7665.
- 23. *Dahle S., Savinov V.M., Matishov G.G., Evenset A., Næs K.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in bottom sediments of the Kara Sea shelf, Gulf of Ob and Yenisei Bay // Sci. Total Environ. 2003. V. 306. № 1–3. P. 57–71.
- 24. Elmquist M., Semiletov I., Guo L., Gustafsson Ö. Pan-Arctic patterns in black carbon sources and fluvial discharges deduced from radiocarbon and PAH source apportionment markers in estuarine surface sediments // Global Biogeochemical Cycles. 2008. V. 22. GB2018. https://doi.org/10.1029/2007GB002994
- 25. Glaser B., Dreyer A., Bock M., Fiedler S., Mehring M., Heitmann T. Source apportionment of organic pollutants of a highway-traffic-influenced urban area in Bayreuth (Germany) using biomarker and stable carbon isotope signatures // Environ. Sci. Technol. 2005. V. 39. № 11. P. 3911—3917.
- 26. Guo L., Semiletov I., Gustafsson Ö., Ingri J., Andersson P., Dudarev O., White D. Characterization of Siberian Arctic estuarine sediments: Implications for terrestrial organic carbon export // Global Biogeochemical Cycles. 2004. V. 18. № 1. GB1036. https://doi.org/10.1029/2003GB002087
- 27. *Hunkeler D., Aravena R.* Determination of compound-specific carbon isotope ratios of chlorinated methanes, ethanes, and ethenes in aqueous samples // Environ. Sci. Technol. 2000. V. 34. № 13. P. 2839–2844.
- 28. Idowu O., Semple K.T., Ramadass K., O'Connor W., Hansbro P., Thavamani P. Beyond the obvious: Envi-

- ronmental health implications of polar polycyclic aromatic hydrocarbons // Environ. Int. 2019. V. 123. P. 543–557.
- 29. *Jautzy J.*, *Ahad J.M.*, *Gobeil C.*, *Savard M.M.* Centurylong source apportionment of PAHs in Athabasca oil sands region lakes using diagnostic ratios and compound-specific carbon isotope signatures // Environ. Sci. Technol. 2013. V. 47. № 12. P. 6155–6163.
- 30. *Kochany J. PAHs* in natural waters: natural and anthropogenic sources, and environmental behavior // Wastewater Treatment, CRC Press, 2018. P. 26–61.
- 31. *Kumar B., Verma V.K., Sharma C.S., Akolkar A.B.* Priority Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): Distribution, Possible Sources and Toxicity Equivalency in Urban Drains // Polycyclic Aromatic Compounds. 2016. V. 36. № 4. P. 342–363.
- 32. Lichtfouse E., Dou S., Girardin C., Grably M., Balesdent J., Béhar F., Vandenbroucke M. Unexpected ¹³C-enrichment of organic components from wheat crop soils: evidence for the *in situ* origin of soil organic matter // Org. Geochem. 1995. V. 23. № 9. P. 865–868.
- 33. Lichtfouse É., Budzinski H., Garrigues P., Eglinton T.I. Ancient polycyclic aromatic hydrocarbons in modern soils: ¹³C, ¹⁴C and biomarker evidence // Org. Geochem. 1997. V. 26. № 5–6. P. 353–359.
- 34. Liebner S., Zeyer J., Wagner D., Schubert C., Pfeiffer E. M., Knoblauch C. Methane oxidation associated with submerged brown mosses reduces methane emissions from Siberian polygonal tundra // J. Ecology. 2011. V. 99. № 4. P. 914–922.
- 35. Lu M., Lu Y., Ikejiri T., Hogancamp N., Sun Y., Wu Q., Richard Carroll et al. Geochemical evidence of First Forestation in the southernmost euramerica from Upper Devonian (Famennian) Black shales // Scientific Reports. 2019. V. 9. № 1. P. 7581.
- 36. *McRae C.*, *Snape C.E.*, *Sun C.G.*, *Fabbri D.*, *Tartari D.*, *Trombini C.*, *Fallick A.E.* Use of compound-specific stable isotope analysis to source anthropogenic natural gas-derived polycyclic aromatic hydrocarbons in a lagoon sediment // Environ. Sci. Technol. 2000. V. 34. № 22. P. 4684–4686.
- 37. Meckenstock R.U., Morasch B., Griebler C., Richnow H.H. Stable isotope fractionation analysis as a tool to monitor biodegradation in contaminated acquifers // J. Contaminant Hydrology. 2004. V. 75. № 3–4. P. 215–255.
- 38. Müller S., Tarasov P.E., Andreev A.A., Tütken T., Gartz S., Diekmann B. Late Quaternary vegetation and environments in the Verkhoyansk Mountains region (NE Asia) reconstructed from a 50-kyr fossil pollen record from Lake Billyakh // Quater. Sci. Rev. 2010. V. 29. № 17–18. P. 2071–2086.
- 39. Murton J.B., Edwards M.E., Lozhkin A.V., Anderson PM., Savvinov G., Bakulina N., Bondarenko O. et al. Preliminary paleoenvironmental analysis of permafrost deposits at Batagaika megaslump, Yana Uplands, northeast Siberia // Quaternary Res. 2017. V. 87. P. 314—330.
- 40. Opel T., Murton Ju.B., Wetterich S. et al. Past climate and continentality inferred from ice wedges at Batagay megaslump in the Northern Hemisphere's most continental region, Yana Highlands, interior Yakutia // Cli-

- mate of the Past. 2019. V. 15. P. 1443–1461. https://doi.org/10.5194/cp-15-1443-2019
- 41. *Philip R.P.* The emergence of stable isotopes in environmental and forensic geochemistry studies: a review // Environ. Chem. Lett. 2007. V. 5. № 2. P. 57–66.
- 42. *Ratnayake A.S.* Paleoenvironmental Reconstructions using Organic Source Indicators: A Summary of Examples from Sri Lanka // J. Tropical Forestry Environ. 2018. V. 8. № 2. P. 1–12. https://doi.org/10.31357/jtfe.v8i2.3759.g2983
- 43. Sánchez-García L., Vonk J.E., Charkin A.N., Kosmach D., Dudarev O.V., Semiletov I.P., Gustafsson Ö. Characterisation of three regimes of collapsing Arctic ice complex deposits on the SE Laptev Sea coast using biomarkers and dual carbon isotopes // Permafrost and Periglacial Processes. 2014. V. 25. № 3. P. 172–183.
- 44. Schirrmeister L., Schwamborn G., Overduin P.P., Strauss J., Fuchs M.C., Grigoriev M., Yakshina I. et al. Yedoma Ice Complex of the Buor-Khaya Peninsula (southern Laptev Sea) // Biogeosciences. 2017. V. 14. № 5. P. 1261–1283.
- 45. Slater G.F., Dempster H.S., Sherwood Lollar B., Ahad J. Headspace analysis: a new application for isotopic characterization of dissolved organic contaminants // Environ. Sci. Technol. 1999. V. 33. № 1. P. 190–194.
- 46. *Slater G.F., Ahad J.M.E., Sherwood Lollar B., Allen-King R., Sleep B.* Carbon isotope effects resulting from equilibrium sorption of dissolved VOCs // Analyt. Chem. 2000. V. 72. № 22. P. 5669–5672.
- 47. Stogiannidis E., Laane R. Source characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons by using their molecular indices: an overview of possibilities // Reviews of

- environmental contamination and toxicology. Springer, Cham. 2015. P. 49–133.
- 48. *Tan Y.L., Kong A., Monetti M.A.* Biogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in an Alaskan arctic lake sediment // Polycyclic Aromatic Compounds. 1996. V. 9. № 1–4. P. 185–192.
- 49. Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk J.Yu., Budantseva N.A., Vasil'chuk A.C., Trishin A.Yu. High-Resolution Oxygen Isotope and Deuterium Diagrams for Ice Wedges of the Batagai Yedoma, Northtern Central Yakutia // Doklady Earth Sciences. 2019. V. 487. Part 2. P. 986–989. https://doi.org/10.1134/S1028334X19080312
- 50. Vonk J.E., Sánchez-García L., Semiletov I.P., Dudarev O.V., Eglinton T.I., Andersson A., Gustafsson Ö. Molecular and radiocarbon constraints on sources and degradation of terrestrial organic carbon along the Kolyma paleoriver transect, East Siberian Sea // Biogeosciences. 2010. V. 7. № 10. P. 3153—3166.
- 51. Wakeham S.G., Canuel E.A. Biogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of the San Joaquin River in California (USA), and current paradigms on their formation // Environ. Sci. Poll. Res. 2016. V. 23. № 11. P. 10426–10442.
- 52. Wilcke W., Krauss M., Amelung W. Carbon isotope signature of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): evidence for different sources in tropical and temperate environments? // Environ. Sci. Technol. 2002. V. 36. № 16. P. 3530–3535.
- 53. Yunker M.B., Macdonald R.W. Alkane and PAH depositional history, sources and fluxes in sediments from the Fraser River Basin and Strait of Georgia, Canada // Org. Geochem. 2003. V. 34. № 10. P. 1429–1454.

Isotopic Composition of Carbon and Polyarenes in Pedogenic Material of Ice Wedges of Batagay Yedoma (Yakutia)

Yu. K. Vasil'chuk^{1,*}, A. D. Belik¹, N. A. Budantseva¹, A. N. Gennadiev¹, and J. Yu. Vasil'chuk¹

Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: vasilch geo@mail.ru

We investigated the isotopic composition of carbon and the content of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the pedogenic material of inclusions in ice wedges of the upper tier of the Batagay yedoma (Yakutia). Concentrations of 11 PAHs are equal to an average of 170 ppb (minimum 7 ppb, maximum 430 ppb), and $\delta^{13}C$ content of soil lipids is equal to an average of -29% (minimum -31.1%, maximum -26.2%). The dominant polyarenes in the associations are phenanthrene and naphthalene homologues. Also, we found trace amounts of heavy PAHs, including benzo(a)pyrene, which is considered an indicator of pyrogenic processes. PAH contents and $\delta^{13}C$ values in an ice wedges show a decreasing trend with depth. The values of $\delta^{13}C$ and the PAH content indicate the pedogenic origin of the sediment, therefore, the sources of PAHs are plant residues, and wildfires. The trend of changes in polyarenes concentrations along the ice wedge is supposed to be associated with the changes of landscapes in the Late Pleistocene time.

Keywords: yedoma deposits, ice complexes, PAHs, carbon isotopes, Yakutia, Late Pleistocene landscapes, Entic Podzols

——— ХИМИЯ ПОЧВ

УЛК 631.43

ОСОБЕННОСТИ ЧЕРНОЗЕМНЫХ ПОЧВ РАЙОНА ХОПЕРСКОГО ГЛУБИННОГО РАЗЛОМА ЗЕМНОЙ КОРЫ¹

© 2020 г. Н. И. Суханова^{а, *}, С. Я. Трофимов^а, А. Л. Степанов^а, А. В. Кирюшин^а

^аМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия *e-mail: vogudin@yandex.ru
Поступила в редакцию 30.01.2019 г.
После доработки 21.05.2019 г.

Принята к публикации 20.06.2019 г.

Исследованы химические свойства черноземных почвы, подвергающихся воздействию глубинного водородного флюида (Воронежская область, Россия). Показано, что черноземы обыкновенные в зонах локального выделения эндогенного водорода меняют свойства в результате формирования интенсивного восстановительного режима, обусловленного потоком водородного флюида. Резко увеличивается кислотность почвенного профиля, исчезают карбонатные новообразования, профиль становится полностью промытым от карбонатов, увеличивается содержание подвижного железа. При увеличении общего содержания гумуса происходит осветление гумусового горизонта изза резкого изменения состава гумуса в сторону фульватности. Почвы теряют плодородие, урожай на таких территориях может снижаться на 30–40%. В западинах с временным переувлажнением восстановительные процессы в почвах усиливаются.

Ключевые слова: чернозем обыкновенный, дегазация, молекулярный водород, гумус

DOI: 10.31857/S0032180X20020124

ВВЕДЕНИЕ

Одним из малоизученных факторов, влияющих на экологическое состояние окружающей среды, является дегазация земли. Особое место занимает глубинный водород — наименее изученный, но определяющий компонент газового земного флюида. Дегазация осуществляется в зонах глубинных разломов и их узлов, которые являются каналами, через которые (из-за малого размера и очень высокой скорости диффузии) водород выходит на поверхность. Водородный флюид создает в зоне инфильтрации пористость в карбонатных толщах осадочных пород, перекрывающих разломы, и образует на поверхности особые западины и их скопления [17, 24, 29, 34, 35]. Они хорошо видны на космических снимках и отличаются от понижений, сформированных только водой, правильной круглой формой и необычными почвенными свойствами. По свидетельству геологов и результатам полевой водородометрии установлено, что поток водородного флюида непостоянен в пространстве и во времени и подчиняется космическим ритмам, связанным с характером движения Земли в околосолнечном пространстве. Известны сезонные периоды (май-июнь и октябрьдекабрь), обусловленные внутригодовыми изменениями скорости вращения Земли, суточные и полусуточные (вращение Земли вокруг собственной оси) и периоды лунных фаз, связанные с гравитационным воздействием Луны на земное ядро [17, 21, 26, 27]. Со временем западины развиваются — от начальной стадии формирования, когда понижения поверхности практически нет, до "старения", когда понижение существенное, и в западине при достаточном количестве осадков может сформироваться болото или озеро.

Такие участки встречаются практически на всех континентах. Они обнаружены в Германии, США, Канаде, Аргентине, Бразилии, Польше, Белоруссии, Украине, Казахстане, Австралии, Африке, Монголии. В России скопления водородных западин замечены в Воронежской, Липецкой, Волгоградской, Московской областях, на севере Западной Сибири и др. [17, 21, 26, 27, 29, 35, 38].

Территории с выходами водорода часто охватывают большие площади, а плотность водородных западин может составлять от 15 до 50% и более. Если выходы водорода осуществляются на мало используемых человеком территориях, то речь может идти об экологической безопасности (например, лесные пожары в труднодоступных местах часто связывают с дегазацией и др.). Но

¹ К статье имеются дополнительные материалы, доступные для авторизированных пользователей по doi: 10.1134/S0032180X20020124.

особо актуальным является изучение влияния водородного флюида на плодородные почвы пашни, например, в Воронежской, Липецкой, Волгоградской областях нашей страны. В процессе прохождения потоков водорода через почвенную толщу его содержание в почвенном воздухе значительно превышает обычные для почвенных условий концентрации образующегося биогенным путем водорода. На отдельных участках концентрация водорода в подпочвенном воздухе на глубине 120 см, измеренная методами полевой водородометрии, достигает 1.6 об. % и более [33, 34]. Это обстоятельство может кардинально менять условия почвообразования за счет влияния газообразного водорода на окислительно-восстановительный режим почв и почвообразующих пород, гумусообразование, микробиологические процессы, о чем имеются лишь фрагментарные данные. Урожай на таких территориях может снижаться на 30-40%.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

К территориям с большой плотностью выходов водорода относится участок в районе коленообразного поворота долины р. Хопер в северо-восточной части Воронежской области (Хоперский глубинный разлом, левобережье р. Хопер в окрестностях г. Поворино, Борисоглебск, Новохоперск) общей площадью около 3600 км². В почвенном отношении это зона распространения черноземов обыкновенных, которые интенсивно используются в сельском хозяйстве. Водораздельная часть слабоволнистая. На поверхности выходящие струи водородного флюида из недр земли формируют круглые понижения (западины) правильной формы диаметром от нескольких метров до 3 км и разной глубины [32, 36].

Во всех исследованных западинах (более двух десятков) отмечена значительная концентрация водорода на глубине 120 см, в период исследования она составляла в среднем 0.65 об. %, что намного превышает обычные концентрации в почвенном воздухе. Вне западины измеренная концентрация водорода была обычной, такой же, как в атмосферном воздухе (несколько ppm). Неглубокие западины (или осветленные пятна округлой формы при начальной стадии формирования западин) вовлечены в пахотные угодья. Имея такую необычно правильную форму и заметную осветленность верхнего гумусового горизонта, западины хорошо дешифрируются на космических снимках [25, 32]. Маленькие западины на полях на весенних снимках, когда почва распахана и еще не засеяна, видны как сплошные светлые пятна круглой формы на фоне темной окружающей их пашни, более крупные формы выделяются как осветленные круги. Более глубокие формы исключены из сельскохозяйственного использования и часто представляют собой сильнозаросшие растительностью участки, обособленные от окружающей пашни.

На этой территории, на водораздельной части выбраны почвы двух водородных западин разного размера. Поскольку западины расположены на расстоянии друг от друга, разрезы закладывали в западине и на окружающем ее черноземе.

Первая западина (I) имеет правильную круглую форму размером около 100 м, глубиной 0.6 м. Западина исключена из сельскохозяйственного использования, но когда-то (около 15 лет назад) пахалась, в профиле наблюдается старый пахотный горизонт. В настоящее время это залежный участок, зарастающий лугово-степной растительностью с редким кустарником. Разрезы заложены на дне (разрез 1) и на периферии западины (разрез 2). Почва, окружающая западину (фоновая) — чернозем обыкновенный легкосуглинистый (разрез 3). Описание разрезов представлено в дополнительных материалах.

Поток молекулярного водорода измеряли непосредственно в поле переносным газоанализатором водорода ВГ-3В (Россия). Общее содержание гумуса определяли по методу Тюрина, рН – потенциометрически. Для оценки изменений в составе гумуса использовали однократную щелочную пирофосфатную вытяжку с разделением ее на шелочно- и кислоторатворимые группы (ГК и ФК), но без последующего разделения этих групп на фракции. Выделение и очистку препаратов гуминовых кислот проводили по методу Международного гуминового общества (IHSS). Элементный состав гуминовых кислот определяли традиционным методом [20]. Содержание несиликатного железа по Мера-Джексону, аморфного железа – методом Тамма. Светлоту почвенных проб (L) определяли по международной системе цветности на компьютеризированном спектроколориметре "Пульсар".

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полевое морфологическое описание исследуемых западин свидетельствует о том, что эти почвы необычны.

Западина І

Западина I имеет некоторый водосбор и кратковременное весеннее переувлажнение. Обычно в таких условиях рельефа в западинах, сформированных водой без выхода эндогенного водорода, формируются почвы полугидроморфного ряда, свойства которых хорошо изучены в разных природных зонах [1, 5, 6, 16, 18, 19, 23].

В нашем случае по морфологическим показателям почвы дна западины (разр. 1) видно, что в ней сильно проявлены восстановительные про-

цессы. Почва имеет резко дифференцированный профиль, в котором хорошо сформированы элювиальный и иллювиальный горизонты, и четко видны морфохроматические признаки оподзоливания и оглеения. В цветовом профиле присутствуют и сизоватый оттенок (в горизонте АЕ) и светлые пятна кремнезема (в горизонте Е) и рыжие пятна аморфной гидроокиси железа (в горизонтах Е, В). В нижней части горизонта В присутствуют ортштейны. Однако в профиле почв нет карбонатных новообразований, что резко отличает их от хорошо изученных полугидроморфных почв степи, профиль полностью промыт от карбонатов. Верхний гумусный горизонт по сравнению с окружающим черноземом осветлен, что фиксируется даже невооруженным взглядом. Кроме того, обращают на себя внимание ярко выраженные мощные гумусовые кутаны по граням структурных отдельностей, прослеживаемые до большой глубины и свидетельствующие о значительной подвижности гумуса.

Почва на границе западины (разр. 2) по морфохроматическим показателям мало отличается от окружающего чернозема, за исключением того, что в профиле нет карбонатного горизонта. Почва также полностью промыта от карбонатов, по граням структурных отдельностей наблюдается слабая кремнеземистая присыпка, а в нижней части горизонта В встречаются одиночные железо-марганцевые примазки. Кутаны отсутствуют. То есть в почве присутствуют восстановительные процессы, но они проявлены не так сильно, как в почве дна западины. Почва, окружающая западину, — чернозем обыкновенный с типичным морфологическим профилем (разр. 3).

Западина II

Почва в западине (разр. 4) по морфохроматическим показателям отличается от окружающего чернозема (разр. 5) тем, что верхний гумусный горизонт осветлен, что видно даже невооруженным глазом, в профиле полностью отсутствуют карбонатные новообразования, нет вскипания по разрезу. В остальном почвенный профиль визуально неотличим от профиля окружающего западину чернозема обыкновенного легкосуглинистого. Западина столь мала, что вряд ли весенние воды могут собраться в ней количестве, значимо влияющем на почвенные свойства, в частности на промытость от карбонатов, а летние дожди в этой климатической обстановке и при отсутствии водоупора не приводят к вымочке посевов.

Химические свойства

Химические свойства почв западин необычны. По содержанию гумуса почвы большой западины I резко отличаются от почв окружающей пашни

(рис. 1). В верхних гумусных горизонтах почв дна западины его содержание вдвое больше, чем в соответствующих горизонтах чернозема. Причина этого понятна. Дно западины в настоящее время представляет собой залежь, в которой поступление растительных остатков значительно больше. Вероятно, и условия для гумусообразования лучше в результате дополнительного поступления влаги. Нельзя исключать и сток обогащенного гумусом мелкозема с талыми водами и, возможно, в результате воздушного переноса пыли.

В почвах границы большой западины І содержание гумуса меньше, чем в почвах дна, но значимо больше, чем в окружающем черноземе. Увеличение содержания гумуса не вызывает удивления, поскольку по классическим представлениям [2, 7, 10, 11, 28] в условиях кратковременного весеннего переувлажнения в степной зоне в формирующихся лугово-черноземных, черноземно-луговых почвах обычно увеличивается содержание гумуса в верхнем дневном горизонте. Однако величины рН в почвах западины не характерны для почв, сформированных действием только воды. Реакция среды в исследуемых западинах с выходом молекулярного водорода очень кислая по всему почвенному профилю и колеблется в профиле почвы дна западины от 4.17 до 5.03. В почвах границы западины величина рН несколько выше (6.14-6.23), но в нижней части профиля, что также необычно, снижается до 5.71. Это резко отличает их от почв окружающего чернозема и от почв, подвергающихся воздействию только временного избыточного переувлажнения в степной зоне. В последних величины рН могут несколько снижаться в верхнем горизонте, но не так значительно, и их динамика по профилю практически аналогична черноземам.

Почвы малой западины II по содержанию гумуса незначительно отличаются от почв окружающего чернозема, если и прослеживается некоторое увеличение гумуса, то на уровне ошибки (рис. 2). Западина очень маленькая, обусловленные в ней рельефом гидротермические условия, в которых формируется почва, в частности гумус, практически не отличаются от условий окружающего чернозема. Однако величины рН в почве западины в отличие от содержания гумуса очень низкие по всему почвенному профилю (4.87—5.37).

Несмотря на существенное увеличение содержания гумуса, как в почве большой западины или незначительное, как в малой западине, верхний горизонт почв значительно светлее, чем в фоновых аналогах (табл. 1). То есть осветленность верхних гумусовых горизонтов не определяется содержанием в них гумуса, а зависит от его состава.

На данном этапе развития науки исчерпывающей теории формирования окраски гумусовых веществ не создано. Однако известно, что их тем-

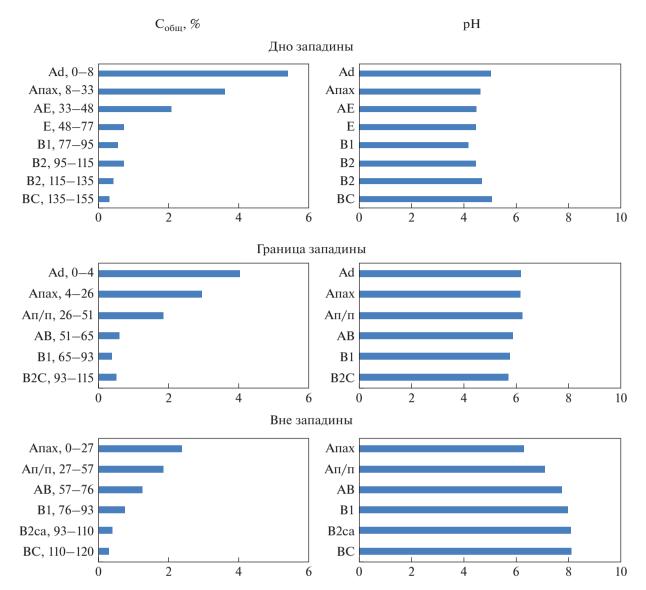


Рис. 1. Общее содержание органического углерода и величина рН в почвах большой западины І.

ная окраска определяется наличием сопряженных двойных углерод-углеродных связей, которые присутствуют не только в ароматическом блоке, но и в периферии, в алифатической части гумуса, которая также вносит некоторую долю в окраску гумусовых веществ.

Для выявления особенностей состава гумуса посчитали возможным использовать однократную щелочную пирофосфатную вытяжку, предложенную Кононовой и Бельчиковой, с разделением ее на щелочно- и кислоторастворимые группы (ГК и ФК), но без последующего разделения этих групп на фракции, которая позволяет оценить наиболее трансформируемую часть гумуса, включающую свободные и связанные гумусовые кислоты с несиликатными формами железа и алюминия, а также с кальцием [3]. Существу-

ют дискуссионные мнения, что в пирофосфатнощелочную вытяжку могут частично переходить гумусовые вещества и из других фракций [31]. Учитывая, что есть теоретические и экспериментально подтвержденные представления о связи содержания групп гуминовых кислот (ГК) и фульвокислот (ФК) с условиями почвообразования, с подвижностью и устойчивостью гуминовых веществ и др., полагаем (с долей условности), что щелочная вытяжка это та их часть, которая наиболее подвержена изменениям при смене почвенных режимов. Следовательно, изменение окраски гумусового горизонта черноземов, вероятно, в большой степени зависит от ее количества и структурной организации.

В составе гумуса в верхнем горизонте почв западины I увеличивается его легкотрансформиру-

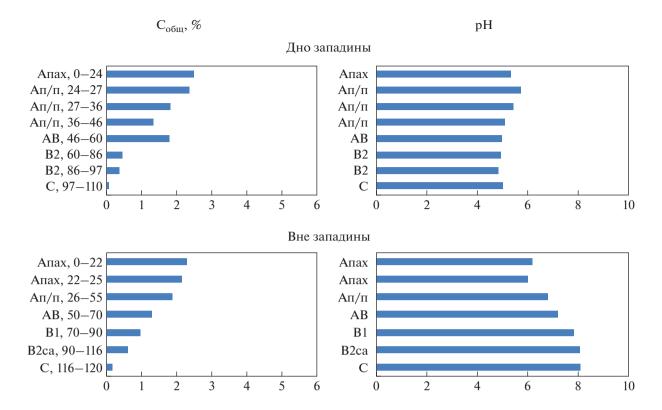


Рис. 2. Общее содержание органического углерода и величины рН в почвах малой западины II.

емая часть ($\Gamma K + \Phi K$ пирофосфатной вытяжки — 37-40% от $C_{\text{обиг}}$), причем в основном за счет существенного преобладания (втрое и более) в ней группы ΦK (30–34% от $C_{\text{обш}}$). В то время как в верхнем горизонте окружающего чернозема содержание ($\Gamma K + \Phi K$) вдвое меньше — 18%, и соотношение ГК и ФК в этой части гумуса характеризуется примерно равными долями (рис. 3). В малой западине, где практически нет переувлажнения, наблюдаются примерно те же закономерности (рис. 4) — значения трансформируемой части гумуса в целом много выше, чем в черноземе, а в ее составе содержится значительно больше фульвокислот. Известно, что в зональных черноземных почвах оптическая плотность выделенных фульвокислот в 10 раз меньше оптической плотности гуминовых кислот, а, следовательно, окраска их значительно светлее. Кроме того, следует отметить, что интенсивность светопоглощения фульвокислот снижается при уменьшении величины рН в почве. В верхнем горизонте почв водородных западин величина рН резко снижена до 4.5-5.0 против 6.2-7.0 в окружающем черноземе. В таких условиях фульвокислоты будут менее окрашены. То есть в водородных западинах может повышаться содержание гумуса, но за счет более светлых компонентов типа фульвокислот.

Величины содержания гуминовых кислот пирофосфатной вытяжки (характеризующихся обычно

очень темной окраской в зональных черноземах) верхних гумусовых горизонтов почв западин и в окружающем черноземе близки — либо чуть больше, либо чуть меньше. Для выявления особенностей изменения гуминовых кислот в условиях воздействия водорода из гумусового горизонта почв малой западины II, где нет переувлажнения, и окружающего чернозема выделены препараты ГК и определен их элементный состав (табл. 2).

Элементный состав выделенных препаратов ГК показал, что происходит обуглероживание и увеличение степени ароматичности, вероятно, осуществляется трансформация гумуса путем отщепления алифатических фрагментов ГК, поскольку энергия связи там меньше, чем в арома-

Таблица 1. Общее содержание органического углерода и светлота верхних горизонтов почв западин

Местоположение	С _{общ} , %	Светлота, L	
	Западина I	_	
Центр западины	5.38 ± 0.54	42.7 ± 0.19	
Граница западины	4.00 ± 0.41	35.91 ± 0.17	
Вне западины	2.37 ± 0.03	32.42 ± 0.18	
3	ападина II	!	
Центр западины	2.47 ± 0.12	35.33 ± 0.12	
Вне западины	2.28 ± 0.11	30.42 ± 0.11	

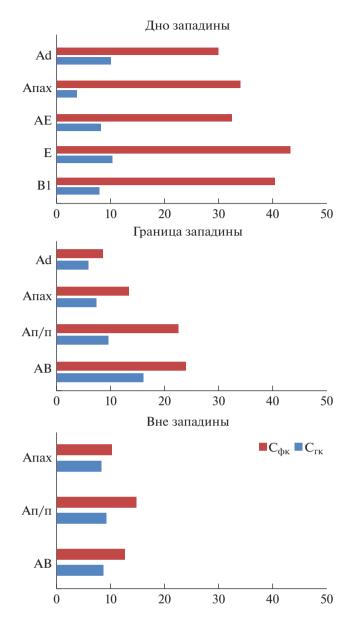


Рис. 3. Содержание гуминовых кислот и фульвокислот (% от $C_{\text{оби II}}$) в почвах большой западины I.

тических. В фоновом черноземе вне западин окраска гуминовых кислот складывается из сопряженных двойных углерод-углеродных связей не только ароматических, но и алифатических фрагментов. Лишение части последних может привести к осветлению гумуса в целом, что наблюдается в местах выхода водорода.

Следует предполагать, что в потоке водорода возможно деструктивное гидрирование органического вещества почв, сопровождающееся расщеплением углерод-углеродных связей, подобно механизмам технологий переработки угля, сланцев, нефти, древесины в жидкое топливо в токе молекулярного водорода в присутствии катализа-

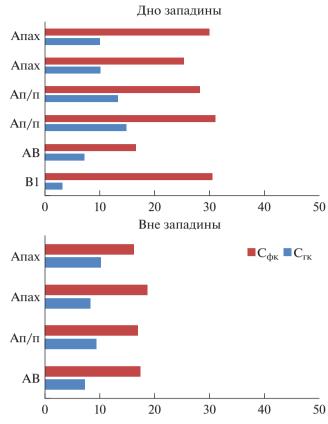


Рис. 4. Содержание гуминовых кислот и фульвокислот (% от $C_{\text{общ}}$) в почвах малой западины II.

торов — металлов переменной валентности (например, железа), их сульфидов и оксидов. В результате гуминовые вещества распадаются на более мелкие фрагменты, окраска гумусового горизонта светлеет, несмотря на повышенное общее содержание гумуса.

Кроме того, известно, что поток молекулярного водорода снижает окислительно-восстановительный потенциал воды, водных растворов и почв до крайне низких значений, что может существенно сказаться на состоянии гумуса [14, 22].

Таким образом, в условиях западин с выходом водорода в почвах наблюдается значительное повышение общей концентрации агрессивных фульвокислот, что, вероятно, является основной причиной существенного подкисления почвенного профиля.

Примерно также действует временное избыточное переувлажнение, которое формирует восстановительные условия в западинах. Однако глубоких изменений состава гумуса в почвах понижений, сформированных только водой, не наблюдается [10, 13, 23]. Кроме того, если в почве дна большой западины это можно было бы отнести за счет кратковременного анаэробиозиса в результате весеннего переувлажнения почвы, то в

малой западине, где переувлажнения практически нет, это можно связать только с потоком такого восстановителя, как газообразный водород.

Если западина с выходом водорода выражена в рельефе, то сформированные в ней почвы попадают в разряд полугидроморфных, испытывающих временное переувлажнение. Степень гидроморфизма полугидроморфных почв традиционно диагностируется по содержанию в них подвижного железа [4]. В работах Ф.Р. Зайдельмана при моделировании переувлажнения разных почвообразующих пород (карбонатные и бескарбонатные суглинки) убедительно показано, что в условиях застойного режима увеличивается содержание аморфного неокристаллизованного железа, извлекаемого вытяжкой Тамма, при одновременном уменьшении доли несиликатного (вытяжка по Мера-Джексону). В условиях застойно-промывного режима уменьшается содержание и несиликатного, и аморфного железа в результате перемещения последнего по профилю. Принято считать, что такое соотношение указывает на интенсивное глееобразование. Это справедливо, если ведущим фактором выступает только переувлажнение, особенно в идеальных условиях модельного опыта [13].

В нашем случае (рис. 5) в условиях пульсируюшего сезонного переувлажнения и пульсирующего потока водорода картина сложнее. В почвах большой западины I по сравнению с фоновым черноземом резко увеличивается содержание свободного железа, извлекаемого как дитионит-цитрат-бикарбонатной вытяжкой (по Мера-Джексону), так и более мягкой оксалатной вытяжкой (по Тамму). В почве границы этой западины в нижней части профиля вытяжка по Мера-Джексону извлекает железа в 4 раза больше. Отнести это к действию гидрологического фактора нельзя, так как на границе западины переувлажнение не выражено, а поток водорода существенный (как известно из литературы и полевых наблюдений, водородный флюид импульсный, и более интенсивный он регистрируется чаще на периферии западин). Содержание железа, извлекаемого вытяжкой Тамма, по профилю почвы также больше (многократно в верхних горизонтах), чем в фоновой почве. В почве дна западины I, где влияют оба фактора: поток водорода и временное переувлажнение – наблюдается иная картина, не укладывающаяся в принятую парадигму группового состава железа (по Зонну). Содержание железа в вытяжке по Мера—Джексону в нижней части профиля остается таким же, как в черноземе, а в пахотном горизонте увеличивается вдвое. Но в почвах многократно увеличивается содержание железа в вытяжке Тамма по всему профилю, значительно превышая в подпахотных горизонтах величину содержания железа по Мера— Джексону.

Таблица 2. Элементный состав ГК чернозема и почвы малой западины II, % от сухого беззольного вещества

Параметр	Вне западины	Западина
Массовая доля, %		
C	53.0	54.2
Н	4.3	3.9
O	39.6	37.4
N	3.2	4.5
Ат. %		
C	38.9	40.7
Н	37.2	35.3
O	21.8	21.1
N	2.0	2.9
H:C	0.96	0.87
O:C	0.56	0.52
C: N	19.45	14.03
Степень окисленности	0.17	0.17
Степень ароматичности	62.8	68.1
Сал	0.82	0.73
C_{ap}	38.1	40.0

Последние литературные данные свидетельствуют о том, что указанные, широко используемые, вытяжки по отношению к формам железа не вполне селективны [4]. Можно подозревать, что в нижних горизонтах почв границы западины I, где нет переувлажнения, завышено содержание несиликатного железа, поскольку дитионит-цитрат-бикарбонатная вытяжка (по Мера-Джексону) в ходе анализа частично может разрушать железосодержащие алюмосиликаты [4, 30]. В таком случае можно полагать, что последние в условиях потока водорода находятся в ином, более неустойчивом состоянии. В почвах дна западины, где реализуется действие двух факторов: временного переувлажнения и потока водорода — содержание оксалаторастворимого железа (по Тамму) в нижних горизонтах может быть завышено, в то время как содержание цитраторастворимого железа занижено. Это может быть связано с тем, что реактив Мера-Джексона мало извлекает железа в почвах с высоким содержанием гематита, в то время как реактив Тамма в сильно восстановительных условиях в присутствии Fe(II) растворяет гетит и гематит почти полностью [4].

В почвах малой водородной западины II, как и в почвах границы большой западины I, отмечается повышение содержания свободного железа по сравнению с окружающим черноземом, особенно цитраторастворимого в горизонте В, хотя выраженность этого процесса меньше, поскольку западина маленькая и, вероятно, находится в начальной стадии формирования.

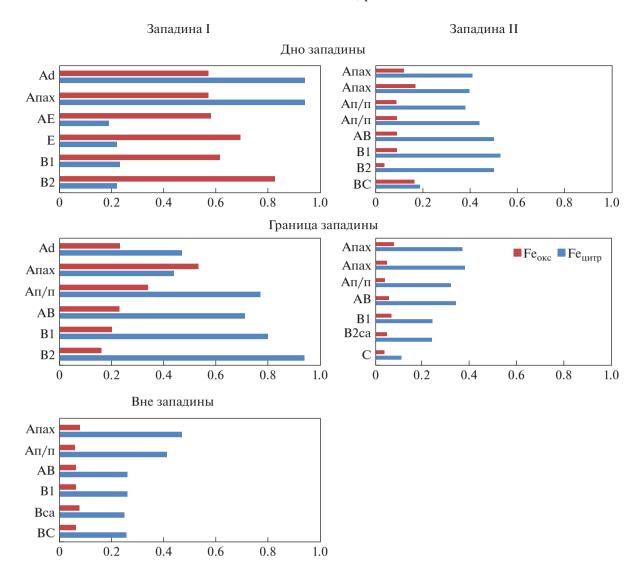


Рис. 5. Содержание цитрато- (вытяжка по Мера-Джексону) и оксалаторастворимого железа (вытяжка по Тамму) в почвах западин (% от почвы).

В целом, несмотря на нетрадиционное соотношение оксалато- и цитраторастворимого железа, наблюдаемого в большой западине I, в почвах, подвергающихся воздействию потока водорода, увеличивается содержание подвижного железа, следовательно, процесс химического выветривания породы происходит более интенсивно. Это отличает их от временно переувлажненных черноземов без воздействия глубинного водородного потока, где содержание подвижных оксидов железа почти такое же, как в зональных черноземах [2].

Нужно отметить, что встречаются работы, в которых описаны почвы со свойствами такими же, как и в нашем исследовании. Например, в работах Зайдельмана подробно изучены почвы в неглубоких округлых западинах на плоской равнине в районе распространения черноземов выще-

лоченных в 10 км от города Рязани [9, 12]. Почвообразующей породой являются лёссовидные карбонатные тяжелые суглинки, подстилаемые на глубине 3-4 м мощной толщей аллювиальных песков. По свойствам почвы этих западин близки к исследованным в настоящей работе. Они характеризуются повышенным содержанием гумуса по сравнению с окружающими черноземами. При этом верхний гумусовый горизонт осветлен — коэффициент отражения ρ_{Σ} верхнего горизонта фонового чернозема составляет 15.7, а в западине существенно повышается до 25.3%. Почвы западин промыты от карбонатов и имеют кислую реакцию по всему профилю, близкую по значениям, как и в нашем случае, к дерново-подзолистым почвам. Авторы считают временное избыточное переувлажнение единственной причиной формирования таких свойств.

Необычные особенности почв округлых западин Рязанского стационара заставили нас внимательно изучить обстановку, в которой они формируются. Участки с этими западинами расположены на территории крупнейшего Пачелмского авлакогена (глубинного разлома, перекрытого толшей осадочных пород) в центральной части Русской плиты. В настоящее время он сейсмически активен и, следовательно, на этой территории можно было ожидать проявлений дегазации и потока эндогенного водорода [8]. Действительно, полевые измерения в июне 2017 г. на западинах Рязанского стационара, описанных в работах [9, 12], показали концентрацию водорода в западинах на глубине 120 см в 50 раз больше, чем за пределами западины в окружающем черноземе и в атмосферном воздухе.

Таким образом, понятно, что почвы в округлых западинах, расположенных на территории Пачелмского разлома, находятся не только под воздействием временного избыточного переувлажнения. Кроме гидрологического фактора почвы испытывают пульсирующее действие и водородного флюида.

В модельных опытах [11] по влиянию длительного и кратковременного переувлажнения чернозема пресными водами с добавлением и без добавления сахарозы окислительно-восстановительный потенциал снижается, но его значения не опускаются ниже -250~MB. Авторами [11] показано, что соотношение ГК и ФК в этом модельном опыте в варианте без добавления сахарозы практически не меняется.

Молекулярный водород в ходе прохождения через почву снижает окислительно-восстановительный потенциал в почве до крайне низких значений (до -650 мВ) [14, 22]. А в таких условиях возможна трансформация органического вещества в сторону увеличения фульватности и подвижности [15]. Поэтому в составе гумуса почв переувлажненных западин Рязанского стационара наблюдается снижение количества ГК в горизонте А1А2 и увеличение содержания ФК, особенно в кутанах и педной массе горизонта B1_g, куда направлен сток подвижной части гумуса [9]. Такая же закономерность наблюдается и в наших водородных западинах на территории Хоперского разлома. Но степень проявления этого процесса здесь гораздо сильнее — содержание ФК в составе гумуса больше (в 2-5 раз и более) количества ГК. Судя по данным полевой водородометрии и анализу космических снимков, это связано с тем, что потоки водорода на этой территории гораздо интенсивнее, плотность западин очень высокая и выраженность их на пашне яркая, в то время как район отличается более засушливым климатом, чем Рязанская область.

Возникает проблема с названием исследованных в настоящей работе почв, подвергающихся воздействию эндогенного водорода. Такие почвы в ряду от автоморфных до полугидроморфных в силу своего генезиса и свойств не могут быть причислены к имеющимся в классификациях типам, поскольку в их образовании vчаствует новый фактор — поток водорода сильный восстановитель. Возможно, они могут входить в ансамбль почв с названием, предложенным Зайдельманом с соавт. [12], - черноземовидные разной степени оподзоливания и оглеения, в которых на интенсивный дерновый процесс накладываются подзолистый процесс и глеевый. Однако в этом случае необходима дальнейшая дифференциация почв на более низкие иерархические классификационные уровни с учетом не только степени гидроморфизма, но и интенсивности водородного потока.

Следует отметить, что в отличие от черноземов обыкновенных исследуемые почвы отличаются неблагоприятными экологическими условиями. Это сказывается на прочностных свойствах агрегатной структуры, состоянии микробного сообщества [33, 36, 37]. Кроме того, воздействие водородного потока отрицательно влияет на состояние сельскохозяйственных культур — приводит к гибели посевов на автоморфных участках (неоднократно наблюдали в Воронежской и Рязанской областях) и в результате вымочки и воздействия водорода в полугидроморфных вариантах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Причиной деградации чернозема обыкновенного в условиях эндогенного потока водорода является установление восстановительного режима, который приводит к трансформации гумуса, накоплению в почве агрессивных фульвокислот, сильному подкислению почвенного профиля, несвойственному ряду полугидроморфных почв степной зоны, удалению карбонатных новообразований, резкому осветлению гумусового горизонта, увеличению подвижного железа. Эти процессы могут происходить в аэробных условиях, исключающих застой влаги в поверхностных горизонтах почв, как в западине II. В этом случае недостаточно агента переноса (воды, почвенных растворов) почвенного материала, и подвижные продукты трансформации почв остаются на месте. При выраженности западин в рельефе (западина I), когда в ансамбль факторов добавляется пульсирующее переувлажнение, то есть застойный режим чередуется с промывным, восстановительные условия усиливаются. В почве реализуется массоперенос подвижных компонентов, в результате которого происходит дифференциация почвенного профиля, наблюдаются яркие признаки оподзоливания и оглеения, вызванные двумя факторами — временным избыточным переувлажнением и током водорода.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Описание разрезов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Ахтырцев А.Б.*, *Самойлова Е.М.* Влияние гидроморфизма на распределение, накопление и состав гумуса в почвах лесостепи // Вестник Моск. ун-та. 1983. Сер. 17, почвоведение. С. 3–10.
- 2. *Безуглова О.С., Назаренко О.Г.* Генезис и свойства мочаристых почв Предкавказья // Почвоведение. 1998. № 12. С. 1423—1430.
- 3. *Бельчикова Н.П.* Некоторые закономерности содержания, состава гумуса и свойств гуминовых кислот в главнейших группах почв Союза ССР // Тр. Почв. ин. им. В.В. Докучаева. 1951. Т. XXXVIII. С. 33–58.
- 4. *Водяницкий Ю.Н.* Химия и минералогия почвенного железа. М., 2003. 238 с.
- 5. *Гришина Л.А*. Гумусообразование и гумусное состояние почв. М., 1986. 242 с.
- Джиндил А.Р. О влиянии орошения на состав и содержание гумуса южных черноземов Одесской области // Агрохимия. 1974. № 10. С. 106—109.
- 7. Дмитраков Л.М., Самойлова Е.М. Гумус луговых почв лесостепи // Почвоведение. 1973. № 9. С. 56–62.
- 8. Ефременко М.А. Современные геодинамически активные зоны Воронежского кристаллического массива по геологическим, геофизическим и сейсмологическим данным. Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. н. М., 2011. 23 с.
- 9. Зайдельман Ф.Р. Генетические особенности и морфология черноземовидных подзолистых оглееных почв северной лесостепи // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2005. № 2. С. 3–8.
- Зайдельман Ф.Р. Морфоглеегенез. Его визуальная и аналитическая диагностика // Почвоведение. 2004. № 4. С. 389—398.
- 11. Зайдельман Ф.Р., Давыдова И.Ю. Причины ухудшения химических и физических свойств черноземов при орошении неминерализованными водами // Почвоведение. 1989. № 11. С. 101—108.
- 12. Зайдельман Ф.Р., Степанцова Л.В., Никифорова А.С., Красин В.Н., Сафронов С.Б., Красина Т.В. Генезис и деградация черноземов Европейской России под влиянием переувлажнения // Способы защиты и мелиорации. М., 2013. 350 с.
- 13. Зайдельман Ф.Р., Тюльпанов В.И., Ангелов Е.Н., Давидов А.И. Почвы мочарных ландшафтов формирование, агроэкология и мелиорация. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 159 с.

- 14. *Канивец В.И*. Взаимодействие водорода, метана и сероводорода с минеральной частью почвы // Почвоведение. 1970. № 5. С. 52–59.
- 15. *Кауричев И.С., Орлов Д.С.* Окислительно-восстановительные процессы и их роль в генезисе и плодородии почв. М.: Колос, 1982. 247 с.
- Кононова М.М. Органическое вещество почвы. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 314 с.
- 17. Ларин В.Н. Наша Земля. М.: Агар, 2005. 247 с.
- 18. *Орлов Д.С.* Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 323 с.
- 19. *Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И.* Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 254 с.
- 20. *Орлов Д.С.*, *Гришина Л.А*. Практикум по химии гумуса. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 271 с.
- 21. *Перевозчиков Г.В.* Поле водорода на месторождении ГАЗЛИ по данным геохимических исследований в нефтегазоносном регионе Средней Азии // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2012. Т. 7. С. 1—13.
- 22. Пискарев И.М., Ушканов В.А., Аристова Н.А., Лихачев П.П., Мысливец Т.С. Установление окислительно-восстановительного потенциала воды, насыщенной водородом // Биофизика. 2010. Т. 55. Вып. 1. С. 19—24.
- Самойлова Е.М. Луговые почвы лесостепи. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 283 с.
- 24. *Суханова Н.И.*, *Кирюшин А.В.* Влияние потока глубинного водорода на химические свойства и гумусное состояние почв // Система Планета Земля. 2014. С. 195—200.
- 25. Суханова Н.И., Ларин Н.В., Кирюшин А.В. Влияние потока эндогенного водорода на химические свойства почв // Геополитика и экогеодинамика регионов. Периодическое издание Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. 2014. Т. 10. № 1. С. 214—220.
- 26. *Сывороткин В.Л.* Глубинная дегазация земли и глобальные катастрофы. М.: Геоинформцентр, 2002. 250 с.
- Сывороткин В.Л. Озоновые аномалии над Воронежем индикаторы глубинной дегазации // Материалы к литолог. совещ. "Литология и полезные ископаемые Центральной России", 3—8 июля 2000. С. 81—82.
- 28. *Тищенко С.А., Безуглова О.С.* Гумусовое состояние почв локально переувлажненных ландшафтов Нижнего Дона // Почвоведение. 2012. № 2. С. 156—165.
- 29. *Шестопалов В.М., Макаренко А.Н.* Поверхностные и приповерхностные проявления аномальной дегазации // Геологический журнал. 2013. № 3. С. 7—25.
- 30. Cardile C.M., Childs C.M, Whitton J.S. The effect of citrate/bicarbonate/ditionite treatment on standart and soil smectites by mossbauer spectroscopy // Austral. J. Soil Res. 1987. V. 25. № 2. P. 145–154.
- 31. *Hayes M.H.B.* Solvent systems for the isolation of organic component from soils // Soil Sci. Soc. Am. J. 2006. V. 70. № 3. P. 986–994.
- 32. Larin N., Zgonnik V., Rodina S., Deville E., Prinzhofer A., Larin V. Natural molecular hydrogen seepage associat-

- ed with surficial, rounded depressions on the European Craton in Russia // Natural Resources Research. 2014. N_2 5. P. 1–15.
- 33. *Polyanskaya L.M., Sukhanova N.I., Chakmazyan K.V.*Specific features of the structure of microbial biomass in soils of annular mesodepression in Lipetsk end Volgograd oblasts // Eurasian Soil Science. 2014. V. 47. № 9. P. 903–909.
- 34. *Polyanskaya L.M., Stepanov A.L., Chakmazyan K.V.*The impact of hydrogen emission on the structure of soil microbial biomass // Eurasian Soil Science. 2017. V. 50. P. 57–63.
- Prinzhofer A., Moretti, I., Françolin J. et al. Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins:

- The example of a Brazilian H 2 emitting structure // Int. J. Hydrogen Energy. 2019. V. 44. P. 5676–5685.
- 36. Sukhanova N.I., Trofimov S.Y., Polyanskaya L.M., Larin N.V., Larin V.N. Changes in the humus status and the structure of the microbial biomass // Eurasian Soil Science. 2013. V. 46. № 2. P. 135–144.
- 37. Sukhanova N.I., Zubkova T.A. State of organic matter and particularities of physicochemical properties of soils in the endogenous hydrogen seepage zones // Open J. Soil Sci. 2018. № 8. P. 186–196.
- 38. Zgonnik V., Beaumont V., Deville E. et al. Evidence for natural molecular hydrogen seepage associated with Carolina bays (surficial, ovoid depressions on the Atlantic Coastal Plain, Province of the USA) // Progress in Earth and Planetary Science. 2015. V. 2. P. 31.

Some Features of Chernozem Soils Formed in the Area of Khoper Deep Fault of the Terrestrial Crust

N. I. Sukhanova^{1, *}, S. Ya. Trofimov¹, A. L. Stepanov¹, and A. V. Kiryushin¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia *e-mail: vogudin@vandex.ru

Endogenous hydrogen fluid in the deep fault zones passing through the thickness of sedimentary rocks, forms on the surface rounded depressions and their clusters. The upper soil horizons in such depressions are lighter in color. The objects of this study were chernozemic soils in depressions in the places with high density of hydrogen yields in the area of the Khopersky deep fault (Voronezh oblast, Russian Federation). It is shown that ordinary chernozems (Haplic Chernozems) in the zones of local release of endogenous hydrogen change their properties owing to the reducing regime caused by the flow of hydrogen fluid. Soil acidity sharply increases, carbonate pedofeatures disappear, and the profile becomes completely leached of carbonates, the content of mobile iron increases. Against the background of increasing humus content, the humus horizon becomes lighter in color due to a sudden change in the composition of humus towards domination of fulvates. Soils lose fertility; the harvest in such areas may be reduced by 30–40%. In depressions with a temporary excess of moisture, reducing processes in soils are enhanced.

Keywords: ordinary chernozem, degassing, molecular hydrogen, humus

—— — БИОЛОГИЯ ПОЧВ ——

УЛК 631.417.2

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА МИНЕРАЛИЗУЕМОГО ПУЛА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В КРИОЗЕМАХ ТУНДР КОЛЫМСКОЙ НИЗМЕННОСТИ

© 2020 г. А. К. Ходжаева^{а, *}, А. В. Шатилович^а, С. В. Губин^а, А. В. Лупачев^а

^aИнститут физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, ул. Институтская, 2, Пущино, 142290 Россия *e-mail: akho2@rambler.ru

Поступила в редакцию 15.05.2019 г. После доработки 04.07.2019 г. Принята к публикации 20.09.2019 г.

Процессы криогенного массообмена влияют на содержание и распределение органического вещества в профилях криоземов, обогащая им минеральные горизонты. Показано, что минерализационная способность преобладающей части органического вещества криоземов, даже при оптимальных условиях температуры и влажности, низкая. Несмотря на значительное варьирование содержания микробной биомассы, сохраняется общая закономерность ее распределения по профилю, с максимумами в верхних органогенных горизонтах и резким уменьшением в минеральных. Доля углерода микробной биомассы от валового органического вещества по всему профилю криоземов не превышает 1%. Величина дыхательного коэффициента (Q_r) варьирует в пределах от 0.1 до 0.3. Наиболее значимое влияние на содержание микробной биомассы и изменение ее дыхательной активности в профилях криоземов оказывают содержание $C_{\rm opr}$, $N_{\rm ofm}$ и количество пор и пустот.

Ключевые слова: Cryosol, многолетняя мерзлота, потенциально-минерализуемое органическое вещество, микробная биомасса

DOI: 10.31857/S0032180X20020070

ВВЕДЕНИЕ

Почвы тундровых экосистем — один из наиболее значимых наземных резервуаров углерода, длительное время аккумулирующих органическое вещество в своих профилях [22, 24]. По оценкам Щепаченко с соавт. [19] средние запасы органического углерода в подстилке и метровом слое тундровых почв России составляют 17.83 кг С/м2 или 48.1 Пг С. Значительные запасы углерода в этих почвах обусловлены слабой биохимической трансформацией органических остатков из-за повышенной влажности, низких летних температур профилей, краткости периода их оттаивания, состава растительного опада. Все это создает условия для медленного разложения растительных остатков и накопления в почве слабогумифицированного органического вещества [23]. Наряду с трансформацией и аккумуляцией грубого органического вещества в поверхностных горизонтах почв тундр, часть его в ходе активного криомассообмена заносится в минеральные части профилей, где продолжает трансформироваться и может накапливаться в надмерзлотных горизонтах [3, 4, 11, 25, 26]. В поверхностных органогенных и органо-минеральных горизонтах профилей криоземов содержание Сорг

достигает 5–15%, а в криотурбированных минеральных горизонтах -5-8% [3].

Климатические изменения последних десятилетий способны оказать существенное влияние на аккумуляцию углерода тундровыми почвами, а в случае реализации сценария масштабного потепления — существенно усилить микробиологическую деструкцию в них органического вещества [9]. Для количественного прогноза вклада тундровых почв в глобальную эмиссию диоксида углерода необходимо располагать данными, характеризующими способность к биодеградации органического вещества. В настоящее время имеются фрагментарные сведения о содержании потенциально-минерализуемого органического вещества в почвах тундровой зоны европейской части России [14, 15].

Цель работы — определение минерализационной способности органического вещества, содержания микробной биомассы и дыхательной активности криоземов с признаками активного заноса грубого органического материала в центральные части профилей.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Изучали криоземы типичные (Turbic Cryosols) и торфяно-криоземы (Turbic Histic Cryosols),

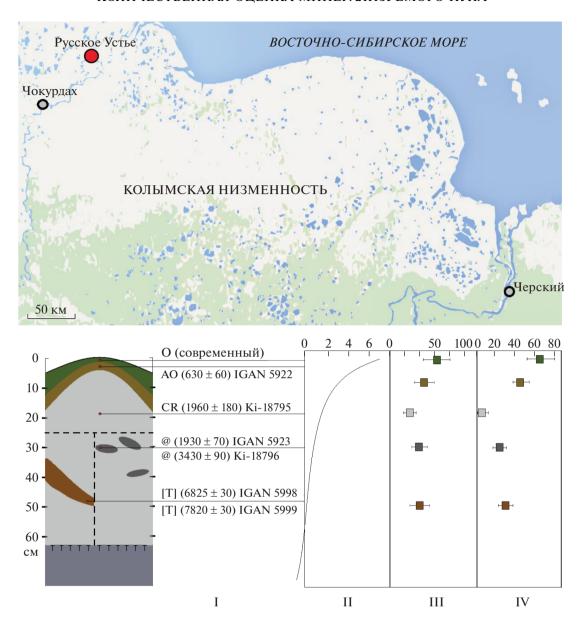


Рис. 1. Схема строения профилей криоземов и их гидротермические и физические свойства. I — возраст органического вещества криоземов; II — среднелетняя температура, $^{\circ}$ C; III — весовая влажность, %; IV — количество пор и пустот в материале, %.

сформированные на водораздельных пространствах в арктической тундре в низовьях р. Индигирки (71°13′ N; 149°25′ E) (рис. 1). Все они характеризовались полноразвитыми профилями и признаками криотурбационного заноса в центральные части профилей фрагментов материала органогенных горизонтов в виде отдельных темных морфонов (@). Кроме того, исследовали криоземы, сформированные на склонах пологих увалов. В условиях активного проявления солифлюкции, здесь происходит сползание почвенного материала и погребение в профилях вновь формирующихся почв материала бывших поверхностных органогенных и органо-минеральных горизонтов

с сохранением морфологических признаков их исходного залегания.

Для исследования отбирали органогенный и органо-минеральный материал поверхностных горизонтов (O, AO), пылевато-суглинистый минеральный материал криотурбированных горизонтов (CR), а также образцы отдельных, находящихся в них органосодержащих морфонов криотурбированного (@) и погребенного в ходе солифлюкции торфяного материала ([Т]). Изучено 40 образцов из 7 профилей криоземов.

Аналитические исследования почвенных образцов выполняли в ЦКП ИФХиБПП РАН. Ва-

Горизонт	Глубина, см	C_{opr} , %	N _{общ} , %	C : N	ППП, %	pH_{H_2O}
О	0-6	24.8 ± 4.5	2.1 ± 0.3	13	42.3 ± 5.8	Не опр.
AO	6-12	9.0 ± 1.2	0.7 ± 0.1	16	19.5 ± 1.9	4.4
CR	12-63	3.3 ± 0.5	0.1 ± 0.04	48	7.3 ± 0.5	4.9
@	12-36	6.3 ± 0.4	0.4 ± 0.1	18	14.6 ± 1.1	5.2
[T]	36-63	17.0 ± 5.5	2.0 ± 0.8	10	31.1 ± 9.0	5.0

Таблица 1. Основные характеристики криозема

ловое содержание органического углерода ($C_{\rm opr}$) и общего азота ($N_{\rm o6m}$) в почвенных образцах определяли с помощью автоматического HCNS-анализатора Elementar Vario El III (Германия). Актуальную кислотность ($pH_{\rm H_2O}$) образцов измеряли потенциометрическим методом (pH-метр Sartorius Basic Meter PB-11, США). Потерю при прокаливании ($\Pi\Pi\Pi$) определяли по разности массы до и после прокаливания навески почвы в муфельной печи при $t=900^{\circ}{\rm C}$ в течение 1 ч [16].

Микростроение почв изучали с помощью оптического микроскопа ЦКП ИФХиБПП РАН Ахіоsсоре A1 с камерой Aхіосат MR5 (Германия). Подсчет площади, занимаемой пустотами в материале основных диагностических горизонтов криоземов и в отдельных морфонах, обогащенных грубым органическим материалом, выполняли в ходе микроморфологических исследований шлифов (n = 54), изготовленных по общепринятой методике [2].

Радиоуглеродное датирование образцов органического вещества почв проводили в ЦКП "Лаборатории радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии" Института географии РАН (образцы с индексом IGAN) и Киевской радиоуглеродной лаборатории ГНЦ радиогеохимии окружающей среды (образцы с индексом Ki).

Содержание потенциально-минерализуемого органического вещества (Спм) определяли биокинетическим методом [12]. Расчет содержания Спм проводили по кумулятивному количеству выделившегося $C-CO_2$ (мг/100 г) за 150 сут инкубирования (60% ППВ, 22°C), используя уравнение экспоненциальной регрессии, оценки которой находили методом, реализованным в программе Statistica 6.0 для нелинейной регрессии. Минерализационную способность почвенного органического вещества оценивали по отношению содержания потенциально-минерализуемого органического вещества к валовому органическому веществу. Рассчитывали углерод-минерализуюшую активность (УА = $C_{\text{пм}} k$, мг/(100 г сутки), где Спм - содержание потенциально-минерализуемого органического вещества, мг/100 г; k – константа скорости минерализации в сутки) и индекс стабильности ИС = $(C_{\text{орг}} - C_{\text{пм}})/C_{\text{пм}}$ почвенного органического вещества [13].

Определяли скорости дыхания микроорганизмов в необогащенных (базальное дыхание, $V_{\rm basal}$, мкг $C-CO_2/(\Gamma \, Y)$) и обогащенных (субстрат-индуцированное дыхание, $V_{\rm SIR}$, мкг С-СО₂/(г ч)) доступным субстратом (модельный субстрат – глюкоза) почвенных образцах. Скорость почвенного дыхания измеряли на газовом хроматографе ЦКП ИФХиБПП РАН "Кристаллюкс 4000М" (Россия). Коэффициент микробного дыхания (Q_r) рассчитывали по отношению $V_{\rm basal}$ к $V_{\rm SIR}$ [1]. Содержание углерода микробной биомассы (Смб) определяли методом субстрат-индуцированного дыхания (СИД), основанного на измерении дыхания почвы после ее обогащения глюкозой и последующем расчете величины $C_{M\delta}$ [21] по формуле: C_{MG} (мкг/г) = $40.04V_{SIR} + 0.37$. Измерения интенсивности почвенного дыхания выполняли в трех повторностях. Результаты измерений выражали как среднее ± стандартное отклонение. Полученные экспериментальные данные обрабатывали с использованием методов множественного регрессионного анализа. Статистическую обработку данных проводили с помощью программ Statistica 6.0 и PAST 3.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Условия формирования и основные характеристики строения криоземов

Формирование криоземов в тундрах протекает в условиях слабой теплообеспеченности и близкого залегания многолетнемерзлых пород (<1 м). Они развиваются в условиях мерзлотного нанорельефа на полигонах высотой 20—40 и 80—120 см в диаметре и относительно хорошей дренированности поверхности [4]. Строение профилей криоземов и их химические свойства в районе исследований, сложенном пылеватыми суглинками позднеплейстоценовых останцовых возвышенностей (едом), хорошо изучены [4, 6, 7, 11, 17]. Основные характеристики, исследуемых криоземов приведены в табл. 1. Важнейшей особенностью этих почв является активное участие в их формировании процессов криомассообмена, выраженное в пят-

нообразовании и перемещении материала органогенных горизонтов в минеральные части профилей. При быстром осеннем промерзании нанополигонов в их центральных частях резко возрастает криостатическое давление, и по образовавшимся трещинам на поверхность происходит излияние еще незамерзшего материала верхних частей минеральных горизонтов [4]. Перекрытый излившейся массой материал органогенных горизонтов опускается до глубины 10-20 см, где гидротермические условия резко отличаются от поверхностных. Уже через 3-5 лет это приводит к заметным нарушениям исходного залегания криотурбированного органического материала, обособлению отдельных его зон в органосодержащие морфоны (@), частичной деструкции в них органических остатков, смешиванию их с минеральным материалом, перераспределению и постепенному перемещению морфонов в центральные и нижние части профилей, где они, в ряде случаев, достигнув границы многолетней мерзлоты, постепенно накапливаются, образуя горизонты надмерзлотной аккумуляции грубого органического вещества (CRO) [3]. Краткость летнего периода и медленное оттаивание почв определяют различную длительность нахождения тех или иных частей профилей в режиме положительных температур, при этом большая их часть даже в периоды максимального оттаивания имеет температуру ниже 3°С. Влажность органогенных горизонтов и верхних частей горизонтов СК в период максимального оттаивания в значительной степени определяется погодными условиями летнего периода и превышает 25%, возрастая в надмерзлотной части профиля. Важно отметить, что в процессе оттаивания почв фронт увлажнения постепенно опускается вслед за границей оттаивания вниз и пополняет дефицит влаги в слое зимнего иссушения в средних частях профилей. В период максимального оттаивания влажность морфонов криотурбированного органо-минерального материала @ может на 5-15% превышать влажность вмещающего их минерального материала.

Другим исследуемым объектом являлся материал погребенных в ходе солифлюкции торфяных горизонтов ([Т]). На склонах различной крутизны, формирующиеся криоземы часто перекрываются сползающим по склону материалом. Мощность перекрывающей толщи может достигать 0.5—0.7 м. Таким образом, погребенные процессами солифлюкции горизонты почв находятся в зоне современного сезонного оттаивания в режиме центральных и надмерзлотных частей профилей современных почв. Погребенные горизонты часто сохраняют свою целостность, исходное залегание, основные морфологические показатели, включая хорошую сохранность растительных остатков. Они несколько уплотнены и практиче-

ски не содержат примесей перекрывающего их минерального материала.

Содержание валового и потенциально-минерализуемого органического вещества в криоземах

По содержанию валового органического углерода (Сорг) исследуемые горизонты, погребенные торфяные горизонты и криотурбированные морфоны криоземов образовали убывающий ряд: О (25%) > [T] (17%) > AO (9%) > @ (6%) > CR (до3%). Высокое содержание C_{opr} не только в верхних органогенных горизонтах криоземов, но и в минеральной толще, связано с процессами криогенного массообмена и солифлюкции. Поступающий с поверхности органический материал в ходе постепенного разрушения измельчается и в виде частично разложившегося детрита перераспределяется в составе горизонта СК. Это хорошо диагностируется при анализе его микроморфологического строения. Одновременно с этим, следует учитывать изначальную обогащенность мелкими растительными остатками позднеплейстоценовых пылевато-суглинистых отложений, которые являются почвообразующими породами исследуемых почв [5]. Наличие детрита определяет относительно высокое содержание Сорг в минеральных частях криоземов по сравнению с формирующимися на этой же территории глееземами, в которых процессы криотурбации отсутствуют или выражены намного слабее. В то же время процессы гумусообразования, идущие в верхних органогенных горизонтах, продуцируют подвижные органические вещества, способные к нисходящей миграции, обогащающей минеральные горизонты профилей [8, 11].

Определенный радиоуглеродным методом калиброванный возраст органического вещества в профилях криоземов показал, что наиболее древним является материал погребенного торфяного горизонта [Т]. Полученные для него две даты имеют разброс около 1 тыс. лет и соответствуют материалу нижней и верхней его частей, что позволяет считать этот отрезок времени периодом формирования горизонта, а время нахождения его в погребенном состоянии оценивать в 5-6 тыс. лет. Калиброванный возраст органического вещества криотурбированных морфонов из центральных частей профилей составлял 1930— 3430 лет, а вмещающего морфоны минерального горизонта CR – 1960 лет. Наиболее молодым является органический вещество современного горизонта AO - 630 лет.

Содержание $N_{\text{общ}}$ в профилях криоземов варьировало в пределах от 0.1 до 2.1%, резко уменьшаясь с глубиной. Отношение C:N в горизонтах с высоким содержанием $C_{\text{орг}}$ (O, AO, [T]) в сред-

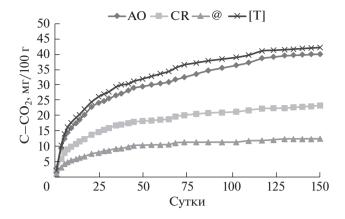


Рис. 2. Динамика кумулятивного продуцирования $C-CO_2$ при инкубировании в постоянных условиях температуры и влажности.

нем составляло 10—16. В криотурбированных морфонах (@) и в горизонтах СR отношение С: N составляло 18 и 48 соответственно. Отношение С: N > 30 свидетельствует о значительном дефиците азота в минеральной толще криоземов и замедлении процессов минерализации по сравнению с верхними органогенными горизонтами, погребенным торфяным горизонтом и криотурбированными органосодержащими морфонами.

По кумулятивным кривым продуцирования С-СО₂ (рис. 2) с использованием однокомпонентного уравнения кинетики первого порядка, были рассчитаны исходные содержания $\mathbf{C}_{\scriptscriptstyle{\Pi M}}$ в профилях криоземов (табл. 2). В верхних органо-минеральных горизонтах (AO) содержание $C_{\text{пм}}$ было наибольшим и в среднем составляло 86 мг/100 г. Вниз по профилю содержание $C_{\scriptscriptstyle \text{ПМ}}$ уменьшалось и в горизонтах CR в среднем было в 2 раза ниже, чем в горизонтах АО. Для сравнения: содержание валового органического углерода в горизонтах CR было в 5 раз ниже, чем в АО. В погребенном горизонте [Т] и криотурбированных морфонах @ содержание $C_{\text{пм}}$ не отличалось от такового в минеральных горизонтах СR. Доля $C_{\text{пм}}$ в $C_{\text{орг}}$ в профилях криоземов составила 0.3-1.4%. Было проведено сравнение полученных величин Спм с обобщенными данными для 200 почвенных образцов разных природных зон европейской части России, в которых содержание $C_{\mbox{\tiny IIM}}$ варьировало от 7 до 557 мг/100 г, что составило 0.5-13.4% от C_{opt} [15]. Авторы приведенной работы предлагают разделить полученный диапазон величин $C_{\text{пм}}$ (мг/100 г) на пять групп: с очень высоким содержанием (600-300), высоким (300-150), средним (150-75), низким (75-35) и очень низким (<35). Исходя из этого, минерализационная способность преобладающей части органического вещества минеральных горизонтов CR, погребенных торфяных горизонтов [Т] и криотурбированных морфонов @, даже при оптимальных условиях температуры и влажности, созданных в лабораторных условиях, является низкой, а в верхних органо-минеральных горизонтах АО - средней. Низкая интенсивность минерализации преобладающей части органического вещества криоземов может быть связана с его устойчивостью к разложению. В работе Ларионовой с соавт. [10] вероятной причиной устойчивости органического вещества тундровых почв к разложению рассматривается высокое содержание алкилов, наряду с ароматическими функциональными группами, способствующими низкой интенсивности деструкции органического вещества микроорганизмами.

Низкую минерализационную способность преобладающей части органического вещества криоземов подтверждают также полученные значения углерод-минерализующей активности (УА) и индексов стабильности (ИС). Значения УА варьировали от 1.1 до 4.3 мг/100 г с максимумом в AO и минимумом в CR. Несмотря на высокое содержание $C_{\rm opr}$ в [Т] и @, значения УА не отличались от таковых для CR, где содержание C_{opr} было в несколько раз ниже. Величины ИС органического вещества криоземов варьировали от 49 до 93. Самое высокое значение ИС получено для погребенных торфяных горизонтов, самое низкое – для минеральных. Аккумуляция органического вещества в почвенном профиле во многом зависит от условий его стабилизации [18]. Органический материал верхних органогенных горизонтов, в ходе процессов криогенного массообмена попавший в нижележащие слои, т.е. в условия, отличные от его формирования (большая длительность мерзлого состояния и краткость периода оттаивания по сравнению с верхними органогенными го-

Таблица 2. Содержание потенциально-минерализуемого органического вещества ($C_{\text{пм}}$), углерод-минерализующая активность (УА) и индекс стабильности (ИС) органического вещества криозема

Горизонт	Глубина, см	$C_{\text{пм}}$, мг/100 г	$\mathrm{C}_{\scriptscriptstyle \Pi \mathrm{M}}$, % от $\mathrm{C}_{\scriptscriptstyle \mathrm{opr}}$	УА, мг/100 г в сутки	ИС
AO	6-12	86 ± 7	1.0	4.3	86
CR	12-63	41 ± 9	1.4	1.1	49
@	12-36	42 ± 7	0.7	1.6	79
[T]	36–63	42 ± 2	0.3	1.2	93

ризонтами, а также недостаток кислорода при повышенной влажности и близость к слою многолетней мерзлоты), сохраняется в почвенном профиле длительное время (1.9-7.8 тыс. лет) и медленно трансформируется. По данным Абакумова с соавт. [20] состав гуминовых кислот, экстрагированных из поверхностных органогенных горизонтов, характеризовался повышенным содержанием алкильных компонентов, а в погребенных торфяных горизонтах и в криотурбированных морфонах - повышенным содержанием ароматических компонентов и, в целом, более высокой степенью окисленности. Содержание свободных радикалов было выше в органическом веществе поверхностных органогенных и органоминеральных горизонтов, чем в погребенных торфяных горизонтах и криотурбированных морфонах. Поэтому органическое вещество [Т] и @ центральных и надмерзлотных частей профилей криоземов имеет более высокую степень стабилизации, чем органическое вещество поверхностных органогенных горизонтов.

Содержание микробной биомассы и дыхательная активность почв

В профилях криоземов содержание $C_{M\delta}$ составляло 36-1804 мкг/г (табл. 3). Несмотря на значительное варьирование содержания микробной биомассы, сохранялась общая закономерность ее распределения по профилю, с максимумами в верхних органогенных горизонтах и резким сокращением в минеральных. Содержание Смб было в 16 (AO) и 50 (O) раз выше, чем в CR. В погребенном горизонте [Т], несмотря на высокие показатели C_{opr} и N_{obm} содержание C_{mb} было низким и в среднем составляло 183 мкг/г. Криотурбированные морфоны незначительно отличались от CR по содержанию C_{M6} . Доля C_{M6} , в C_{ODF} по всему профилю криоземов не превышала 1%. Таким образом, низкая минерализационная способность преобладающей части органического вещества криоземов, может быть связана не только с его химической устойчивостью, но и с малым содержанием микробной биомассы, сформировавшейся в условиях преобладания низких температур и повышенной влажности, как было показано для

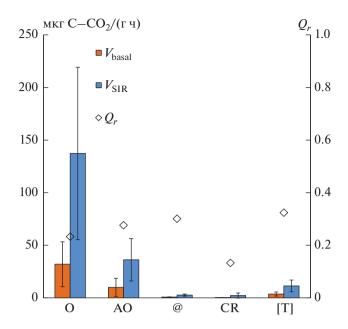


Рис. 3. Изменения показателей дыхательной активности микробного сообщества по профилю криозема.

торфяно-поверхностноглеевой почвы тундровой зоны Ларионовой с соавт. [10]. Доля $C_{\text{мб}}$ в $C_{\text{пм}}$ варьировала в пределах от 8.8 до 67.7%. Чем выше было содержание валового органического вещества в горизонтах и морфонах криоземов, тем большую долю в $C_{\text{пм}}$ составлял $C_{\text{мб}}$. Таким образом, значительную часть потенциально-минерализуемого органического вещества верхних органо-минеральных горизонтов криоземов составляла микробная биомасса.

Состояние микробоценоза в профилях криоземов оценивали по скорости базального ($V_{\rm basal}$), субстрат-индуцированного дыхания ($V_{\rm SIR}$) и коэффициенту микробного дыхания (Q_r), величина которого позволяет судить о подверженности почвенного микробного сообщества стрессовым воздействиям (рис. 3). Скорость базального дыхания так же, как содержание $C_{\rm opr}$ и $C_{\rm m6}$, была значительно выше в верхних органогенных горизонтах криоземов по сравнению с CR и @. В образцах погребенного торфяного горизонта [T] $V_{\rm basal}$ незначительно возрастала по сравнению с горизон-

Таблица 3. Содержание углерода микробной биомассы (C_{Mb}) в профиле криозема

Горизонт	Глубина, см	$C_{M\delta}$, мкг/г	${\rm C_{M\delta}},\%$ от ${\rm C_{opr}}$	$C_{M\delta}$, % от $C_{\Pi M}$
0	0-6	1804 ± 270	0.7	н.о.
AO	6-12	582 ± 149	0.6	67.7
CR	12-63	36 ± 15	0.1	8.8
@	12-36	43 ± 8	0.1	10.4
[T]	36–63	183 ± 91	0.1	43.7

Таблица 4. Регрессионные зависимости содержания микробной биомассы и ее дыхательной активности в профиле криозема от статистически значимых величин почвенных параметров

Горизонт	Y	Модель	Р	R^2
Весь профиль	Смб	Y = -492.2 + 24.9a + 22b	< 0.001	0.67
	$V_{ m basal}$	Y = -7.9 + 1.4a + 0.2b - 6.2c	< 0.001	0.78
	$V_{ m SIR}$	Y = -30.6 + 1.5a + 1.4b	< 0.001	0.67
O, AO	Смб	Y = -1192.4 + 31.1b + 557c	< 0.001	0.83
	Q_r	Y = 0.004 + 0.0001d	0.05	0.25
CR	Смб	Y = -79.8 + 24.2a + 0.74e	< 0.001	0.88
	Q_r	Y = 0.09 - 0.008b	0.05	0.54

Примечание. Y: C_{M6} — содержание углерода микробной биомассы, мкг/г; V_{basal} — скорость базального дыхания, мкг $C-CO_2/(\Gamma \, 4)$; V_{SIR} — скорость субстрат-индуцированного дыхания, мкг $C-CO_2/(\Gamma \, 4)$; Q_r — коэффициент микробного дыхания; P — уровень точности; R^2 — коэффициент детерминации. Почвенные параметры: a — содержание C_{opr} , %; b — количество пор и пустот, %; c — содержание $N_{oбш}$, %; d — влажность, %; e — отношение C: N.

том CR. Внесение легкодоступного органического субстрата в значительной степени увеличило дыхательную активность микробного сообщества криоземов. В горизонтах О и АО скорость дыхания увеличилась в 4, в @ и [Т] в 3, а в CR в 8 раз, что указывает на низкое качество органического вещества криоземов, сильно обедненных доступным для микроорганизмов субстратом. Величина Q_r в профилях криоземов варьировала от <0.1 до 0.3. Коэффициенты <0.1, полученные для горизонтов CR, подтверждают, что микробное сообщество здесь, помимо неблагоприятных гидротермических условий, испытывает недостаток в доступном для питания органическом веществе. Величины Q_r в интервале 0.1–0.2, характерные для почв естественных ценозов [1], получены для верхних горизонтов (О) и свидетельствуют о том, что микробное сообщество находится в относительно благоприятных для жизнедеятельности условиях. Величины Q_r выше 0.2—0.3, полученные для АО, [Т] и @, могут указывать на то, что на микроорганизмы здесь больше влияют неблагоприятные гидротермические условия, чем недостаток питательного субстрата.

Для определения степени влияния различных показателей на дыхательную активность микробного сообщества ($V_{\rm basal}$, $V_{\rm SIR}$ и Q_r) и содержание $C_{\rm m6}$ в профилях криоземов был проведен множественный регрессионный анализ (табл. 4). Расчеты выполняли как для всего массива данных, так и отдельно для органогенных и минеральных горизонтов, а также для криотурбированных и погребенных фрагментов органогенного материала. В качестве независимых переменных в уравнениях регрессии использовали показатели: $C_{\rm opr}$, $C_{\rm rm}$, $N_{\rm ofm}$, $C:N,\Pi\Pi\Pi$, весовую влажность почв, а также количество пор и пустот в почвенных горизонтах.

Наиболее значимыми показателями вариабельности значений $V_{\rm SIR}$ и ${\rm C}_{\rm m6}$ в профиле было из-

менение содержания $C_{\rm opr}$ и количество пор и пустот ($R^2 = 0.67; P < 0.001$), а величина $V_{\rm basal}$ положительно коррелировала с величинами $C_{\rm opr}, N_{\rm oбщ}$ и количеством пор и пустот ($R^2 = 0.78$; P < 0.001). Для верхних органогенных горизонтов выявлена значимая положительная зависимость величины $C_{\mbox{\tiny M}\delta}$ от содержания $N_{\mbox{\tiny Oбщ}}$ и количеством пор и пустот ($R^2 = 0.83$; P < 0.001), а для минеральных горизонтов — от содержания $C_{\text{орг}}$ и отношения C:N $(R^2 = 0.88; P < 0.001)$. Показатели влажности и количество пор и пустот объясняют 25 и 54% дисперсии коэффициента микробного дыхания (Q_r) в органогенных и минеральных горизонтах соответственно. Для криотурбированных пятен и горизонта [Т] статистически значимой зависимости содержания микробной биомассы и ее дыхательной активности от исследуемых почвенных показателей не выявлено.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процессы криогенного массобмена влияют на содержание и распределение $C_{\text{орг}}$ в профилях криоземов. Содержание потенциально-минерализуемого органического вещества в профилях криоземов варьирует в пределах от 41 до 86 мг/100 г, что составляет 0.3—1.4% от валового органического вещества. Даже при оптимальных условиях температуры и влажности, созданных в лабораторных условиях, минерализационная способность преобладающей части органического вещества криоземов остается низкой. Криоземы характеризуются значительным варьированием содержания микробной биомассы, но при этом сохраняется общая закономерность ее распределения по профилю, с максимумами в верхних органогенных горизонтах и резким уменьшением в минеральных. Доля $C_{\text{мб}}$ в $C_{\text{орг}}$ по всему профилю криоземов не превышает 1%. В солифлюкционно-погребенном торфянном горизонте содержалось больше $C_{\text{мб}}$, чем в минеральных горизонтах, но значительно меньше, чем в верхних органогенных, при высоком содержании $C_{\text{орг}}$ и $N_{\text{общ}}$. Доля $C_{\text{мб}}$ в $C_{\text{пм}}$ варьировала в пределах от 9 до 68%. Наибольшей долей микробной биомассы в минерализуемом пуле почвенного органического вещества характеризовались органо-минеральные горизонты AO, а наименьшей — CR.

Величина дыхательного коэффициента (Q_r) в профилях криоземов варьировала от <0.1 до 0.3. Значения Q_r < 0.1 получены для минеральных горизонтов, 0.1—0.2 — для верхних горизонтов (O), а >0.2 — для горизонтов АО, [T] и @. Множественный регрессионный анализ полученных данных показал, что наиболее значимое влияние на содержание микробной биомассы и ее дыхательную активность в органогенных и минеральных горизонтах криоземов оказывают содержание $C_{\rm opr}$, $N_{\rm ofin}$ и количество пор и пустот в почве.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Госзадания AAAA-A18-118013190181-6 (0191-2019-0044), ПП AAAA-A18-118013190182-3 и при поддержке грантов РФФИ № 17-04-01397, 19-04-00125.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Благодатская Е.В., Ананьева Н.Д., Мякшина Т.Н.* Характеристика состояния микробного сообщества почв по величине метаболического коэффициента // Почвоведение. 1995. № 2. С. 205—210.
- 2. Гагарина Э.И. Микроморфологический метод исследования почв. СПб: Изд-во СПб. ун-та, 2004. 155 с
- 3. *Губин С.В., Лупачев А.В.* Надмерзлотные горизонты аккумуляции грубого органического вещества в криоземах тундр Севера Якутии: генезис, диагностические признаки и свойства, проблемы классификации. // Почвоведение. 2018. № 7. С. 1–11. https://doi.org/10.1134/S0032180X18070043
- 4. *Губин С.В., Лупачев А.В.* Роль пятнообразования в формировании и развитии криоземов приморских низменностей севера Якутии // Почвоведение. 2017. № 11. С. 1283—1295. https://doi.org/10.7868/S0032180X17110077
- Губин С.В. Динамика формирования тундровых неглеевых почв // Почвоведение. 1993. № 10. С. 62-70.
- 6. *Еловская Л.Г., Петрова Е.И., Тетерина Л.В.* Почвы Северной Якутии. Новосибирск: Наука, 1979. 303 с.
- 7. *Караваева Н.А.* Тундровые почвы Северной Якутии. М.: Наука, 1969. 208 с.

- Караваева Н.А., Таргульян В.О. Об особенностях распределения гумуса в тундровых почвах Северной Якутии // Почвоведение. 1960. № 12. С. 36–45.
- 9. *Кудеяров В.Н.* Дыхание почв и биогенный сток углекислого газа на территории России (аналитический обзор) // Почвоведение. 2018. № 6. С. 643—658. https://doi.org/10.7868/S0032180X18060011
- 10. Ларионова А.А., Золотарева Б.Н., Колягин Ю.Г., Квиткина А.К., Каганов В.В., Кудеяров В.Н. Состав структурных фрагментов и интенсивность минерализации органического вещества в почвах зонального ряда // Почвоведение. 2015. № 10. С. 1232—1241. https://doi.org/10.7868/S0032180X15100068
- 11. *Мергелов Н.С., Таргульян В.О.* Процессы накопления органического вещества в минеральной толще мерзлотных почв приморских низменностей Восточной Сибири // Почвоведение. 2011. № 3. С 275—287
- 12. Семенов В.М., Кравченко И.К., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Семенова Н.А., Гисперт М., Пардини Дж. Экспериментальное определение активного органического вещества в некоторых почвах природных и сельскохозяйственных экосистем // Почвоведение. 2006. № 3. С. 282—292.
- 13. Семенов В.М., Тулина А.С. Сравнительная характеристика минерализуемого пула органического вещества в почвах природных и сельскохозяйственных экосистем // Агрохимия. 2011. № 12. С. 53—63.
- 14. Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Семенова Н.А., Тулина А.С. Минерализуемость органического вещества и углеродсеквестрирующая емкость почв зонального ряда // Почвоведение. 2008. № 7. С. 819—832.
- 15. Семенов В.М., Когут Б.М., Зинякова Н.Б., Масютенко Н.П., Малюкова Л.С., Лебедева Т.Н., Тулина А.С. Биологически активное органическое вещество в почвах европейской части России // Почвоведение. 2018. № 4. С. 457—472.
- Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Воробъевой Л.А. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
- 17. *Фоминых Л.А.* Особенности почвообразования в Колымских тундрах // Почвоведение. 1997. № 8. С. 917—925.
- 18. *Ходжаева А.К., Семенов В.М.* Распределение активного органического вещества в профиле почв природных и сельскохозяйственных экосистем // Почвоведение. 2015. № 12. С. 1496—1504.
- 19. *Щепаченко Д.Г., Мухортова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.Ф.* Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123—132. https://doi.org/10/7868/S0032180X13020123
- Abakumov E.V., Lupachev A.V., Andreev M. Trace elements content in soils of the King-George and Elephant islands, Maritime Antarctica // Chemistry and Ecology. 2017. https://doi.org/10.1080/02757540.2017.1384821
- 21. *Anderson J.P.E., Domsch K.H.* A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // Soil Biol. Biochem. 1978. V. 10. P. 215–221.

- Bockheim J.G., Tarnocai C. Recognition of cryoturbation for classifying permafrost-affected soil // Geoderma. 1998. V. 81. P. 281–293.
- 23. Hobbie S.E., Schimel J.P., Trumbore S.E., Randerson J.R. Controls over carbon storage and turnover in high-latitude soils // Global Change Biology. 2000. № 6. P. 196–210.
- Hugelius G., Strauss J., Zubrzycki S., Harden J. W., Schuur E.A.G., Ping C.L., Schirrmeister L., Grosse G., Michaelson G.J., Koven C.D., O'Donnell J.A., Elberling B., Mishra U., Camill P., Yu.Z., Palmtag J., Kuhry P. Esti-
- mated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps // Biogeosciences. 2014. № 11. P. 6573–6593.
- 25. *Michaelson G.J.*, *Dai X.Y.*, *Ping C.L.* Organic matter and bioactivity in Criosoils of Arctic Alaska // Cryosois. Ed. Kimble J.M. 2004. P. 463–477.
- Ping C.L., Bockheim J.G., Kimble J.M., Michaelson G.J. Caracteristics of criogenic soil along a latitudinal transect in Arctic Alaska // J. Geophy. Res. 1998. V. 103. P. 917–928.

Quantification of Mineralizable Pool of Organic Matter in Tundra Cryosols of Kolyma Lowland

A. K. Khodzhaeva^{1, *}, A. V. Shatilovich¹, S. V. Gubin¹, and A. V. Lupachev¹

¹Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science RAS, Pushchino, 142290 Russia *e-mail: akho2@rambler.ru

The cryogenic mass-exchange processes affect the content and distribution of organic matter in Cryosol profiles enriching the mineral subsoil with organic matter. It is shown that the mineralization ability of most organic materials in Cryosols is low, even under optimum conditions of temperature and moisture. Despite the significant variation of microbial biomass content, the general pattern of its distribution in the profile is preserved, with maximum in organic horizons and a minimum in the mineral ones. The part of the microbial biomass carbon (C_{mb}) in the total organic carbon is less than 1%. The microbial respiration coefficient (Q_r) varies from less than 0.1 to 0.3. The most significant influence on the microbial biomass and changes in its respiratory activity in the profiles of Cryosols has the content of TOC, TN and soil porosity.

Keywords: tundra, Cryosol, cryoturbation, permafrost, potentially mineralizable organic matter, microbial biomass

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УЛК 631.427.4:504.064

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ "КОНТУРНОГО ЗАВОДНЕНИЯ" В МИКРОКОСМАХ

© 2020 г. Т. Н. Щемелинина^a, Е. М. Анчугова^a, *, Е. М. Лаптева^a, Р. С. Василевич^a, М. Ю. Маркарова^a, Е. Н. Глазачева^b, М. В. Успенская^b

^а Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, ул. Коммунистическая, 28, Сыктывкар, 167982 Россия

^bСанкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Кронверкский пр-т, 49, Санкт-Петербург, 197101 Россия

*e-mail: anchugova@ib.komisc.ru
Поступила в редакцию 25.04.2019 г.
После доработки 05.07.2019 г.
Принята к публикации 24.09.2019 г.

Представлены результаты моделирования комплексной биотехнологии "контурного заводнения" для очистки сильнозагрязненной нефтью агродерново-подзолистой почвы (Albic Retisols (Loamic)) при помощи бактериально-дрожжевого консорциума, микроводорослей и альго-бактериальнодрожжевого консорциума с применением минеральных удобрений. Выявлены закономерности изменения биотических показателей и содержания нефтепродуктов на различных этапах деструкции нефти в микрокосмах. Показано, что изменения численности углеводородокисляющих микроорганизмов в изучаемых микрокосмах (микроэкосистемах) имеют различную направленность в зависимости от внесенного биологического агента. При внесении микроводорослей численность данной группы микроорганизмов снижается на порядок в конце эксперимента, а при внесении бактериально-дрожжевого и альго-бактериально-дрожжевого консорциума – восстанавливает численность к 90 суткам. Биохимическая активность в микрокосмах оставалась на высоком уровне во всех случаях. Показана эффективность использования нефтеокисляющих микробных консорциумов, в том числе с применением культур микроводорослей. Бактериально-дрожжевой и альго-бактериальнодрожжевой консорциумы в присутствии минеральных добавок оказывают максимальный эффект очистки при моделировании технологии в микрокосмах. Эффективность очистки почвы от нефтепродуктов за 90 суток лабораторного эксперимента составила 60-63%. Данные ИК-спектроскопии диагностируют уменьшение доли насыщенных алифатических структур, накопление ароматических углеводородов и кислородсодержащих соединений, которые являются промежуточными продуктами метаболизма при микробном окислении углеводородов нефти.

Ключевые слова: нефтяное загрязнение, альго-бактериально-дрожжевой консорциум, биологическая активность, эффективность очистки

DOI: 10.31857/S0032180X20020112

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время отсутствуют универсальные методы очистки почв от нефти и нефтепродуктов (НП) [14, 23]. В зависимости от масштаба загрязнения, качества и количества поллютантов (нефти и нефтесодержащих жидкостей), биоклиматических условий территории, особенностей почвенного покрова осуществляется дифференцированный подход к проведению биоремедиационных мероприятий [6, 10, 15, 33]. В ряде работ [7, 14] предложены технологии, направленные на очистку почв, которые либо обусловлены незначительными по масштабам нефтеразливами, либо достигаются проведением технического этапа очистки нефтезагрязненных земель, включающего механическую уборку нефти и НП [21]. Физи-

ческие методы удаления загрязнений не способствуют восстановлению почв и могут нанести дополнительный ущерб окружающей среде [38]. Химическая обработка нефтезагрязненных почв путем экстракции растворителями или окислением оказывает влияние на изменение агрохимических характеристик почв, а также химические показатели грунтовых вод [28, 40].

Огромный потенциал и конкурентные преимущества по сравнению с вышеперечисленными способами имеет метод биоремедиации, прежде всего, из-за экологической безопасности и низкой стоимости [25]. В предлагаемых технологиях очистки нефтезагрязненной почвы *in situ* используют внесение биопрепаратов совместно с сорбентами или без них [13]. В условиях севера, где в силу специфики

Таблица 1. Схема проведения эксперимента

T							
Вариант		Суспензия консорциума					
	$N_{15}P_{15}K_{15}$	бактериально- дрожжевого*	микрово- дорослей**				
Контроль	_	_	_				
I	+	_	_				
II	+	+	_				
III	+	_	+				
IV	+	+	+				

^{*} Штаммы микроорганизмов *Rhodotorula* sp., *P. libanensis*, 1:1, $50~{\rm cm}^3; 10^9~{\rm KOE/cm}^3$.

биоклиматических условий широко распространены заболоченные ландшафты, оптимальны технологии, предусматривающие предварительную глубокую очистку водоемов и заболоченных территорий от нефти и НП путем уборки подвижной нефти с последующим внесением минеральных удобрений и биопрепаратов [30]. Существуют технологии, предусматривающие активизацию десорбции нефти на поверхность путем насыщения воды кислородом, где в процессе аэрации очистка происходит наиболее эффективно, заводнение зоны загрязнения создается естественным или искусственным путем с помощью дамб и отсыпок [8, 14].

Существующая проблема утилизации персистентных загрязнений предполагает разработку новых технологий очистки, в том числе с применением ассоциаций микроорганизмов, которые составляют основу биопрепаратов. Состав биопрепаратов, представляемых на российском рынке, различен – от одного ("Путидойл", "Аллегро", "Торнадо", "Лидер", "Родер" и др.) до 3-15 штаммов микроорганизмов ("Экойл", "Олеворин", "Деворойл", "Биоойл", "ВиО", "Универсал", "Биотрин", "Рага-Вас" и др.). Такие биопрепараты, как "Биоойл-СН", "Биоойл-АА", в состав которых входят штаммы углеводородокисляющих микроорганизмов (**УОМ**) из родов Enterobacter, Acinetobacter и Bacillus [2, 24], используются в настоящее время в производственных масштабах для очистки в условиях Крайнего Севера нефтезагрязненных почв и водных объектов совместно с торфосорбентами и сорбентами на основе графена [1]. Микробная ассоциация, состоящая из штаммов родов Rhodococcus, Pseudomonas, Acinetobacter и содержащая катаболические плазмиды, является основой биопрепарата "ВиО" [30] для биоремедиации загрязненных нефтью и НП почвенных и водных экосистем, способна к деструкции углеводородов нефти в диапазоне температур 4-42°C при концентрации ее в природных средах до 30%, присутствии солей до 5% и величине рН от 4 до 10. Эффективность опытного образца биопрепарата "ВиО" в полевых испытаниях по очистке грунта от нефти на территории Пограничного месторождения Ямало-Ненецкого автономного округа составила 80%. В основном представленные биопрепараты включают штаммы бактерий и дрожжей. Исследования биорекультивации с помощью комплекса микроорганизмов, в состав которых входят микроводоросли [27], немногочисленны и требуют дальнейшего изучения.

Внедрение новых технологий в практику природопользования требует детального анализа процессов, лежащих в основе биотрансформации поллютантов в природной среде. В частности, необходима оценка процессов биоокисления нефти и НП на разных этапах ремедиации нефтезагрязненных почв. Особого внимания требуют вопросы разработки методологических подходов к контролю экологического состояния биотических и абиотических компонентов восстанавливаемых экосистем. С этой целью могут быть использованы показатели содержания в почвах окислительно-восстановительных ферментов, углеводородокисляющих микроорганизмов, остаточного содержания НП.

Цель работы — разработка эффективной комплексной биотехнологии очистки сильнозагрязненных нефтью почв на основе оценки закономерностей динамики индикационных параметров.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Изучение эффективности деструкции нефти консорциумом углеводородокисляющих микроорганизмов проводили в лабораторном эксперименте. В качестве основных деструкторов использовали штаммы *Rhodotorula* sp. VKM Y-2993D, *Pseudomonas libanensis* VKM B-3041D, выделенные из нефтезагрязненных почв Усинского района Республики Коми, а также штаммы микроводорослей *Acutodesmus obliquus* IPPAS S-2016, *Chlorella* sp. IPPAS C-2024, *Monoraphidium* sp., *Anabaena* sp. из коллекции SykoA Института биологии Коми НЦ УрО РАН [18].

В лабораторных условиях создали микрокосмы (микроэкосистемы): в вегетационные сосуды помещали минеральный субстрат массой 0.5 кг и загрязняли его высокой концентрацией нефти (30 мас. %). В качестве субстрата использовали образцы пахотного горизонта агродерново-подзолистой почвы (Albic Retisols (Loamic)). В емкости с почвой добавляли минеральные соли (азотно-калийно-фосфорное удобрение NPK-15). тщательно перемешивали, затем вносили биологические агенты (бактерии, дрожжи и микроводоросли, выращенные раздельно) в соответствии со схемой, представленной в табл. 1. Технологию "контурного заводнения", когда предварительно гидроизолированный загрязненный участок за-

^{**} Микроводоросли A. obliquus, Chlorella sp., Monoraphidium sp., Anabaena sp., в равных долях, 50 cm^3 ; 10^8 KOE/cm^3 .

полняют водой, моделировали добавлением в микрокосмы воды объемом 1 дм³. Слой воды, располагающийся над поверхностью минерального субстрата, аэрировали с помощью компрессора Tetratec APS 400. Лабораторный эксперимент проводили в трехкратной повторности при комнатной температуре. Продолжительность эксперимента составила 90 сут.

Изменение биологической активности почвы (минерального субстрата) оценивали по динамике численности УОМ и активности окислительно-восстановительных ферментов. Численность УОМ определяли методом высева на твердую среду Раймонда 10-кратных разведений почвенных суспензий [17]. Активность фермента каталазы оценивали перманганатным методом, дегидрогеназную активность определяли на основе колориметрического определения формазана [32]. Дегидрогеназную активность водной суспензии исследовали в соответствии с методикой ВНИИ ВОДГЕО [22].

Все полученные результаты по величине ферментативной активности сводили к расчетному показателю среднего геометрического *GMea* [36]:

$$GMea = \sqrt{Cat \cdot Deh},$$

где GMea — среднее геометрическое ферментативной активности; Cat — каталаза; Deh — дегидрогеназа.

Относительные баллы для показателей ферментативной активности *Cat* и *Deh* рассчитывали по формуле Девятовой [9]. Например, для показателей каталазной активности расчет вели по формуле:

$$Cat = \frac{Cat_{\Phi}}{Cat_0},$$

где Cat — относительный оценочный балл показателя; Cat_{Φ} — фактическое значение показателя, см 3 0.1 М KMnO $_4$ на 1 г сухой почвы за 20 мин; Cat_0 — значение показателя в незагрязненной почве, см 3 0.1 М KMnO $_4$ на 1 г сухой почвы за 20 мин.

Аналогично рассчитывали значение относительного оценочного балла для показателей дегидрогеназной активности.

Микроскопирование образцов проводили с помощью микроскопа Nikon Eclipse80i при увеличении до ×1000, оборудованного системой дифференциального интерференционного контраста и видеофиксации изображений. Микрофотографии выполнены с помощью камер Nikon Digital Sight Ds-2Mv (Nikon, Japan).

Интенсивность деструкции нефти оценивали по изменению содержанию НП в образцах почв [16] и водной среды. Содержание НП определяли гравиметрическим методом, экстрагируя НП из образцов почв и водной среды хлороформом.

ИК-спектроскопию образцов почв проводили после их высушивания, тщательного перемешивания и измельчения в ступке до однородного состояния. Измельченный образец помещали на приставку НПВО (кристалл ZnSe с алмазным напылением) ИК-спектрометра Tensor 37 фирмы Bruker (Германия). ИК-спектры поглощения каждого образца снимали в трех различных участках, перемещая его по столику приставки НПВО в трех повторностях. ИК-съемку проводили в спектральном диапазоне $600-4000 \text{ см}^{-1}$ при разрешении 2 см-1, число сканирований 32. ИКспектры подвергали процедуре коррекции базовой линии. Для качественной и количественной идентификации компонентного состава нефти использовали следующие спектральные коэффициенты [11, 26]:

 $C_1 = D_{1608}/D_{723}$ — условное отношение ароматических углеводородов к нормальным парафиновым структурам (коэффициент ароматичности);

 $C_2 = D_{1608}/D_{1460}$ — условное содержание ароматических структур, т.е. отношение ароматических к сумме парафиновых углеводородов;

 $C_3 = D_{2852}/D_{1608}$ — условное содержание парафиновых структур, т.е. отношение интенсивности валентных колебаний метиленовых групп к сумме ароматических углеводородов;

 $C_4 = D_{723}/D_{1460}$ — условное содержание парафиновых структур, т.е. отношение нормальных парафиновых структур к сумме парафиновых углеводородов (индекс разветвленности);

 $C_5 = (D_{723} + D_{1380})/D_{1608}$ — условное содержание насыщенных алифатических структур (индекс алифатичности);

 $C_6 = (D_{1705})/D_{1608}$, $C_7 = (D_{1730})/D_{1608}$ — отношение интенсивности образования продуктов окисления углеводородов к сумме ароматических углеводородов (коэффициенты окисленности).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Биологическая активность в микрокосмах

Согласно теории индуцированного синтеза ферментов Кошланда [29], в ответ на присутствие в среде специфического субстрата или метаболита микроорганизмы вырабатывают соответствующие ферменты, что необходимо клетке для подготовки и усвоения труднодоступных источников питания. Окислительно-восстановительные ферменты: дегидрогеназа и каталаза — синтезируются микроорганизмами. Их присутствие в почве характеризует общую метаболическую активность почвенных микробных сообществ. Дегидрогеназа принимает непосредственное участие в биохимическом окислении углеводородов [20], а свободный кислород, образующийся при разложении перекиси водорода в присутствии фермента ката-

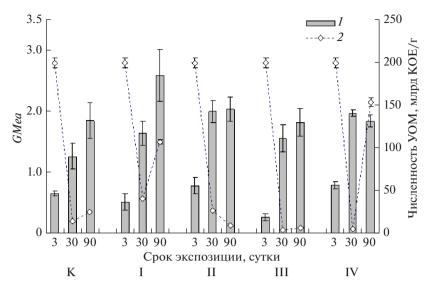


Рис. 1. Изменение величины расчетного показателя среднего геометрического ферментативной активности (*1*) и динамика численности углеводородокисляющих микроорганизмов (*2*) в образцах почв исследуемых микрокосмов. Номера вариантов приведены в соответствии с табл. 1.

лазы, способствует активизации деятельности микроорганизмов, участвующих в процессах деструкции углеводородов. Изменение каталазной активности в этом случае коррелирует с изменением численности нефтеокисляющих микроорганизмов [12].

Изучение содержания в микрокосмах нефтеокисляющих микроорганизмов показало, что вне зависимости от варианта опыта во всех микрокосмах динамика численности УОМ имела сходную картину (рис. 1). В первые дни эксперимента во всех образцах почв, включая контроль, наблюдалась высокая концентрация УОМ ($2 \times 10^9 \text{ KOE/r}$). По всей видимости, это обусловлено введением в почвы микрокосмов специфического субстрата нефти. Массированное нефтяное загрязнение сопровождается острым токсическим действием на микробные сообщества, что обусловливает подавление жизнедеятельности микроорганизмов и преимущественное присутствие в почвенной среде микроорганизмов из группы УОМ. Как видно, численность данной группы к 30-му дню эксперимента резко (на порядок) снижается и либо остается на этом уровне до конца эксперимента (контроль, варианты II и III), либо возрастает (варианты I и IV). Последнее может свидетельствовать о более выраженной адаптации микробоценозов к сложившимся условиям в варианте без внесения консорциума микроорганизмов, но при наличии стимулирующего для развития аборигенной микрофлоры фактора (внесение NPK) — вариант I, и с внесением дополнительного количества углеводородокисляющих микроорганизмов в присутствии микроводорослей — вариант IV.

Оценка параметров биохимической активности образцов почв в микрокосмах показала, что

каталазная активность в них варьировала в пределах от 0.71 до 2.23 см³ КМпО₄/г почвы за 20 мин, дегидрогеназаная — от 3.08 до 47.27 мг формазана/г за 24 ч. При этом минимальные показатели ферментативной активности были отмечены во всех вариантах опыта в первый срок отбора. В ходе эксперимента произошло возрастание каталазной активности. На 30-е сут эксперимента во всех вариантах опыта она увеличилась в 1.1—2.8 раза и сохранялась на этом уровне до конца срока экспозиции микрокосмов.

Для дегидрогеназной активности также отмечено увеличение в ходе эксперимента. В зависимости от варианта опыта она увеличилась относительно первого срока отбора (3 дня экспозиции) в 1.2—6.7 раза. Однако в отличие от каталазной активности к концу эксперимента (90 дней экспозиции) степень обогащенности образцов почв ферментом дегидрогеназой либо возрастала (контроль, варианты I и III), либо снижалась (варианты II и IV) относительно второго срока отбора проб (30 дней экспозиции).

Следует отметить, что с течением времени взаимосвязь между этими показателями в микрокосмах меняется: при трехдневном сроке экспозиции корреляция между каталазной и дегидрогеназной активностью в микрокосмах оценивалась как средняя (r = 0.5), спустя месяц экспозиции слабая (r = 0.4), к концу трехмесячного срока коэффициент корреляции между этими показателями имел нулевое значение. Для адекватной интерпретации параметров и направленности биохимических реакций в почвах используют интегральные показатели, позволяющие учесть эти изменения. Таким интегральным показателем может быть величина среднего геометрического ферментативной

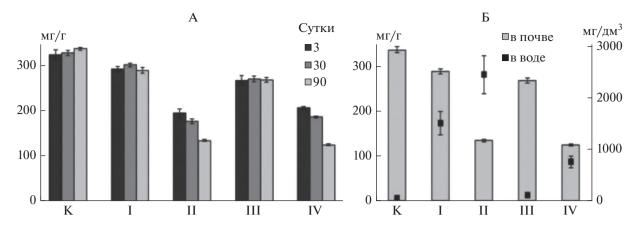


Рис. 2. Динамика содержания нефтепродуктов в микрокосмах: A - B почве (мг/г) в разные сроки эксперимента; B - B почве (мг/г) и в водной среде (мг/100 см³) спустя 90 сут эксперимента: B - B контроль; B - B контроль; B - B контроль; B - B контроль B - B контро

активности *GMea* [5, 35]. Как видно (рис. 1), несмотря на близкий порядок численности УОМ во всех микрокосмах, зафиксированный на третьи сутки эксперимента, по ферментативной активности их минеральные субстраты несколько различались. Минимальные значения расчетного показателя *GMea* отмечены в контроле и вариантах I и III, максимальные — в вариантах II и IV, т.е. где в качестве биологических агентов нефтеокисления введены бактериально-дрожжевой и альго-бактериально-дрожжевой консорциумы. Снижение численности УОМ в ходе эксперимента не привело к подавлению окислительно-восстановительных процессов в микрокосмах. Спустя месячный срок экспозиции во всех микрокосмах наблюдалось возрастание величины *GMea* по сравнению с контролем, а спустя три месяца – только в вариантах опыта I, II и IV. Таким образом, биохимическая активность в микрокосмах оказалась на высоком уровне в случае совместного введения в систему микроводорослей и бактериально-дрожжевого консорциума микроорганизмов (вариант IV), отдельного внесения бактериально-дрожжевого консорциума (вариант II) и стимуляции аборигенного микробного сообщества биофильными компонентами (вариант I).

Эффективность очистки от НП в микрокосмах

Влияние комплекса микроорганизмов на процессы деструкции НП в лабораторном эксперименте оценивали по динамике изменений содержания НП в почве микрокосмов на третьи сутки, спустя месяц и спустя 3 мес. Как показали проведенные исследования (рис. 2A), в контрольном варианте содержание НП в почве за все время эксперимента практически не изменилось. Все различия в концентрации нефти на третьи, 30- и 90-е сут экспозиции были не существенны для 0.05% уровня значимости.

Внесение только одних минеральных удобрений (вариант I) в загрязненную почву привело к стимуляции аборигенной микрофлоры снижению содержания НП за весь период экспозиции на 10.5%, минеральных удобрений в сочетании с введением в систему микроводорослей (III) — на 20.3%. Биологические агенты — бактериальнодрожжевой (II) и альго-бактериально-дрожжевой (IV) консорциумы — в комплексе с минеральными удобрениями оказались наиболее эффективными в очистке почвы от НП. Уменьшение содержания НП в почве вариантов II и IV составило за 90 сут эксперимента соответственно 60 и 63%.

При анализе процессов, происходящих в микрокосмах в результате взаимодействия биологических агентов с НП, особое внимание следует уделить вопросу десорбции углеводородов из загрязненной почвы в водную среду. Дегидрогеназная активность, определяемая в пробах воды, покрывающей слой минерального субстрата и аэрируемой в течение всего срока проведения эксперимента напрямую зависела от содержания НП в воде микрокосмов (рис. 2Б, 3). В микрокосмах II и IV, благодаря жизнедеятельности микроорганизмов происходило эффективное снижение содержания НП в почве за счет их десорбции в водную среду, где отмечено более большое количество НП по сравнению с контролем. Однако при сравнении соотношения НП в почве и воде вариант IV отличался от варианта II большей эффективностью очистки почвы. Более низкие значения содержания НП могут свидетельствовать об активной нефтедеструкции в водной фазе микрокосма варианта IV за счет комплексного действия микроорганизмов, входящих в состав альго-бактериально-дрожжевого консорциума, и процессов дегидрирования. Увеличение в почве варианта IV к концу экспозиции показателя *GMea*, характеризующего уровень ферментативной активности биотического комплекса, и численности УОМ может свидетельство-

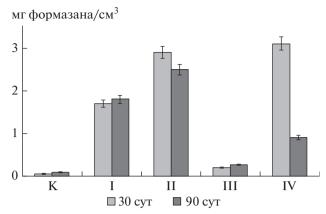


Рис. 3. Динамика дегидрогеназной активности в образцах воды, покрывающей поверхность минерального субстрата в микрокосмах эксперимента.

вать об определенных сукцессионных изменениях в их составе, способствующих активизации процессов деструкции НП в присутствии штаммов микроорганизмов *Rhodotorula* sp., *P. libanensis* и микроводорослей *A. obliquus*, *Chlorella* sp., *Monoraphidium* sp., *Anabaena* sp. Самоочищение почвы (контрольный микрокосм) будет проходить значительно дольше, чем при внесении биологических агентов.

Теоретическое обоснование возможности десорбции нефти биосурфактантами, выделяемыми микроорганизмами, основано на двух гипотезах. Первая состоит в том, что биосурфактанты, как и синтетические поверхностно-активные вещества (ПАВ), образуют мицеллы [39, 42], с помощью которых часть углеводородов, сорбированная на почвенной матрице, может быть отделена от твердой фазы [34]. Вторая гипотеза основана на представ-

лении о гидрофобном характере строения внутренней среды мицелл, которые образуют молекулы биосурфактантов, что определяет растворимость неполярных соединений, в том числе нефтеуглеводородов [4, 37]. По всей видимости, оба процесса могут способствовать более эффективному отделению углеводородов нефти от твердой фазы (почв, минеральных субстратов, донных отложений) в загрязненных нефтью природных экосистемах.

В проведенном эксперименте отмечен эффект эмульгирования и десорбции НП в водную среду (рис. 2Б), связанный с деятельностью внесенных в микрокосмы микроорганизмов. Подтверждение эффекта десорбции наблюдали при микроскопирование проб воды из микрокосмов, которое показало наличие клеток бактерий, дрожжей (варианты II, IV) и микроводорослей (вариант IV), делящихся на диспергированной нефти (рис. 4).

Оценка трансформации НП методом ИК-спектроскопии

ИК-спектроскопия является информативным и чувствительным методом, позволяющим проведение оценки утилизации углеводородов и трансформации функциональных групп в процессе деструкции органических соединений нефти [3, 26]. Анализ ИК-спектров исходной незагрязненной почвы, почвы, подвергнутой загрязнению нефтью (контроль) и нефти показал, что влияние нефти проявляется в почве в виде увеличившихся по интенсивности полос поглощения валентных колебаний -C-H в группах CH_2 и CH_3 (2950, 2920, 2850 см $^{-1}$) и деформационных колебаний -C-H (1460 и 1380 см $^{-1}$). В длинноволновой области спектра наблюдаются полосы погло-

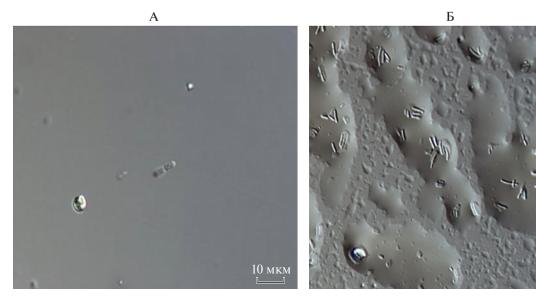


Рис. 4. Клетки микроводорослей, бактерий и дрожжей в образцах воды из микрокосма (A) и нефтяной пленки (Б) (вариант IV) (фото Е.Н. Патовой).

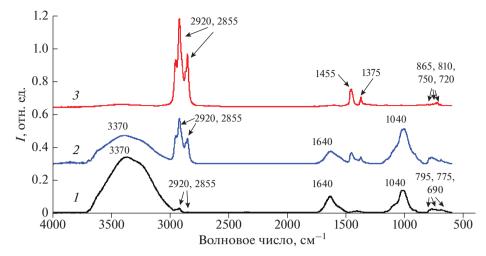


Рис. 5. ИК-спектры незагрязненной почвы (1), почвы, загрязненной нефтью (контроль) (2) и нефти (3).

щения, которые сложно разделить. Скорее всего, они относятся к связям свойственным гумусовым кислотам [19, 41], так как их массовая доля в почве очень велика. К таким полосам поглощения относятся 873 см⁻¹ (—С—Н внеплоскостные колебания, которые могут свидетельствовать о 1,2,4-замещении в ароматическом кольце), $796 \text{ см}^{-1} \text{ (-C-H}$ внеплоскостные колебания в метазамещенном ароматическом кольце), 743 cm^{-1} (-C-H внеплоскостные колебания в ортозамещенном ароматическом кольце), 725-720 см⁻¹ (маятниковые колебания группы CH_2), 692 см⁻¹ (либо = C-Hсвязь в алкенах, либо –С–Н внеплоскостные колебания в монозамещенных ароматических кольцах). На спектральные характеристики почвы, загрязненной нефтью, сильное влияние оказывает присутствие полосы 1600 см⁻¹, свойственной колебаниям -С-Н в ароматическом кольце, обусловленное, в основном, гумусовыми кислотами в почве, а также линии оксида кремния (полоса поглощения 1020 см^{-1}). Это оказывает значительные ограничения в использовании данного метода при оценке изменения состава НП в процессе биодеструкции (рис. 5).

Показателями биодеградации нефти служат изменения спектральных коэффициентов (соотношений оптических плотностей характеристических полос поглощения), рассчитанных из ИКспектров. Использование спектральных коэффициентов нивелирует мешающее влияние почвенных компонентов (доля которых в процессе эксперимента остается постоянной) на характеристические полосы поглощения компонентов нефти.

На рис. 6 представлены зависимости интенсивности линии колебаний связи C=O в карбоксильных группах (A) и 1730 см^{-1} — колебание связи C=O в альдегидах или сложных эфирах (Б) в зависимости от длительности биодеградации.

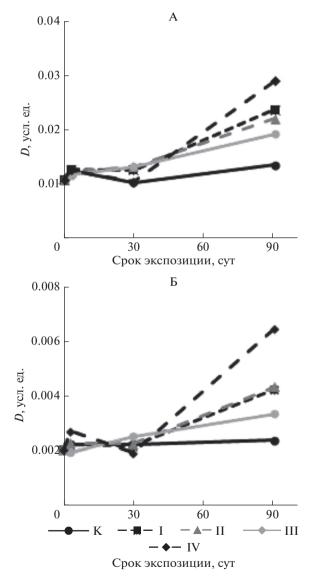


Рис. 6. Изменение интенсивности полос 1705 (A) и 1730 см $^{-1}$ (Б) в зависимости от времени биодеструкции.

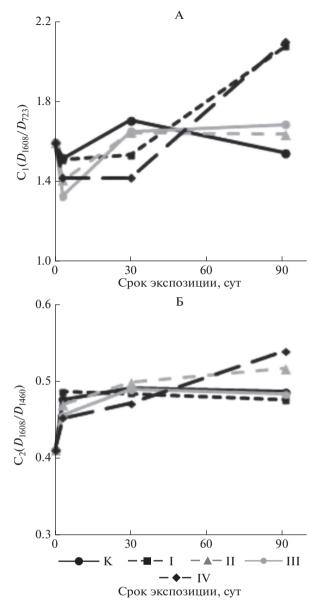


Рис. 7. Изменение спектральных коэффициентов C_1 (A) и C_2 (Б) в зависимости от времени биодеструкции.

Интенсивность данных линий на трехнедельном интервале не показывает роста и резко возрастает спустя 90 сут биодеградации для всех исследованных вариантов по сравнению с контролем. В результате наблюдается рост количества кислородсодержащих остаточных компонентов нефти, которые являются промежуточными продуктами метаболизма при микробном окислении углеводородов нефти [26, 31]. Аналогичные закономерности проявляются при анализе спектральных коэффициентов окисленности углеводородов С₆ и С₇, обнаруживающие значительный рост через 90 сут эксперимента. Наиболее интенсивный процесс окисления углеводородов в почве наблюдается для

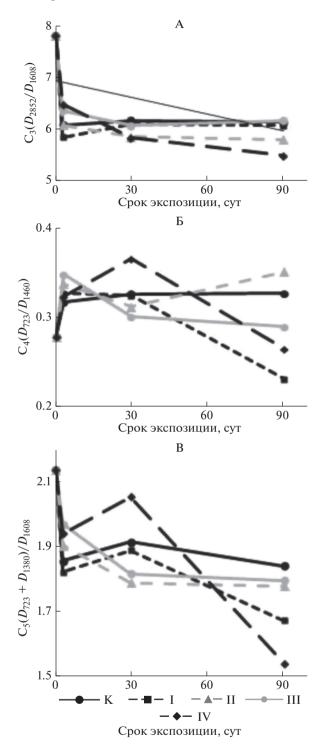


Рис. 8. Изменение спектральных коэффициентов C_3 (A), C_4 (Б), C_5 (В) в зависимости от времени биодеструкции.

варианта IV. Вероятно, микроорганизмы-нефтедеструкторы окисляют углеводороды только по боковой цепи, не раскрывая ароматического кольца [7].

В процессе биодеструкции нефти происходит увеличение спектральных коэффициентов C_1 и C_2 ,

указывающих на увеличение относительной доли устойчивых ароматических углеводородов (рис. 7). Рост степени ароматичности исследованных проб сопровождается уменьшением доли насыщенных алифатических структур (уменьшение C_3 и C_5). В процессе ферментативного окисления НП также увеличивается показатель разветвленности парафиновых углеводородов (C_4) (рис. 8). Указанные процессы протекают наиболее активно в почве варианта IV с применением альго-бактериальнодрожжевого консорциума.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что наиболее эффективными биоремедиантами нефтезагрязненных субстратов являются бактериально-дрожжевой (*Rhodotorula* sp., *Pseudomonas libanensis*) и альго-бактериальнодрожжевой (*Rhodotorula* sp., *Pseudomonas libanensis*, *Acutodesmus obliquus*, *Chlorella* sp., *Monoraphidium* sp., *Anabaena* sp.) консорциумы. Эффективность очистки почвы от НП за 90 сут проведения эксперимента составила 60–63%.

Численность углеводородокисляющих микроорганизмов существенно изменялась в ходе эксперимента. Будучи высокой в начале эксперимента, численность данной группы микроорганизмов снижалась на порядок в связи с острым токсическим действием нефти, а затем в вариантах I и IV численность УОМ возрастала, что указывает на адаптацию микробоценоза к сложившимся условиям и ускорению процесса биодеградации.

Отмечен эффект эмульгирования и десорбции НП в водную среду из почвы, связанный с деятельностью внесенных в микрокосмы микроорганизмов. Данные ИК-спектроскопии диагностируют уменьшение доли насыщенных алифатических структур и накопление устойчивых ароматических углеводородов и остаточных компонентов нефти, которые являются промежуточными продуктами метаболизма при микробном окислении углеводородов нефти.

Полученные данные позволяют рекомендовать использование альго-бактериально-дрожжевого консорциума с минеральными добавками в комплексе с технологией "контурного заводнения" и насыщения кислородом водной фазы с помощью аэрирующих устройств для очистки нефтезагрязненных почв. Такая технология позволит в короткие сроки снизить нагрузку нефтяных углеводородов на наземные экосистемы с высокой степенью загрязнения почв нефтью.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность ведущему научному сотруднику отдела флоры и растительности Се-

вера с научным гербарием Института биологии Коми НЦ УрО РАН к. б. н. Е.Н. Патовой за помощь при проведении микроскопирования образцов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Государственного задания "Разработка биокаталитических систем на основе ферментов, микроорганизмов и растительных клеток, их иммобилизованных форм и ассоциаций для переработки растительного сырья, получения биологически активных веществ, биотоплива, ремедиации загрязненных почв и очистки сточных вод" (АААА-А17-117121270025-1) и проекта УрО РАН "Микробные сообщества криогенных почв как основа стабильного функционирования наземных экосистем Арктики и Субарктики в условиях меняющегося климата и антропогенного воздействия" (АААА-А17-117122190039-0).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Адаменко Л.С., Алексеев А.Ю. Забелин В.А., Филатов Д.А., Шаршов К.А., Шестопалов А.М. Метод
 утилизации нефтяных разливов с водной поверхности с применением сорбента на основе мультиграфена и микробного препарата в условиях, приближенных к естественным // Экологический
 вестник России. 2014. № 3. С. 32—34.
- 2. Алексеев А.Ю., Смородина Е.А., Адаменко Л.С., Емельянова Е.К., Забелин В.А., Ильичева Т.Н., Резников В.А., Шестопалов А.М. Подбор ассоциации микроорганизмов-деструкторов нефтяной фракции твердых алканов при низких положительных температурах // Современные проблемы науки и образования. 2011. № 6. http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=4939
- 3. *Алтунина Л.К.*, *Сваровская Л.И.*, *Филатов Д.А*. Влияние света, трансформированного фотолюминесцентными пленками, на деструктивную активность микроорганизмов нефтезагрязненных почв // Оптика атмосферы и океана. 2012. № 11. С. 1014—1018.
- Анчугова Е.М., Маркарова М.Ю., Щемелинина Т.Н.
 Эффективность и экологические аспекты применения растворов поверхностно-активных веществ для разделения фаз механических примесей и нефти из нефтешламов // Известия Самарского НЦ РАН. 2009. Т. 11(1). С. 202—207.
- 5. Анчугова Е.М., Мелехина Е.Н., Маркарова М.Ю., Щемелинина Т.Н. Подходы к оценке методов рекультивации нефтезагрязненных почв // Почвоведение. 2016. № 2. С. 257—260.
- 6. *Аренс В.Ж., Гридин О.М., Яншин А.Л.* Нефтяные загрязнения: как решить проблему // Экология и промышленность России. 1999. № 9. С. 33—36.
- 7. Водяницкий Ю.Н., Трофимов С.Я., Шоба С.А. Перспективные подходы к очистке почв и почвенно-

- грунтовых вод от углеводородов (обзор) // Почвоведение. 2016. \mathbb{N} 6. С. 755–764.
- 8. Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И. Предупреждение и ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов М.: Ин-октаво, 2005. С. 315.
- 9. Девятова Т.А. Биоэкологические принципы мониторинга и диагностики загрязнения почв // Вестник Воронежского гос. ун-та. Сер. Химия. Биология. Фармация. 2005. № 1. С.103—106.
- 10. Емельянова Е.К., Алексеев А.Ю., Мокеева А.В., Тарасова М.В., Шестопалов М.А., Карпова Е.В., Забелин В.А., Шестопалов А.М., Ильичева Т.Н. Биорекультивация загрязненных объектов в Тюменской области // Вестник НГУ. Сер. Биология, клиническая медицина. 2010. Т. 8. № 4. С. 155—161.
- 11. *Иванова Л.В., Кошелев В.Н., Буров Е.А., Стоколос О.А.* Применение ИК-спектрометрии в исследовании нефтей // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина. 2010. № 2. С. 76—80.
- 12. *Исмаилов Н.М.* Нефтяное загрязнение и биологическая активность почв // Добыча полезных ископаемых и геохимия природных экосистем. М.: Наука, 1982. С. 227—235.
- 13. *Костенков Н.М., Ознобихин В.И.* Особенности биоремедиации нефтезагрязненных почв вусловиях Северного Сахалина // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. Т. 8. № 2. С. 224—227.
- 14. Маганов Р.У., Маркарова М.Ю., Муляк В.В., Загвоздкин В.К., Заикин И.А. Природоохранные работы на предприятиях нефтегазового комплекса. Ч. І. Рекультивация загрязненных нефтью земель в Усинском районе Республики Коми. Сыктывкар, 2006. 208 с.
- 15. *Маслов М.Н., Маслова О.А., Ежелев З.С.* Микробиологическая трансформация органического вещества в нефтезагрязненных тундровых почвах после рекультивации // Почвоведение. 2019. № 1. С. 70—78. https://doi.org/10.1134/S0032180X19010106
- 16. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в пробах почв на анализаторе жидкости "Флюорат-02". ПНД Ф 16.1.21-98. М., 1998. 15 с.
- 17. Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Звягинцева Д.Г. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. 304 с.
- 18. Новаковская И.В., Патова Е.Н. Коллекция живых штаммов микроводорослей Института биологии Коми НЦ УрО РАН и перспективы ее использования // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2012. № 2(10). С. 36—41.
- 19. Патраков Ю.Ф., Счастливцев Е.Л., Мандров Г.А. Изучение буроугольных гуминовых и фульвокислот методом ИК-спектроскопии // Химия твердого топлива. 2010. № 5. С. 9–14.
- 20. *Пиковский Ю.И*. Трансформация техногенных потоков нефти в почвенных экосистемах // Восстановление нефтезагрязненных почвенных экосистем. М.: Наука, 1988. С. 7—22.

- 21. Подавалов Ю.А. Экология нефтегазового производства. М.: Инфра-Инженерия, 2010. 175 с.
- 22. Роговская П.И., Оргианская Ф.Е. Рекомендации по методам производства анализов на сооружениях биохимической очистки промышленных сточных вод. М.: Стройиздат, 1970. 104 с.
- 23. *Рогозина Е.А.* Актуальные вопросы проблемы очистки нефтезагрязненных почв. Нефтегазовая геология. Теория и практика. www.ngtp.ru.
- 24. Розанова М.С., Мыльникова О.И., Кляйн О.И., Филиппова О.И., Холодов В.А., Листов Е.Л., Куликова Н.А. Оценка эффективности растворов гуминовых препаратов как промывных агентов для нефтезагрязненных почв и торфа в условиях модельного эксперимента // Почвоведение. 2018. № 9. С. 1160—1166.
 - https://doi.org/10.1134/S0032180X18090101
- 25. *Руденко Е.Ю*. Влияние отходов пивоварения на ферментативную активность нефтезагрязнённой чернозёмной почвы // Теоретическая и прикладная экология. 2011. № 3. С. 60–64.
- 26. Сваровская Л.И., Филатов Д.А., Гэрэлмаа Т., Алтунина Л.К. Оценка степени биодеструкции нефти методами ИК- и ЯМР ¹Н-спектроскопии // Нефтехимия. 2009. Т. 49(2). С. 153—158.
- 27. *Сопрунова О.Б.* Использование цианобактериального комплекса для ремедиации нефтезагрязненных сред // Биотехнология. 2006. № 5. С. 52—56.
- 28. Трофимов С.Я., Караванова Е.И. Жидкая фаза почв: учебное пособие по некоторым главам курса химии почв. М.: Университетская книга, 2009. 111 с.
- 29. *Фершт Э*. Структура и механизм действия ферментов. М.: Мир, 1980. 432 с.
- 30. Филонов А.Е., Петриков К.В., Якшина Т.В., Пунтус И.Ф., Власова Е.П., Нечаева И.А., Самойленко В.А. Режимы раздельного и совместного культивирования микроорганизмов-деструкторов нефти родов *Pseudomonas* и *Rhodococcus* // Биотехнология. 2008. № 6. С. 80–85.
- 31. *Фонкен Г., Джонсон Р.* Микробиологическое окисление. М.: Мир, 1976. С. 82.
- 32. *Хазиев Ф.Х.* Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с.
- 33. Aitken C.M., Jones D.M., Maguire M.J., Gray N.D., Sherry A., Bowler B.F.J., Ditchfield A.K., Larter S.R., Head I.M. Evidence that crude oil alkane activation proceeds by different mechanisms under sulfate-reducing and methanogenic conditions // Geochim. Cosmochim. Acta. 2013. V. 109. P. 162–174. https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.01.031
- 34. Allen C.C.R., Boyd D.R., Hempenstall F. Contrasting effects of a nonionic surfactant on the biotransformation of polycyclic aromatic hydrocarbons by soil bacteria // Appl. Environ. Microbiol. 1999. V. 65. P. 1335–1339.
- Comino F., Aranda V., García-Ruiz R., Ayora-Cañada M.J., Domínguez-Vidal A. Infrared spectroscopy as a tool for the assessment of soil biological quality in agricultural soils under contrasting management practices // Ecological Indicators. 2018. V. 87. P. 117–126. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.046
- 36. *Gao Y.-C.*, *Wang J.-N.*, *Xu J.-B.*, *Kong X.*, *Zhao L.*, *Zeng D.-H.* Assessing the quality of oil-contaminated sa-

- line soil using two composite indices // Ecological Indicators. 2013. V. 24. P. 105–112. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.06.005
- 37. *Grimberg S.J., Stringfellow W.T., Aitken M.D.* Quantifying the biodegradation of phenanthrene by *Pseudomonas stutzeri* P16 in the presence of a nonionic surfactant // Appl. Environ. Microbiol. 1996. V. 62. P. 2387–2392.
- 38. *Khan F.I., Husain T., Hejazi R.* An overview and analysis of site remediation technologies // J. Environ. Manage. 2004. V. 71. P. 95–122.
- 39. *Roy D., Liu M., Wang G.* Modeling of anthracene removal from soil columns by surfactant // J. Environ. Sci. Health Part Environ. Sci. Eng. 1994. V. 29. P. 197–213
- Sarkar D., Ferguson M., Datta R., Birnbaum S. Bioremediation of petroleum hydrocarbons in contaminated soils: Comparison of biosolids addition, carbon supplementation, and monitored natural attenuation // Environ. Pollution. 2005. V. 136. P. 187–195.
- 41. *Stevenson F.J., Goh K.M.* Infrared spectra of humic acids and related substances // Geochim. Cosmochim. Acta. 1971. V. 35. P. 471–483. https://doi.org/10.1016/0016-7037(71)90044-5
- 42. *Stelmack P.L., Gray M.R., Pickard M.A.* Bacterial adhesion to soil contaminants in the presence of surfactants // Appl. Environ. Microbiol. 1999. V. 65. P. 163–168.

Modeling of the "Contour Water Flooding" Technology in Microcosms

T. N. Shchemelinina¹, E. M. Anchugova¹, *, E. M. Lapteva¹, R. S. Vasilevich¹, M. Yu. Markarova¹, E. N. Glazacheva², and M. V. Uspenskaya²

¹Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, 167982 Russia ²Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University), St. Petersburg, 197101 Russia

*e-mail: anchugova@ib.komisc.ru

The results of modeling a complex biotechnology "contour water flooding" for the cleaning of heavily petro-leum-polluted agro-soddy-podzolic soil (Albic Retisols (Loamic)) with the bacterial-yeast consortium, microalgae and algal-bacterial-yeast consortium and mineral fertilizers application are presented. The patterns of biotic indicators and the total petroleum hydrocarbon content in various stages of oil destruction are revealed. Changes in population of hydrocarbon-oxidizing microorganisms in the microcosms are shown to proceed in different aspects depending on the biological agent applied. When microalgae are applied, the population of hydrocarbon-oxidizing microorganisms declines by an order of magnitude, when bacterial-yeast and algal-bacterial-yeast consortium are applied the population is restored during 90 days. The biochemical activity in microcosms remains high during the experiment. The efficiency of oil-oxidizing microbial consortia application including those with microalgae cultures is shown. The bacterial-yeast and algal-bacterial-yeast consortia using mineral fertilizers have the maximum purification effect in simulating technology. The efficiency of soil purification from total petroleum hydrocarbons was 60–63% for 90 days in a laboratory model. IR spectroscopic data indicate the decline in the share of saturated aliphatic structures and the accumulation of bio-thermodynamically stable aromatic hydrocarbons and oxygen-containing residual components of oil, which are intermediate products of metabolism in the microbial oxidation of oil hydrocarbons.

Keywords: oil pollution, algal-bacterial-yeast consortium, biological activity, the efficiency of soil purification

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УЛК 631.41

ДИНАМИКА СВОЙСТВ ПОЧВ И СТРУКТУРЫ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В ПОСТАГРОГЕННЫХ ЭКОСИСТЕМАХ В ПРОЦЕССЕ ЕСТЕСТВЕННОГО ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЯ

© 2020 г. И. М. Рыжова^а, В. М. Телеснина^{а, *}, А. А. Ситникова^а

^aМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия
*e-mail: vtelesnina@mail.ru
Поступила в редакцию 06.03.2019 г.
После доработки 25.06.2019 г.
Принята к публикации 20.09.2019 г.

Изучена динамика ряда свойств почв, а также запасов углерода в основных компонентах постагрогенных экосистем в ходе естественного лесовосстановления в зависимости от литологических условий и характера сельскохозяйственного использования в прошлом на примере четырех хронорядов на территории Костромской области. По мере лесовосстановления происходит увеличение кислотности и уменьшение содержания обменных оснований в верхней части профиля, более четкий тренд выявлен для легких почв. Характер динамики содержания и запасов органического углерода определяется типом использования угодья, а интенсивность постагрогенной динамики — нативными свойствами почвы. По мере восстановления лесной растительности происходит постепенная дифференциация старопахотной толщи по содержанию и запасам углерода, максимально выраженная в почвах лесов 90—100 лет. Примерно за 100 лет общий запас органического углерода в экосистеме возрастает в 7—9 раз при зарастании пахотных угодий, в 3.5 раза — при зарастании сенокосов. Изменяется структура запасов углерода в экосистеме — доля почвенного углерода через 20 лет после прекращения использования уменьшается с 80 до 50%, доля детрита, напротив, возрастает до 10% от общего запаса.

Ключевые слова: залежи, постагрогенные почвы, сукцессия, Albic Podzol, Albic Retisol

DOI: 10.31857/S0032180X20020100

ВВЕДЕНИЕ

Характер землепользования является одним из наиболее значимых антропогенных факторов, влияющих на условия почвообразования, биологический круговорот, а, следовательно, и на свойства почв, их гидротермический, газовый и питательный режимы. В результате экономического кризиса 1990-х гг. в России произошло масштабное сокращение сельскохозяйственных земель. В период 1990-2007 гг. было выведено из сельскохозяйственного оборота около 50 млн га [14]. В настоящее время наблюдается возврат залежей в сельскохозяйственное использование в лесостепных и степных регионах, тогда как в лесной зоне, на долю которой приходится 2/3 залежных земель России, на большей части этих площадей происходит естественное лесовосстановление [21].

Характер растительности оказывает весьма существенное влияние на целый ряд химических почвенных свойств и их биологической активности [11, 16, 20]. При зарастании бывших агрогенных почв в наибольшей степени изменяются свойства их верхней старопахотной толщи [23, 38]. Агро-

генно-измененные свойства почв по устойчивости во времени, проявляющейся при восстановлении естественной растительности, разделяют на три группы: наиболее устойчивые (около 200 лет и более), менее устойчивые (от нескольких лет до первых десятков лет) и динамические. В процессе зарастания бывшей пашни быстрее всего восстанавливаются такие свойства, как кислотность и содержание обменных оснований [4, 40]. В связи с проблемой глобального изменения климата особую актуальность приобрела оценка секвестрации углерода в результате восстановления зональных природных экосистем на залежных землях. Общее накопление углерода постагрогенными экосистемами всей территории России в первые 20 лет после выведения из сельскохозяйственного использования в среднем составляет 155 ± 27 млн т С в год [45]. При этом средняя скорость аккумуляции углерода в бывших пахотных почвах России в этот период оценивается в 105 ± ± 10 г С/м² в год [44]. Скорость секвестрации углерода постагрогенными экосистемами зависит от возраста залежи, природной зоны и множества других факторов [13, 19, 33, 43]. По опубликованным данным в процессе естественного лесовосстановления увеличивается общий запас углерода в экосистеме [36]. Это происходит за счет многократного роста запасов фитомассы и формирования горизонта подстилки. Направленность и величина изменений запаса углерода в минеральной толще почв может быть разной в зависимости от совокупности факторов, таких как история предыдущего использования почвы, ее тип, свойства, биоклиматические условия. Поэтому большое внимание уделяется изучению динамики содержания, запасов и состава органического вещества почв в ходе естественного зарастания залежей в разных природных зонах [2, 6-9, 18, 27,29, 31, 40, 41]. Результаты вычислительных экспериментов на основе динамических моделей круговорота углерода демонстрируют, что при любых запасах углерода на пашне при ее зарастании лесом значение запасов стремится к стационарному состоянию, которое определяется биоклиматическими, литологическими и геоморфологическими условиями. При выводе из сельскохозяйственного оборота бедных малогумусных почв запасы органического углерода в них увеличиваются, в богатых почвах они уменьшаются, а в почвах с запасами, близкими к стационарной величине, практически не изменяются [30, 42]. Общую картину усложняют факторы, блокирующие естественное лесовосстановление, в результате чего замедляется достижение зональных величин запасов углерода в почве. К таким факторам, в частности, относится появление растений из группы рудерального высокотравья, являющиеся блокираторами сукцессии, например, борщевика Сосновского [21].

Цель работы — изучение динамики свойств почв и запасов углерода в основных компонентах постагрогенных экосистем в ходе естественного лесовосстановления в зависимости от литологических условий и характера сельскохозяйственного использования в прошлом на примере четырех хронорядов в европейской южной тайге (Костромская область).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В качестве объектов исследования выбраны постагрогенные экосистемы южной тайги. Они представляют особый интерес, так как занимают более 20% площади этой зоны [22]. Работу проводили на территории двух районов Костромской области: Парфеньевского и Мантуровского. Условия почвообразования характерны для южной тайги, где естественные растительные сообщества представлены еловыми травяно-кустарничковыми лесами [26]. Территория относится к северо-восточной подобласти атлантико-континентальной лесной области. Среднегодовая температура воздуха составляет 2.1°С, среднегодовое количество осад-

ков — 564 мм. Почвообразующие породы представляют разнообразные ледниковые и водноледниковые отложения [3].

Парфеньевский район

Все пробные площади расположены на расстоянии 100-250 м друг от друга на выровненном водоразделе р. Соег (приток р. Вохтомы, р. Вохтома приток р. Неи). Почвообразующими породами на изучаемой территории являются покровные суглинки, подстилаемые мореной. В качестве объектов исследования послужили хроноряды постагрогенных экосистем (табл. 1). Первый хроноряд (ПП – Парфеньевский район, пахотные угодья) включает следующие стадии: 1 - пашню (посев овса), 2 — разнотравно-злаковый луг (залежь 7— 11 лет), 3 — молодой лес с густым травяным покровом (залежь 20-24 лет), 4 - лес 45-50 лет и 5 вторичный ельник (80-100 лет). Рассматриваемые экосистемы сформированы на агродерново-подзолистых и постагрогеных дерново-подзолистых среднесуглинистых почвах. Названия почв даны в соответствии с классификацией почв России [15].

Второй хроноряд (ПС — Парфеньевский район, сенокосные угодья) включает: сенокосное угодье, молодой лес 17 лет, лес 50 лет и еловый лес 140-150 лет.

Мантуровский район

Первый хроноряд (МП – Мантуровский район, пахотные угодья) расположен в 1-2 км от русла р. Унжи. Почвообразующие породы – пески, подстилаемые на разной глубине тяжелыми глинами. Этот хроноряд представляет собой зарастающую пашню со следующими стадиями: 1 — пашня, 2 -залежь 7 - 10 лет, 3 -залежь 12 - 15 лет, на которой почти сформирован древостой, 4 — мелколиственный вторичный лес 40 лет, 5 — березово-еловый лес 100 лет. Выбранные площадки расположены недалеко друг от друга и соответствуют одному элементу мезорельефа. Различия в профильном распределении соотношения песчаных, пылеватых и илистых фракций обусловлены общей пестротой почвообразующих пород, при этом варьирование гранулометрического состава, как в пределах одной мониторинговой площадки, так и между площадками, не было существенным [32]. В профилях почв, соответствующих разным стадиям сукцессии, супесчаные отложения подстилаются тяжелыми и средними суглинками на глубинах соответственно: $M\Pi 0 - 70 - 72$ см (в разные годы описания от 2004 до 2011), $M\Pi7-11 - \text{ от}$ 75 до 100 см, КП12-15 - 65-75 см, МП40 - 64-70 см, $M\Pi 100 - 60-80$ см. Особенности данных почв создали определенные проблемы при их наименовании. Согласно классификации почв 2004 г., принадлежность почвы к подзолистой

Таблица 1. Стадии сукцессии в изучаемых хронорядах

Таблица 1. Стадии сукцессии в изучаемых хронорядах									
Стадия сукцессии	Обозна- чение	Растительность	Почва						
		Парфеньевский район							
	Зарастающая пашня								
Пашня	ПП0	Посевы овса (Avena sativa)	Агродерново-подзолистая глееватая (P—BELg—BTg—BTCg)						
Залежь 7—11 лет	ПП7	Луг с преобладанием мятлика лугового (<i>Poa pretense</i>) и ромашника непахучего (<i>Tripleuros-permum inodorum</i>), с редким подростом сосны (<i>Pinus sylvestris</i>)	Агродерново-подзолистая реградированная глееватая (Pw—BELg—BTg—BTCg)						
Залежь 20—24 лет	ПП20	Подрост сосны (Pinus sylvestris), березы (Betula pendula) и ивы козьей (Salix caprea), в травостое преобладают мятлик луговой (Poa pratense) и зверобой продырявленный (Hypericum perforatum)	Дерново-подзолистая реградированная глееватая (Pw— AELg—BELg—BTg)						
Лес 40—50 лет	ПП40	Елово-сосновый (<i>Picea abies—Pinus sylvestris</i>) лес с преобладанием в напочвенном покрове иванчая узколистного (<i>Chamaenerion angustifolium</i>) и земляники лесной (<i>Fragaria vesca</i>)	Дерново-подзолистая постагрогенная глееватая (АҮра– AELg–BELg–BTg)						
Лес 80—100 лет	ПП100	Сосново-еловый (<i>Pinus sylvestris—Picea abies</i>) лес с преобладанием в напочвенном покрове марьянника лесного (<i>Melampyrum sylvaticum</i>) и грушанки круглолистной (<i>Pyrola rotundifolia</i>)	Дерново-подзолистая постагрогенная глееватая (AYpa—ELg—BELg—BTg—BTCg)						
	•	Зарастающий сенокос	•						
Сенокос	ПС0	Луг	Агродерново-подзолистая глееватая реградированная (AYpa—BELg—BTg)						
Лес 17 лет	ПС17	Молодой лес из сосны (<i>Pinus sylvestris</i>), березы (<i>Betula pendula</i>) и ивы козьей (<i>Salix caprea</i>)	Агродерново-подзолистая глееватая реградированная (AYpa—BEL—BTg)						
Лес 50 лет	ПС50	Березово-еловый лес (Betula pendula—Picea abies)	Дерново-подзолистая постагрогенная глееватая (AYpa—EL—BELg—BTg)						
Лес 140—150 лет	ПС150	Еловый лес (<i>Picea abies</i>), в напочвенном покрове черника (<i>Vaccinium myrtillus</i>)	Дерново-подзолистая постагрогенная глееватая (AYpa— EL—BELg—BTg)						
	•	Мантуровский район	•						
		Зарастающая пашня							
Пашня	МП0	Посевы овса (Avena sativa)	Агродерново-подзол (Р-АЕ- ВЕ-В-ВС)						
Залежь 7—10 лет	МП7-10	Луг с преобладанием овсяницы красной (Festuca rubra), ежи сборной (Dactylis glomerata) и ястребинки зонтичной (Hieracium umbellatum)	Агродерново-подзол реградированный (АҮра-АЕ-ВЕ-В)						
Залежь 12—15 лет	МП12-15	Молодой древостой из ивы козьей (Salix caprea) с преобладанием в травостое овсяницы красной (Festuca rubra), ситника нитевидного (Juncus filiformis) и грушанки круглолистной (Pyrola rotundifolia)	Агродерново-подзол реградированный (АҮра—АЕ—ВЕд—Вд)						

Таблица 1. Окончание

Стадия сукцессии	Обозна- чение	Растительность	Почва
Лес 40 лет	МП40	Осиново-березовый (<i>Populus tremula—Betula pendula</i>) лес, в напочвенном покрове черника (<i>Vaccinium myrtillus</i>)	Дерново-подзол постагрогенный (О-АҮра-АЕ-ВЕ-В)
Лес 100 лет	МП100	Лес березово-еловый (Betula pendula—Picea abies) мохово-черничный	Подзол (О-АН-АЕ-Е-ВЕ-В)
	ı	Зарастающий сенокос	'
Залежь 2 года	MC2	Луг с преобладанием зверобоя продырявленного (<i>Hypericum perforatum</i>) и иван-чая (<i>Chamaenerion angustifolium</i>)	Агродерново-подзолистая реградированная (AYpa—EL—BEL—BT)
Залежь 12 лет	MC12	Смешанный древостой с преобладанием березы (<i>Betula pendula</i>), в травяном ярусе доминируют ястребинка зонтичная (<i>Hieracium umbellatum</i>) и манжетка обыкновенная (<i>Alchemilla</i> sp.)	Агродерново-подзолистая реградированная (AYpa—EL—BEL—BT)
Лес 20 лет	MC20	Ивово-березовый (Salix caprea—Betula pendula) лес, в напочвенном покрове папоротники и щучка дернистая (Deschampsia caespitosa)	Дерново-подзолистая постагрогенная (AYpa—EL—BEL—BT)
Лес 95 лет	MC95	Березово-еловый (Betula pendula—Picea abies) лес, в напочвенном покрове грушанка кругло-листная (Pyrola rotundifolia) и костяника (Rubus saxatilis)	Дерново-подзолистая (АҮра- EL-BEL-BT)

или дерново-подзолистой подразумевает наличие текстурного горизонта ВТ. Подзолы, согласно классификации, должны содержать в профиле охристый иллювиально-железистый горизонт ВГ, а также подзолистый осветленный горизонт. Изученные почвы в равной степени имеют признаки как подзолистых (дерново-подзолистых) почв, так и литобарьерных подзолов (дерново-подзолов). В большей степени они относятся к агродерново-подзолам литобарьерным, нежели к агродерново-подзолистым, название им дали соответствующее.

Второй хроноряд (МС – Мантуровский район, сенокосные угодья) расположен в 7 км от русла р. Унжи и представляет собой зарастающий сенокосный луг. Почвообразующие породы опесчаненные покровные суглинки, подстилаемые среднетяжелыми моренными суглинками на глубине 30-35 см. Эта территория в 70-80-x гг. использовалась несколько лет как пашня, далее - как сенокос. В начале 90-х годов площадь сенокоса стали сокращать, в результате неиспользуемая территория стала зарастать лесом. Стадии зарастания: 1 луг, не косившийся 2—3 года, 2 — луг, зарастающий древостоем, не косившийся около 12 лет, 3 — мелколиственный вторичный лес 20 лет, 4 — лес 95 лет. Возраст залежей определялся на основе информации, полученной от местных жителей и специалистов, и по результатам анализа древесных кернов.

В каждой из изучаемых экосистем была заложена пробная площадь размером 20 × 20 м, проведено геоботаническое описание. В трех хронорядах (ПП, МП и МС) методом укосов изучена надземная биомасса травяного (травяно-кустарничкового) яруса, методом монолитов - его подземная биомасса. Масса разных фракций древостоя определена аллометрически [10]. Во всех хронорядах на каждой пробной площадке заложен один полный почвенный разрез для отбора образцов по горизонтам, а также 5–6 прикопок для послойного отбора с глубин 0-10, 10-20, 20-30 см. В почвах определены плотность, актуальная и потенциальная кислотность, гидролитическая кислотность, сумма обменных оснований, содержание и запасы органического углерода. Углерод микробной биомассы определяли методом субстрат индуцированного дыхания [1].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Динамика физических и химических свойств почв

Плотность почв является одним из диагностических критериев старопахотного горизонта почв залежей — он отличается от нижележащих горизонтов более низкими величинами плотности, обусловленными концентрацией значительного количества живых и мертвых корней и органического вещества почвы. Плотность старопахотно-

го горизонта неоднородна – наименьшие величины отмечаются в верхней трети (0-10 см), а наибольшие — в нижней (20-30 см). По мере постагрогенного восстановления естественной растительности изменяется плотность сложения в старопахотной толще за счет обособления дернового горизонта, что особенно заметно на примере ряда МП. Так, в почве действующей пашни в пределах толщи 0-20 см значения плотности одинаковы, тогда как уже на следующей стадии наблюдаются различия – в верхней части старопахотного горизонта, где формируется дернина, плотность меньше, нежели в более глубоких подгоризонтах. На стадии мелколиственного леса 40 лет плотность верхней части старопахотного горизонта существенно уменьшается (табл. 2), что связано с формированием более грубогумусного органопрофиля по сравнению с луговыми стадиями сукцессии. То же наблюдается и применительно к почвам зарастающей пашни на суглинистых породах, однако дифференциация в пределах старопахотной толщи наступает позже. Подобные закономерности были отмечены ранее другими авторами [34]. При зарастании сенокосных угодий динамика плотности сложения в верхней части профиля не столь отчетлива, поскольку хорошо выраженный дерновый подгоризонт уже существовал под сенокосом.

Кислотность почв. В ходе естественного постагрогенного лесовосстановления на территории тайги в результате изменения состава опада, а также постепенного формирования горизонта лесной подстилки, происходит постепенное подкисление почвы, по крайней мере ее верхних горизонтов, соответствующих старопахотной толще [19]. Однако подкисление почвы в ходе постагрогенной сукцессии происходит с неодинаковым трендом при разном гранулометрическом составе и характере использования почвы в прошлом [24], что и подтвердилось результатами наших исследований. Наиболее четкий тренд постагрогенного повышения как актуальной, так и потенциальной кислотности выявлен для зарастающей пашни, почвы которой образованы на песках, подстилаемых суглинком (ряд МП). Так, величина рН существенно уменьшается с 5.4 до 4.6 уже при появлении древостоя, а после выхода в древостой хвойных пород – до 3.6. В то же время при зарастании пашни, почвы которой образованы на суглинках $(\Pi\Pi)$, кислотность сколь-либо существенно увеличивается лишь на стадии 100-летнего леса. Другими авторами при изучении постагрогенной эволюции почв разного гранулометрического состава установлено, что подкисление тяжелых почв происходит гораздо медленнее, нежели более легких [19]. Возможно, здесь играет роль не только гранулометрический состав почвы, но и степень ее окультуренности — при низкой окультуренности и легком гранулометрическом составе восстановле-

ние исходных свойств происходит быстрее. Показательно, что в вышеописанных двух хронорядах почвы контроля, т.е. 100-летнего леса имеют разную кислотность, причем почва МП100 намного кислее ПП100, т.е. разница между начальной и конечной стадиями сукцессии существеннее. Что касается зарастающих сенокосов, тенденция к постагрогенному подкислению выражена не так отчетливо, как при зарастании пашни, повидимому, по причине более сложной истории освоения - почти всегда сенокосы образованы на месте пашни, но стадия рудерального высокотравья, соответствующая кратковременной интенсификации биологического круговорота, уже прошла и наиболее лабильные свойства почвы стабилизированы. Особый интерес представляет ряд МС, поскольку луг, соответствующий первой стадии сукцессии, уже несколько лет не косится. Поскольку мониторинг здесь ведется с 2005 г., а несколько лет назад прекращено выкашивание, появилась возможность наблюдать динамику растительности и некоторых свойств почв сразу после прекращения кошения [33]. При изучении свойств почвы в 2005 г. установлено постепенное увеличение кислотности от стадии сенокоса к стадии 95-летнего леса [5]. В 2015—2016 гг. выявлена другая картина – почва луга МС2 отличается от остальных большей кислотностью старопахотной толщи, причем р H_{KCl} в слое 0-10 см меньше, чем в слое 10–20 см. С одной стороны, количество наземной фитомассы травостоя уменьшилось за эти годы примерно на 100-150 г/м², с другой, после прекращения выкашивания усилилось накопление растительного опада, что могло вызвать подкисление в верхней части профиля. Динамика гидролитической кислотности в верхней части профиля в целом соответствует динамике актуальной и потенциальной кислотности по мере сукцессии происходит увеличение этого показателя, однако при зарастании сенокоса в Мантуровском районе динамика практически не выражена.

Сумма обменных оснований связана как с содержанием органического вещества, так и с поступлением надземного и подземного растительного опада, богатого кальцием [8]. При постепенном уменьшении продуктивности травостоя, а также увеличении доли хвойных в древесном опаде сумма обменных оснований в верхних горизонтах постепенно уменьшается. При зарастании как пашни, так и сенокосов в изучаемых хронорядах наблюдается, действительно, существенное уменьшение суммы обменных оснований в почве при переходе луговых сообществ в лесные, однако на примере ряда ПП видно, что при достижении вторичным мелколиственным лесом 40 лет сумма обменных оснований снова увеличивается (c 4.8 до 7.6 смоль(экв)/кг), что может быть связано с максимальной интенсивностью поступления

Таблица 2. Физические и химические свойства почв

Стадия	Горизонт,	p	Н	Нг	$Ca^{2+} + Mg^{2+}$	S, %	Плотность сложения, $\Gamma/\text{см}^3$	С _{орг} , %
сукцессии	глубина см	H ₂ O	KCl	СМОЛ	ть(экв)/кг	3, 70		
		Зарастан	ощая паш	ня, Парфе	ньевский район	I		
ПП0	P, 0-24	4.8	3.7	4.59	8.61	65.2	1.03	0.69
	BEL, 24-34	4.5	3.5	3.28	3.81	53.7	1.43	0.40
	BT1, 34-65	5.0	3.9	2.41	15.4	86.5	1.42	0.30
ПП7	Pw, 0-13	4.9	4.0	4.60	7.14	61.0	1.21	0.87
	Pw, 13-26	4.6	3.9	4.60	5.63	54.0	1.23	0.80
	BEL, 26-49	4.3	3.4	4.39	5.30	54.6	1.25	0.36
ПП20	Pw, 2–13	4.7	3.8	6.27	4.81	43.4	1.11	1.26
	Pw, 13-25	4.7	3.9	5.85	3.92	39.7	1.24	0.84
	AEL, 25-44	4.7	4.0	2.19	2.04	47.6	1.04	0.70
ПП40	AYpa, 4–10	4.5	3.7	9.19	7.61	45.2	0.87	2.52
	AYpa, 10-16	4.6	3.7	7.94	4.96	37.9	1.05	1.52
	AEL, 16-30	4.5	3.6	5.01	4.37	46.6	1.36	0.31
ПП100	AYpa, 4–12	4.3	3.6	8.36	6.96	45.1	1.08	1.33
	AYpa, 12-19	4.5	3.7	7.52	6.01	44.4	1.09	0.70
	EL, 19-35	4.3	3.6	3.06	2.76	48.3	1.28	0.26
	1	Зарастан	і эщий сено	кос, Парф	еньевский райс	Н	1	Ţ
ПС0	Ad, 0-5	5.09	4.00	4.0	23	85.2	0.83	1.79
	AYpag, 5-20	5.53	4.27	4.1	25	86.0	1.30	1.00
	AYpag, 20-34	5.25	3.89	4.3	10	69.8	1.23	0.89
	BELg, 34-46	4.99	3.51	7.1	37	83.9	1.43	0.39
ПС17	Ad, 0–10	4.81	3.95	5.1	25	83.0	0.74	1.83
	AYpag, 10-24	5.10	4.22	3.2	20	86.2	1.40	0.97
	AYpag, 24-38	5.17	4.28	3.3	20	85.7	1.35	0.81
	BEL, 38-58	5.07	3.64	6.6	36	84.5	1.34	0.27
ПС50	AYpa, 0-10	4.79	3.90	8.9	15	62.7	0.97	1.50
	AYpa, 10-21	4.74	3.50	4.6	13	73.9	1.37	1.30
	EL, 21–25	4.89	3.52	6.9	13	76.9	1.35	0.32
	BELg, 25-36	4.78	3.39	8.0	46	85.1	1.34	0.35
ПС150	AYpa, 0–16	5.10	3.80	11.2	23	67.3	1.11	1.44
	AYpa, 16-25	5.01	3.55	6.9	10	59.1	1.22	1.30
	EL, 25–36	4.90	3.68	5.7	12	67.8	1.45	0.24
	BELg, 36-53	4.91	3.45	7.4	35	82.5	1.47	0.38
				1	ı уровский район			I
МП0	P, 0-10	5.42	4.35	1	Не опр.		1.06	1.05
	P, 10-20	5.60	4.48		»		1.06	1.03
	P, 20-30		I Эпр.		»		1.28	0.21
МП7	AYpa, 0–10	5.38	4.42		*		1.13	1.55
	AYpa, 10–20	5.40	4.55		»		1.25	0.96
	AYpa, 20–30		опр.		»		1.25	0.20
МП12	AYpa, 0–10	4.64	3.40		»		1.15	1.88
	AYpa, 10–20	4.78	3.54		»		1.27	1.39
	AYpa, 20–30		l ^{э.э.} эпр.		»		1.26	0.24

Таблица 2. Окончание

Стадия	Горизонт,	p	Н	Нг	$Ca^{2+} + Mg^{2+}$	S 0/	Плотность сложения,	C %
сукцессии	глубина см	H ₂ O	KCl	СМОЈ	іь(экв)/кг	S, %	г/см ³	С _{орг} , %
МП40	AYpa, 0–11	4.34	3.37		*		0.89	2.48
	AYpa, 11-25	4.38	3.37		*		1.06	1.91
	AE, 25–30	4.30	3.50		*		1.03	0.41
МП100	AH, 0–10	3.64	2.52		»		0.97	4.05
	AE, 10-15	3.78	2.92		»		1.05	0.60
	E, 15-20	4.20	3.40		»		1.15	0.31
	EB, 20-30	4.45	3.60		»		1.22	0.30
Зарастающий сенокос, Мантуровский район								ı
MC2	AYpa, 0-10	4.60	3.37	3.64	3.22	46.9	1.05	2.25
	AYpa, 10-20	4.85	3.59	3.29	3.48	51.4	1.33	1.33
	EL, 20-30	5.70	4.50	3.23	1.29	28.5	1.30	0.76
MC12	AYpa, 0-10	5.40	3.60	3.14	2.20	41.2	1.10	1.00
	AYpa, 10-20	5.47	3.77	2.90	1.98	40.6	1.35	1.05
	EL, 20-30	5,50	4.00	2.88	2.67	48.1	1.33	0.70
MC20	AYpa, 0-10	5.15	3.70	2.78	1.89	40.5	1.13	1.63
	AYpa, 10-20	5.26	3.64	2.53	2.31	49.7	1.37	1.08
	EL, 20-30	5,60	4.10	2.44	2.06	45.8	1.45	1.00
MC95	AYpa, 0-10	4.98	3.51	3.10	2.58	45.4	1.05	2.21
	AYpa, 10-20	5.16	3.57	2.88	3.16	52.3	1.34	1.08
	AYpa, 20-27	5.40	4.00	2.72	3.58	57.1	1.38	0.96
	EL, 27–38	5.90	4.50	4.80	3.83	44.0	1.31	0.21

Примечание. Нг – гидролитическая кислотность, S – степень насыщенности основаниями.

листового опада в частности и повышенной интенсивностью биологического круговорота, которая наблюдается в мелколиственных насаждениях 35—40 лет [28]. Таким образом, при зарастании заброшенных пашен и сенокосов естественной растительностью динамика почвенных свойств в целом направлена на подкисление и уменьшение содержания обменных оснований, причем наиболее существенные изменения соответствуют переходу луговых сообществ в лесные. Более четкий тренд подобной динамики выявлен для зарастающих пашен, нежели для сенокосов, а также для песчаных почв, нежели для глинистых.

Содержание органического углерода в почве. Наибольшее увеличение содержания органического углерода в верхнем слое почвы (0-10 см) в ходе постагрогенной сукцессии от стадии пашни до стадии 100-летнего смешанного леса выявлено для зарастающей пашни, почвы которой сформированы на легких отложениях (ряд МП) — более чем в 4 раза. На ранних стадиях это, вероятно, определяется влиянием дернины и поступлением большого количества травяного опада в почву, на более поздних — поступлением листового опада

древесного яруса. По-видимому, не очень высокий уровень агротехнических мероприятий не способствует накоплению органического вещества в почве пашни, и после прекращения распашки этот показатель стремится к исходным значениям, характерным для целинных почв подобные результаты были получены многими авторами [1, 40]. Для сравнения можно рассмотреть зарастающую пашню на суглинистых породах – ряд ПП. Поскольку содержание органического углерода в почве пашни крайне низкое, можно сделать вывод о невысоком уровне агротехнических мероприятий, как и в случае зарастающей пашни в ряду МП. При этом градиент возрастания содержания углерода в ходе постагрогенного лесовосстановления не столь велик. Дело в том, что в фоновой дерново-подзолистой почве ПП100 органопрофиль не столь грубогумусный. как в почве МП100 – подзоле. В целом направление постагрогенной динамики содержания углерода в верхнем слое такое же, как и в почве на песчаных породах. Оба ряда объединяет то, что на стадии 100-летнего леса возрастание содержания углерода ограничивается верхними 10 см. Зарастание сенокосных лугов сопровождается, напро-

тив, некоторым уменьшением содержания органического углерода, хотя и выраженным не слишком отчетливо. В ряду МС наименьшее содержание углерода характерно для стадии 12-летней залежи по сенокосу (МС12), когда продуктивность травяного яруса сильно снижена, тогда как сомкнутый древостой, который поставлял бы достаточное количество опада, еще не сформировался — здесь рост древостоя происходит медленнее, чем на залежи по заброшенной пашне аналогичного возраста (МП12). Если сравнить почвы пашни и сенокоса в Парфеньевском районе, одинаковых по гранулометрическому составу, то видно, что содержание углерода в почве сенокоса гораздо больше – несмотря на периодическое отчуждение травостоя, продуктивность последнего благодаря кошению поддерживается на высоком уровне, что не может не отражаться на гумусном состоянии почвы.

Стратификационное отношение органического вещества почв. При ослаблении агротехнической обработки почв, а еще сильнее при зарастании выведенных из сельскохозяйственного оборота пахотных земель изменяются не только почвенные свойства, но и их распределение с глубиной. Стратификационное отношение (SR – stratification ratio) органического вещества почв было выбрано в качестве индикатора их качества [39]. Концепция качества почвы основана на представлении о том, что управление может ухудшить или улучшить экологические функции почв. Так как в большинстве случаев в почвах под естественной растительностью органическое вещество более стратифицировано по глубине по сравнению с пахотными предполагается, что при искусственном или естественном восстановлении растительного покрова SR увеличивается, что свидетельствует об улучшении экологического качества почв. В настоящее время стратификационное отношение используется не только в качестве показателя качества почв, но и для оценки секвестрации углерода [37, 46, 48]. Величина SR зависит от выбора глубины и мощности почвенных слоев, используемых при определении этого показателя. Рекомендуется рассчитывать стратификационные отношения для слоев 0-10/20-30 или 0-20/20-40 см [39]. В табл. 3 приведены стратификационные отношения, вычисленные как отношения запасов органического углерода в слоях 0-10 и 20-30 см почв двух хронорядов, представляющих естественное лесовосстановление на пашне. Они показывают, как изменяется степень дифференциации старопахотного горизонта по запасам органического вещества с возрастом залежи. По полученным данным при переходе от пашни к вторичным лесам стратификационные индексы возрастают в 2.6-3.0 раза. Однако величины SR и динамика их изменений в изучаемых хронорядах существенно различаются. Они определяются предысторией пахотных почв, их типом, свойствами, особенностями почвообразующих пород и скоростью восстановления лесной растительности. Зарастание пашни на агродерново-подзолах легкого гранулометрического состава (хроноряд МП) характеризуется высокой для пашни величиной стратификационного отношения по сравнению с литературными данными [39]. При переходе к луговой стадии оно довольно резко увеличивается в 1.7 раза, а затем уменьшается в 40-летнем мелколиственном лесу. Снижение SR может быть связано с увеличением подвижности органического вещества в почве лесного фитоценоза, а также с завершением деградации дернового горизонта. В почве вторичного 100-летнего леса стратификационное отношение очень высокое, что обусловлено особенностями органопрофиля подзолов. При зарастании агродерново-подзолистой среднесуглинистой почвы (хроноряд ПП) наблюдается иная динамика SR. Низкое стратификационное отношение в пахотной почве очень постепенно увеличивается в 1.4 раза на стадии леса 40-50 лет и только на стадии 80–100-летнего леса оно возрастает в 3 раза по сравнению с пашней.

Микробиологические свойства постагрогенных почв

Углерод микробной биомассы является показателем, весьма чувствительным как к землепользованию, так и к смене растительности [35, 47]. Таким образом, динамика его содержания и отношения к содержанию общего углерода почвы в ходе естественного постагрогенного лесовосстановления очень важна для понимания динамики процессов, происходящих в системе опад-микробиота-органическое вещество почв. Данные, полученные в результате настоящих исследований, показывают, что в целом при зарастании заброшенных пахотных угодий микробная биомасса в верхних минеральных горизонтах почв существенно увеличивается (табл. 4). Возможно, это связано с бурным ростом травяной растительности и поступлением большого количества разнообразного легкоразлагаемого опада после прекращения распашки. Особенно это заметно на песчаной почве (залежь 7 лет в ряду $M\Pi$), что объясняется большей интенсивностью развития корневых систем на легких почвах. Следующий пик значения содержания углерода микробной биомассы в обоих рядах соответствует 100-летнему лесу, что, возможно, связано с ростом грибной биомассы по сравнению с бактериальной в связи с изменением характера органопрофиля по сравнению с почвами более молодых лесов.

При зарастании сенокоса, напротив, наблюдается уменьшение содержания микробной биомассы с некоторым возрастанием лишь, на стадии смешанного леса большого возраста. Наименьшее содер-

Таблица 3. Изменение стратификационного отношения (SR) в ходе естественного лесовосстановления на пашне

Стадия сукцессии	Глубина, см	Запасы С, кг/м ²	SR
	Зарастающая пашня, Парф	еньевский район	
ПП0, пашня	0-10	0.71	1.25
	20-30	0.57	
ПП7, залежь 7—11 лет	0-10	1.05	1.38
	20-30	0.76	
ПП20, залежь 20-24 лет	0-10	1.39	1.61
	20-30	0.86	
ПП40, лес 40-50 лет	0-10	2.09	1.71
	20-30	1.22	
$\Pi\Pi 100$, лес $80-100$ лет	0-10	1.44	3.79
	20-30	0.38	
	Зарастающая пашня, Мант	гуровский район	I
МП0, пашня	0-10	1.11	4.11
	20-30	0.27	
МП7, залежь $7-10$ лет	0-10	1.75	7.00
	20-30	0.25	
МП12, залежь 12-15 лет	0-10	2.16	7.20
	20-30	0.30	
МП40, лес 40 лет	0-10	2.21	1.81
	20-30	1.22	
МП100, лес 100 лет	0-10	3.92	10.60
	20-30	0.37	

Таблица 4. Микробная биомасса

Стадия сукцессии	Горизонт	Глубина, см	$C_{\text{мик}}$, мкг $C/$ г почвы	$\frac{\mathrm{C}_{\scriptscriptstyle\mathrm{M}\mathrm{W}\mathrm{K}}}{\mathrm{C}_{\scriptscriptstyle\mathrm{opr}}},\%$
Зарастающая пашня, Мантуровский район				
МП0	P	0-15	262.0 ± 20	2.4
МП7	AYpa	0-15	355.2 ± 10	2.3
МП12	AYpa	0-15	337.8 ± 15	1.8
МП40	AYpa	0-15	281.5 ± 10	1.1
МП100	AH	4-10	499.5 ± 35	1.2
Зарастающий сенокос, Мантуровский район				
MC2	AYpa	0-15	262.0 ± 15	1.1
MC12	AYpa	0-15	202.7 ± 5	2.0
MC20	AYpa	0-15	105.0 ± 5	0.6
MC95	AYpa	0-15	142.7 ± 20	0.6
Зарастающая пашня, Парфеньевский район				
ПП0	P	0-12	175.0 ± 5	2.5
		12-24	150.0 ± 15	2.1
ПП11	AYpa	0-13	180.0 ± 25	2.0
		13-26	130.0 ± 5	1.6
ПП24	AYpa	0-12	150.0 ± 5	1.1
		13-25	135.0 ± 4	1.6
ПП50	AYpa	0-10	350.0 ± 25	1.3
		11-21	300.0 ± 20	1.9
ПП100	AYpa	0-10	400.0 ± 35	3.0
		11-25	250.0 ± 20	3.0

жание микробной биомассы, как и при зарастании пашен, соответствует молодому мелколиственному лесу. Возможно, потому что дернового горизонта как такового уже нет в связи с частичной деградацией травяного яруса, но и еще не развита в полном объеме лесная подстилка как местообитание почвенной микробиоты, т.е. создается некоторый дефицит доступного органического вещества. Таким образом, с возрастом вторичной лесной растительности происходит восстановление микробной биомассы до уровня естественной экосистемы. Наибольшая доля углерода микробной биомассы в общем органическом углероде почвы соответствует, как правило, пахотным почвам и молодым залежам. Возможно, это обусловлено исключительно обратной связью коэффициента $C_{\text{мик}}/C_{\text{обш}}$ с общим содержанием углерода.

Соотношение запасов углерода в разных компонентах экосистем

По мере восстановления естественной растительности общий запас углерода в экосистеме существенно возрастает (рис. 1), что говорит о стремлении системы к первоначальному состоянию, которое предшествовало антропогенному освоению. Так, при зарастании пашни на песчаных почвах примерно за 100 лет общий запас органического углерода увеличивается в 7 раз, при зарастании пашни на суглинистых породах — в 9 раз, при зарастании сенокоса — в 3.5 раза.

Интересно отметить, что на 12-летних залежах по пашне и сенокосу (рис. 1А, 1Б) общий запас углерода существенно различается — в биогеоценозе МП12 он больше в 1.5 раза. По-видимому, при лесовосстановлении по пашне по причине отсутствия долго формировавшейся дернины рост и развитие древостоя происходит быстрее [25]. На стадии 95—100-летних смешанных лесов общие запасы углерода в экосистемах на суглинистых почвах превышают аналогичные на песчаных почвах, что говорит о сравнительно более оптимальных почвенно-растительных условиях в лесах, развитых на суглинистых почвах.

Запасы органического углерода в старопахотной части профиля (0—30 см) увеличиваются в процессе зарастания пашни как на песчаных, так и на суглинистых почвах, достигая максимального значения, по-видимому, между 20 и 45 годами после прекращения распашки. В целом это соответствует данным, полученным при рассчете динамики запасов углерода с помощью модели NAMSOM — при выводе из использования слабоокультуренных почв любого гранулометрического состава запасы увеличиваются [27]. На поздних стадиях сукцессии, соответствующих выходу хвойных пород в доминанты в древостое, запасы углерода в минеральной старопахотной толще напротив, начинают уменьшаться по причине смены характе-

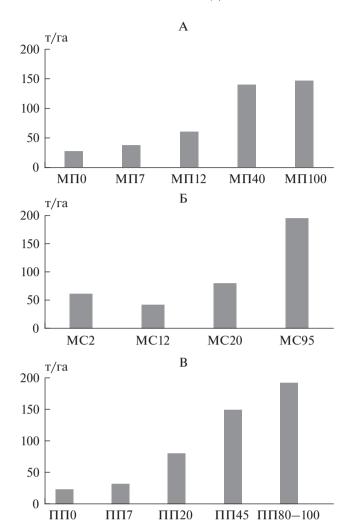


Рис. 1. Постагрогенная динамика запасов углерода, т/га в биогеоценозе. A — зарастающая пашня, Мантуровский район, B — зарастающий сенокос, Мантуровский район, B — зарастающая пашня, Парфеньевский район.

ра органопрофиля и перехода основных запасов почвенного орагнического вещества в подстилку, что особенно характерно для почв. образованных на песчаных породах. Что касается почв зарастающего сенокоса, динамика запасов органического углерода в старопахотной толще (сенокос образован на месте пашни) отличается. Прежде всего, запасы углерода в почвах изучаемых сенокосных лугов превышают запасы углерода в почве пашни в 2 раза, поскольку баланс поступающего органического вещества совершенно разный при распашке и при сенокосе. Во-первых, если после распашки поступление в почву травяного опада резко увеличивается, то после прекращения сенокошения напротив, уменьшается в результате снижения продуктивности травостоя. Во-вторых, как уже было сказано, восстановление древостоя после прекращения сенокошения происходит медлен-

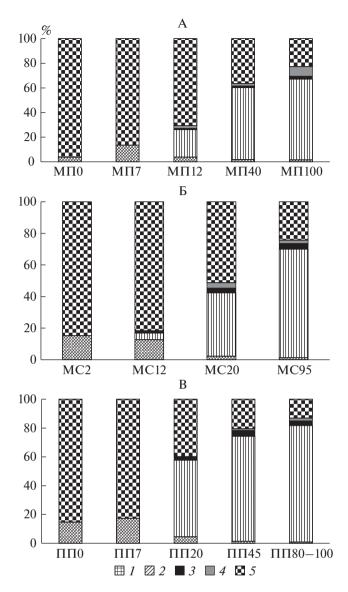


Рис. 2. Соотношение запасов углерода в разных блоках биогеоценозов. А — зарастающая пашня, Мантуровский район, Б — зарастающий сенокос, Мантуровский район, В — зарастающая пашня, Парфеньевский район. I — травяно-кустарничковый и моховый ярусы, 2 — многолетние части древостоя, 3 — зеленые части древостоя, 4 — лесная подстилка, 5 — почва на глубине 0—30 см.

нее, чем после распашки, поэтому имеет место некоторый "временной разрыв" между деградацией дернового горизонта и формированием лесного органопрофиля с развитой подстилкой, поэтому появляется углеродный минимум, соответствующий 10—12 годам. Далее запасы органического углерода начинают возрастать, как и при зарастании пахотных угодий.

Соотношение запасов органического углерода в разных блоках экосистемы неодинаково на разных стадиях постагрогенного лесовосстанов-

ления (рис. 2). На ранних стадиях сукцессии, соответствующим луговым экосистемам, доля углерода минеральной части почвы составляет более 80%, в экосистемах молодых вторичных лесов 20-летнего возраста — не более 40-50%, тогда как в экосистемах смешанных лесов 95–100 лет – не более 20%. При этом абсолютный запас почвенного углерода, а также детрита, напротив, увеличивается по мере развития древостоя, а на завершающих стадиях сукцессии если уменьшается, то незначительно. Доля запасов детрита, который появляется при переходе лугового фитоценоза в лесной, увеличивается, особенно в экосистеме леса, сформированного на песчаных почвах (до 10%). Доля запасов углерода травостоя, напротив, постепенно сходит на нет через 20 лет после прекращения распашки или сенокошения, в то время как растет доля ассимилирующих частей древостоя (хвоя и листва). Таким образом, запасы углерода в экосистеме увеличиваются, главным образом, за счет древостоя, а именно его многолетних частей – стволов, ветвей и многолетних корней, в результате вторичные леса являются существенным стоком атмосферного углерода.

ВЫВОДЫ

- 1. По мере постагрогенного восстановления растительности происходит подкисление почв в старопахотной толще. Характер тренда этого процесса определяется гранулометрическим составом почв и историей освоения более существенное и быстрое увеличение кислотности выражено на легких почвах по сравнению с тяжелыми и на почвах заброшенных пашен по сравнению с заброшенными сенокосами.
- 2. Выявлено уменьшение суммы обменных оснований в старопахотной толще, особенно в верхних 10—20 см в ходе постагрогенной сукцессии, выраженное в большей степени в почвах, сформированных на легких породах, где градиент этого показателя между зональной и освоенной почвой максимален. Уменьшение суммы обменных оснований связано с изменением количества и состава растительного опада, особенно фракции, наиболее обогащенной зольными элементами травянистые растения и листва мелколиственных пород.
- 3. Характер изменения содержания органического углерода в старопахотной толще по мере восстановления растительности определяется типом использования угодья, поскольку почва постепенно возвращается к первоначальному состоянию. После прекращения распашки содержание углерода увеличивается за 100 лет примерно в 2 раза в суглинистых почвах и в 4 раза в песчаных скорость этого процесса обусловлена уже нативными свойствами почвы. Для почв зарастающих сенокосов отчетливый тренд динамики содержания углеро-

да не выявлен из-за наличия ряда осложняющих факторов, таких как периодичность кошения и продуктивность травостоя.

- 4. По мере восстановления лесной растительности происходит постепенная дифференциация старопахотной толщи по содержанию и запасам органического углерода, максимально выраженная в почвах субклимаксных смешанных лесов 90—100 лет.
- 5. Микробная биомасса в верхних минеральных горизонтах почв увеличивается при прекращении распашки на время, соответствующее луговым сообществам молодых залежей, а также при формировании субклимаксного смешанного леса с развитой лесной подстилкой. После прекращения сенокошения значение микробной массы, напротив, несколько уменьшается из-за сокращения продуктивности травостоя.
- 6. При зарастании заброшенной пашни общий запас органического углерода в экосистеме возрастает за 100 лет в 7 раз на песчаных породах, в 9 раз на суглинистых, при зарастании сенокоса на легких породах— в 3.5 раза. Через 20 лет после прекращения использования доля почвенного углерода в общих запасах составляет менее 50%, и дальнейшее накопление углерода осуществляется, главным образом, за счет многолетних частей древостоя, что обеспечивает сток атмосферного углерода. Доля детрита также возрастает, особенно в лесных экосистемах на песчаных почвах с органопрофилем типа мор до 10% в общем запасе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 18-04-00773.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Ананьева Н.Д., Сусьян Е.А., Рыжова И.М., Бочарникова Е.О., Стольникова Е.В. Углерод микробной биомассы и микробное продуцирование двуокиси углерода дерново-подзолистыми почвами постагрогенных биогеоценозов и коренных ельников южной тайги (Костромская область) // Почвоведение. 2009. № 9. С. 1108—1116.
- 2. Артемьева З.С., Рыжова И.М., Силёва Т.М., Ерохова А.А. Стабилизация органического углерода в микроагрегатах дерново-подзолистых почв в зависимости от характера землепользования // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2013. № 3. С. 19—26.
- 3. *Болысов С.И., Фузеина Ю.Н.* Физико-географические условия Костромского Заволжья. Геолого-геоморфологическое устройство // Костромское Заволжье: природа и человек. М., 2001. С. 36—60.

- 4. Владыченский А.С., Телеснина В.М. Изменение некоторых свойств таежных почв при прекращении из сельскохозяйственного использования (на примере Костромской области) // Доклады по экологическому почвоведению. 2006. Т. 3. № 3.
- Владыченский А.С., Телеснина В.М. Сравнительная характеристика постагрогенных почв южной тайги в разных литологических условиях // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2007. № 4. С. 3—11.
- 6. Владыченский А.С., Рыжова И.М., Телеснина В.М., Галиахметов Р.Т. Пространственно-временная динамика содержания органического углерода в дерново-подзолистых почвах постагрогенных БГЦ // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2009. № 2. С. 3—9.
- 7. Владыченский А.С., Телеснина В.М., Румянцева К.А., Чалая Т.А. Органическое вещество и биологическая активность постагрогенных почв южной тайги на примере Костромской области // Почвоведение. 2013. № 5. С. 518—529.
- 8. *Гончарова И.Б., Востокова Л.Б.* Биологическая продуктивность и зольный состав растительности аллювиальных луговых почв поймы Северной Двины // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 1992. № 4. С. 17—25.
- 9. *Ерохова А.А.*, *Макаров М.И.*, *Моргун Е.Г.*, *Рыжова И.М.* Изменение состава органического вещества дерново-подзолистых почв в результате естественного восстановления леса на пашне // Почвоведение. 2014. № 11. С. 1308—1314.
- Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н. Определение запасов углерода по зависимым от возраста насаждений конверсионно-объемным коэффициентам // Лесоведение. 1998. № 3. С. 84—93.
- 11. *Казакова А.И., Семиколенных А.А., Горнов А.В., Горнова М.В., Лукина Н.В.* Влияние растительности на лабильные характеристики лесных почв зандровых местностей заповедника "Брянский лес" // Вестник Моск. ун-та, сер. 17. Почвоведение. 2018. № 3. С. 9—15.
- Караваева Н.А. Агрогенные почвы: условия среды, процессы, свойства // Почвоведение. 2005. № 12. С. 1518–1529.
- 13. *Карелин Д.В., Люри Д.И., Горячкин С.В., Лунин В.Н., Кудиков А.В.* Изменение почвенной эмиссии диоксида углерода в ходе постагрогенной сукцессии в черноземной лесостепи // Почвоведение. 2015. № 11. С. 1354—1366
 - https://doi.org/10.7868/S0032180X1511009X
- 14. *Карелин Д.В., Горячкин С.В., Кудиков А.В., Лопес де Гереню В.О., Лунин В.Н., Долгих А.В., Люри Д.И.* Изменение запасов углерода и эмиссии CO₂ в ходе постагрогенной сукцессии растительности на серых почвах в европейской части России // Почвоведение. 2017. № 5. С. 580—594.
- 15. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.
- Копцик Г.Н., Куприянова Ю.В., Кадулин М.С. Пространственная изменчивость эмиссии диоксида углерода в основных типах лесных экосистем Звенигородской биостанции МГУ им. М.В. Ломоно-

- сова // Вестник Моск. ун-та, сер. 17. Почвоведение. 2018. № 2. С. 40—47.
- 17. Кузнецова А.И., Лукина Н.В., Тихонова Е.В., Горнов А.В., Горнова М.В., Смирнов В.Э., Гераськина А.П., Шевченко Н.Е., Тебенькова Д.Н., Чумаченко С.И. Аккумуляция углерода в песчаных и суглинистых почвах равнинных хвойно-широколиственных лесов в ходе послерубочных восстановительных сукцессий // Почвоведение. 2019. № 7. С. 803—816. https://doi.org/10.1134/S0032180X19070086
- Литвинович А.В. Постагрогенная эволюция хорошо окультуренных дерново-подзолистых почв северо-запада Нечерноземной зоны // Агрохимия. 2009. С. 85–93.
- 19. Литвинович А.В., Плылова И.А. Изменение кислотно-основных свойств дерново-подзолистой суглинистой почвы в процессе постагрогенной эволюции // Научное обеспечение развития АПК в условиях реформирования. СПб., 2009. С. 160—164.
- 20. Лукина Н.В., Орлова М.А., Бахмет О.Н., Тихонова Е.В., Тебенькова Д.Н., Казакова А.И., Крышень А.М., Горнова М.В., Смирнов В.Э., Шашков М.П., Ершов В.В., Князева С.В. Влияние растительности на характеристики лесных почв республики Карелия // Почвоведение. 2019. № 7. С. 827—842. https://doi.org/10.1134/S0032180X19050071
- 21. Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010.
- 22. Люри Д.И., Карелин Д.В., Кудиков А.В., Горячкин С.В. Изменение почвенного дыхания в ходе постагрогенной сукцессии на песчаных почвах в южной тайге // Почвоведение. 2013. № 9. С. 1060—1072.
- 23. *Макаров И.Б.* Дифференциация пахотного горизонта дерново-подзолистых почв в условиях их окультуривания. Автореф. ... дис. канд. биол. наук. М., 1981. 249 с.
- Матинян Н.Н., Бахматова К.А., Алексеев С.С. Постагрогенная трансформация почв, сформированных на контрастных по гранулометрическому составу породах // Гумус и почвообразование. СПб., 2007. С. 52–60.
- 25. Морозов А.М., Николаева И.О. Особенности лесообразовательного процесса на пашне и сенокосе // Вестник Алтайского гос. аграрного ун-та. 2013. № 5(103). С. 82–86.
- Огуреева Г.Н. Ботанико-географическое районирование СССР. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. 76 с.
- Овсепян Л.А. Постагрогенная динамика запасов и состава органического вещества серых лесных почв московской области // Материалы по изучению русских почв. Вып. 9(36). СПб., 2017. С. 229—232.
- Ремезов Н.П., Погребняк П.С. Лесное почвоведение. М.: Лесная промышленность, 1965. 323 с.
- 29. Романовская А.А., Коротков В.Н., Карабань Р.Т., Смирнов Н.С. Динамика элементов баланса углерода на неиспользуемых пахотных угодьях Валдайской возвышенности // Экология. 2012. № 5. С. 347—352.
- 30. Рыжова И.М., Ерохова А.А., Подвезенная М.А. Динамика и структура запасов углерода в постагро-

- генных экосистемах южной тайги // Почвоведение. 2014. № 12. С. 1426—1435. https://doi.org/10.7868/S0032180X14090111
- 31. *Рыжова И.М., Ерохова А.А., Подвезенная М.А.* Изменение запасов углерода в постагрогенных экосистемах в результате естественного восстановления лесов в Костромской области // Лесоведение. 2015. № 4. С. 307—317.
- 32. Телеснина В.М., Ваганов И.Е., Карлсен А.А., Иванова А.Е., Жуков М.А., Лебедев С.М. Особенности морфологии и химических свойств постагрогенных почв южной тайги на легких отложениях (Костромская область) // Почвоведение. 2016. № 1. С. 115—129.
- 33. Телеснина В.М., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Овсепян Л.А., Личко В.И., Ермолаев А.М., Мирин Д.М. Динамика свойств почв и состава растительности в ходе постагрогенного развития в разных био-климатических зонах // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1514—1534.
- 34. *Чернов Д.В.*, *Кириллова Е.Л.* Особенности морфологии дерново-подзолистых целинных, пахотных и залежных почв // Гумус и почвообразование. СПб., 2000. С. 145–152.
- 35. *Bosatta E., Agren G.I.* Theoretical analysis of microbial biomass dynamics in soil // Soil Biol. Biochem. 1994. V. 26. P. 143–148.
- 36. Collins H.P., Elliot E.T., Paustian K, Bundy L.G., Dick W.A., Huggins D.R., Smucker A.J. M., Paul E.A. Soil carbon pools and fluxes in long-term corn belt agroecosistems // Soil Biol. Biochem. 2000. V. 32. № 2. P. 157–168.
- De Oliveira Ferreira A., Jorge Carneiro Amado T., Da Silveira Nicoloso R., De Moraes Sa J.C., Ernani Fiorin J., Santos Hansel D.S., Menefee D. Soil carbon stratification affected by long-term tillage and cropping systems in southern Brazil // Soil Tillage Res. 2013. V. 133. P. 65–74.
- 38. Falkengren-Grerup U., Brink D-J., Brunet J. Land use effects on soil N, P, C and pH persist over 40–80 years of forest growth on agricultural soils // Forest Ecol. Manag. 2005. V. 225.
- 39. *Franzlluebbers A.J.* Depth distribution of soil organic carbon as a signature of soil quality // 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. Brisbane, 2010. P. 1–4.
- 40. *Kalinina O., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Lyuri D.I., Najdenko L., Giani L.* Self-restoration of post-agrogenic sandy soils in the southern Taiga of Russia: Soil development, nutrient status, and carbon dynamics // Geoderma. 2009. V. 152. № 1. P. 35–42.
- 41. *Kalinina O., Krause S.-E., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Lyuri D.I., Giani L.* Self-restoration of postagrogenic chernozems of Russia: soil development, carbon stocks, and dynamics of carbon pools // Geoderma. 2011. V. 162. P. 196–206.
- 42. *Kalinina O., Chertov O., Dolgikh A.V., Goryachkin S.V., Lyuri D.I., Vormstein S., Giani L.* Self-restoration of post_agrogenic Albeluvisols: Soil development, carbon stocks and dynamics of carbon pools // Geoderma. 2013. V. 207–208. P. 221–233.
- 43. Kalinina O., Goryachkin S.V., Lyuri D.I., Luise Giani. Post-agrogenic development of vegetation, soils, and

- carbon stocks under self-restoration in different climatic zones of European Russia // Catena. 2015. V. 129. P. 18–29.
- 44. *Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Six J., Kuzyakov Y.* Carbon cost of collective farming collapse in Russia // Glob. Change Biol. 2014. V. 20. P. 938–947.
- 45. Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Y. Largescale carbon sequestration in post-agrogenic ecosystems in Russia and Kazakhstan // Catena. 2015. V. 133. P. 461–466.
- 46. *Lopez-Fando C.*, *Pardo M.T.* Soil carbon storage and stratification under different tillage systems in a semi-arid region // Soil Tillage Res. 2011. V. 111. P. 224–230.
- 47. Wolters V., Joergensen R.G. Microbial carbon turnover in beech forest soill at different stages of acidification // Soil Biol. Biochem. 1991. V. 23. P. 897–202.
- 48. Xu M., Wang Z., Zhao Yu. Stratification ratio of soil organic carbon as an indicator of carbon sequestration and soil quality in ecological restoration // Restoration Ecology. 2017. https://doi.org/10.1111/rec.12597

Dynamics of Soils Properties and Carbon Stocks Structure in Postagrogenic Ecosystems of Southern Taiga during Natural Forest Restoration

I. M. Ryzhova¹, V. M. Telesnina^{1, *}, and A. A. Sitnikova¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia *e-mail: vtelesnina@mail.ru

The dynamics of some soil properties, as well as carbon stocks, in the main components of postagrogenic ecosystems during natural reforestation, depending on lithological conditions and the nature of former land use were studied with the example of four chronosequences in Kostroma oblast. In the course of forest restoration, soil acidity increases and the content of exchangeable bases decreases in the upper part of the soil profile; this trend is better pronounced in sandy soils. The content and stocks of organic carbon dynamics are determined by the land use type, while the intensity of the postagrogenic dynamics is determined by the native properties of the soil. As forest vegetation is restored, a gradual differentiation of the arable layer according to its carbon content and reserves is going on, and it is most pronounced in 90–100 year-old forest soils. Approximately during 100 years, the total stock of organic carbon in an ecosystem increases by 7–9 times when overgrowing the arable land, and by 3.5 times in case of hayfields overgrowing. The structure off ecosystem carbon deposit changes – soil carbon part decreases from 80 to 50% for 20 years, while detritus part increases by 10%.

Keywords: abandoned lands, carbon, post-agrogenic soils, succession, Albic Podzol, Albic Retisol

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 502(571.53)

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ПРИ ДОБЫЧЕ ГАЗА В СРЕДНЕМ ПРИАНГАРЬЕ

© 2020 г. И. А. Белозерцева^{а, b, *}

^аИнститут географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Улан-Баторская, 1, Иркутск, 664033 Россия ^bИркутский государственный университет, ул. Сухэ-Батора, 5, Иркутск, 664011 Россия *e-mail: belozia@mail.ru

Поступила в редакцию 27.09.2018 г. После доработки 10.07.2019 г. Принята к публикации 20.09.2019 г.

По результатам многолетних исследований составлена почвенная карта наиболее освоенной части газоконденсатного месторождения Среднего Приангарья. Территория исследования входит в Северо-Прибайкальскую горную провинцию с подзолистыми (Podzols), дерново-подзолистыми (Folic Retisols) почвами, торфяно-подзолами (Histic Podzols), торфяно-криоземами (Histic Cryosols), серогумусовыми (Cambisols) и темногумусовыми (Phaeozems) почвами. Выявлено природное разнообразие почвенного покрова и уровни содержания в нем макро- и микроэлементов. Установлено, что в почвах некоторых площадок обустройства газоконденсатного месторождения содержание нефтепродуктов, свинца, цинка, никеля и хрома превышает фоновые значения и санитарно-гигиенические нормы. На территории базы и некоторых буровых скважин месторождения изменился состав почвенных вод, наблюдается хлоридное засоление почв. Проведено экологическое районирование территории по категориям значимости для человека и экосистемы и чувствительности почв к антропогенному воздействию. Большая часть территории месторождения пригодна для использования и освоения. Рекомендуется отказаться от использования высокозначимых почв мерзлотно-таежных и ценных коренных ландшафтов, а также высокочувствительных почв крутых склонов. В зону преимущественного улучшения с последующим переводом в категорию экстенсивного использования отнесены участки с сильно нарушенным напочвенным покровом и дерновым горизонтом.

Ключевые слова: картографирование, загрязнение, экологическое районирование, газоконденсатное месторождение, Иркутская область

DOI: 10.31857/S0032180X20020021

ВВЕДЕНИЕ

В северной части Лено-Ангарского плато расположено Ковыктинское газоконденсатное месторождение (**КГКМ**) — одно из самых крупных на территории Восточной Сибири.

Основные загрязнители окружающей среды при строительстве скважин — буровые и тампонажные растворы, шлам, буровые сточные воды, пластовые минерализованные воды, продукты испытания скважин, продукты сгорания топлива, материалы для приготовления, обработки растворов для бурения и крепления скважин, горюче-смазочные материалы, хозяйственно-бытовые сточные воды. Наряду с техногенным источником солевого загрязнения, существует природный — пластовые рассолы (глубинные подземные воды, которые оказываются на поверхности в процессе добычи газа). При глубинном бурении случаются аварийные выбросы напорных подземных вод.

Нефтяную эколого-геохимическую тематику начали разрабатывать в МГУ им. М.В. Ломоносова под руководством М.А. Глазовской и В.Н. Флоровской. В начале 1970-х гг. М.А. Глазовская создала новое научное направление — геохимию техногенных ландшафтов [14, 15, 42]. В.Н. Флоровская была ведущим специалистом страны в области люминесцентной битуминологии, геохимии углеродистых веществ в горных породах, геохимических методов поисков месторождений нефти и газа [44]. Н.П. Солнцевой, Ю.И. Пиковским, Т.А. Теплицкой и др. разработаны схемы районирования территории по типам возможных изменений природной среды при нефтедобыче, строительстве нефтепроводов и транспортировке нефти, проведено обоснование системы фонового мониторинга техногенных углеводородов [31, 34, 39, 401.

Добыча нефти и газа сопровождается существенными изменениями геологической среды.

Снижение пластового давления вызывает уплотнение пород и постепенную усадку земной поверхности, что может приводить к увеличению заболоченности территории и увеличению мощности сезонно-талого слоя [20]. В районах добычи, транспортировки, хранения и переработки нефти наблюдается нефтяное загрязнение почв [17, 32, 37, 41]. Водяницким с соавт. [11, 12] выявлено, что в торфе, загрязненном нефтью, резко увеличивается зольность, а в золе торфа — обогащенность ТМ. Анализ почвогрунтов и донных отложений Одинцовой и Бачуриным [30] показал, что при отсутствии визуальных признаков нефтезагрязнения наибольшее содержание органических соединений характерно для проб торфяников.

Почвенно-географическое изучение территории Лено-Ангарского плато проводилось в период разведки месторождения [1, 23, 36], а в период его освоения детальные почвенно-геохимические исследования были сосредоточены непосредственно в районе КГКМ [24, 28, 29].

Цель работы — картографирование почв газоконденсатного месторождения Иркутской области и экологическое районирование территории по категориям значимости (для человека и экосистемы) и чувствительности почв к антропогенному воздействию.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Газоконденсатное месторождение расположено в междуречье Лены и ее правого притока Киренги (рис. 1). Основной морфоструктурой является Лено-Ангарское плато.

Согласно физико-географическому районированию [43], на территории Среднего Приангарья выделены таежные, в том числе мерзлотно-таежные ландшафты равнин и низкогорий таежной области Среднесибирской страны. По геоботаническому районированию [4] район исследования относится к Верхнеленскому горно-таежному кедровому округу Лено-Ангарской горно-таежной провинции Среднесибирской таежной области. В соответствии с более детальной геоботанической картой [25] выделяются горные редколесные (лиственница Гмелина (Larix gmelinii), лиственница (Larix sibirica), кедр (Pinus sibirica), ель и пихта сибирские (Picea obovata, Abies sibirica), хвойные (пихта, кедр, ель и лиственница сибирские) южно-Сибирские и горно-равнинные хвойнолесные (лиственница Гмелина; ель и кедр сибирские), горно-котловинные хвойно-лесные (сосна обыкновенная (Pinus sylvestris); лиственница, кедр, пихта и ель сибирские) среднесибирские формации.

Основная часть площади месторождения приходится на лесные земли — 94%. Площадь терри-

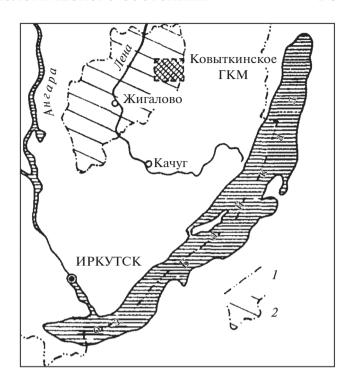


Рис. 1. Местоположение Ковыктинского газоконденсатного месторождения; границы: I — южной части Иркутской области; 2 — территории КГКМ с обозначением в ее пределах участка мониторинговых исследований в районе п. Жигалово.

тории, не покрытая лесом, невелика (6%) и представлена лугами и кустарниками долин, горными редколесьями, каменистыми мохово-лишайниковыми и кустарничково-травяными пустошами. На дороги, буровые площадки и другие объекты производственно-бытового назначения приходится около 0.5% площади месторождения [45].

Объект исследования – почвы Ковыктинского газоконденсатного месторождения Иркутской области, действующего с 1987 г. Площадь Ковыктинского лицензионного участка, на котором ведется основная добыча газа, составляет около 4.4 тыс. км². В 2005—2012 гг. проводили почвенно-геохимические работы на Лено-Ангарском плато с отбором проб почв. Отбор проб почвы вели в соответствие с действующими ГОСТ 17.4.3.01-83 и методическими рекомендациями по выявлению деградированных и загрязненных земель [26]. Всего заложено более 250 почвенных разрезов, из которых для физико-химических анализов отобрали более 600 образцов. Диагностику почв осуществляли на основе морфологических описаний в соответствии с принципами Классификации и диагностики почв России [21].

Химические анализы почв проводили по общепринятым методикам в лицензированном химикоаналитическом центре Института географии СО РАН. Валовые концентрации металлов определяли атомно-эмиссионном спектральном методом на приборе Optima 2000DV (ПНДФ 16.1:2.3:3.11-98). Общее содержание и качественный состав легкорастворимых солей исследовали в водной вытяжке [3]. Актуальную кислотность водной суспензии (р $H_{H,0}$) — потенциометрическим методом (ГОСТ 26212-91). Содержание органического углерода (C_{opr}) — методом мокрого сжигания по Тюрину [3]. Концентрацию нефтепродуктов в пробе — флуориметрическим методом. Экологическое районирование территории осуществляли с использования почв в ландшафтном планировании, разработанной сотрудниками ИГ СО РАН [35].

Почвы

Согласно почвенно-географическому районированию [19], территория исследования входит в Северо-Прибайкальскую горную провинцию. По почвенно-экологическому районированию [6, 27] территория исследования входит в округ высоких (со средними высотами 900—1000 м, с запада на восток высотные отметки изменяются от 700 до 1508 м) плато с подзолистыми, торфяно-подзолами, торфяно-криоземами, серогумусовыми, темногумусовыми и дерново-подзолистыми почвами. Округ включен в провинцию подзолистых, буроземов, серых и темногумусовых почв Иркутского амфитеатра.

На основе опубликованных материалов [1, 13, 23, 24, 28, 29, 33] и результатов проведенных исследований выявлены следующие основные типы почв: подзолы, дерново-подзолы, торфяноподзолы, подзолистые, дерново-подзолистые, буроземы, буроземы темногумусовые, криоземы, торфяно-криоземы, подбуры, дерновоподбуры, торфяно-подбуры глеевые, темногумусовые, перегнойно-темногумусовые, серогумусовые, карбопетроземы, карболитоземы темногумусовые и перегнойно-гумусовые, слоисто-аллювиальные (гумусовые), аллювиальные темногумусовые и гумусовые, аллювиальные перегнойно-глеевые, аллювиальные торфяно-минеральные и торфяно-глеевые. Техноземы имеют локальное распространение на площадках буровых скважин. Их профиль маломощный, морфологически не дифференцирован часто состоит из минеральных, иногда перемешанных горизонтов. После консервирования буровых площадок происходит восстановление почвенно-растительного покрова. На площадке буровой скважины КГКМ по истечении 10 лет после консервирования в подросте восстановительной серии ландшафта наблюдается небольшой мощности подстилка (до 5 см) и дерновый горизонт (до 3 см), увеличение содержания гумуса в верхнем горизонте почв в 1.5 раза. Однако период самовосстановления мерзлотно-таежных и тундровых ландшафтов может длиться сотни лет [40].

На основе полевых исследований с использованием тематических карт (геологических, топографических, растительности), а также космо- и фотоснимков, составлена почвенная карта Ковыктинского газоконденсатного месторождения (рис. 2, табл. 1).

Почвенный покров разнообразен. В его формировании ведущая роль (на фоне биоклиматических факторов) принадлежит рельефу и почвообразующим породам. Абсолютная и относительная высота местности, экспозиция и крутизна склонов показатели, определяющие природные особенности территории в естественном состоянии и устойчивость почвенного покрова к нарушениям. На пологих склонах северной экспозиции и в долинах рек встречается многолетняя или медленно оттаивающая сезонная мерзлота, что отражается на характере почвенно-растительного покрова. Широко распространены карбонатные породы – известняки и доломиты, вместе с песчаниками и аргиллитами слагающие водораздельные поверхности и верхние части склонов. Нижние части склонов сложены верхнекембрийскими отложениями верхнеленской свиты, представленными красноцветными карбонатно-силикатными песчаниками и мергелями. В нижней подсвите преобладают мергели, а в верхней – песчаники [46]. Эта особенность пород оказалась существенным фактором в формировании почв и их устойчивости.

Дифференцирующая роль мезорельефа проявилась в закономерной смене групп типов почв от вершин увалов к долинам рек. Так, водораздельные поверхности преимущественно заняты торфяно(дерново)-подзолами, (торфяно)-подбурами и криоземами в сочетании с подзолистыми перегнойными и подбурами перегнойными. На крутых склонах развиты буроземы, карболитоземы темногумусовые и перегнойно-гумусовые, карбопетроземы. На покатых склонах доминируют подзолистые, дерново-подзолистые (остаточно-карбонатные), дерново-подбуры, встречаются буроземы темногумусовые.

В подгольцовом и горнотаежном поясах под ассоциациями с лишайниковыми, моховым и кустарничковым напочвенным покровом распространены подбуры. На доломитах и карбонатных песчаниках формируются подзолистые и дерново-подзолистые остаточно-карбонатные почвы. На красноцветных карбонатно-силикатных отложениях встречаются буроземы оподзоленные, буроземы темногумусовые по классификации [21] (бурые лесные, дерново-карбонатные выщелоченные по классификации [22]).

Большинство почв Ковыктинского газоконденсатного месторождения по сопротивляемости к внешним воздействиям и способности к восста-

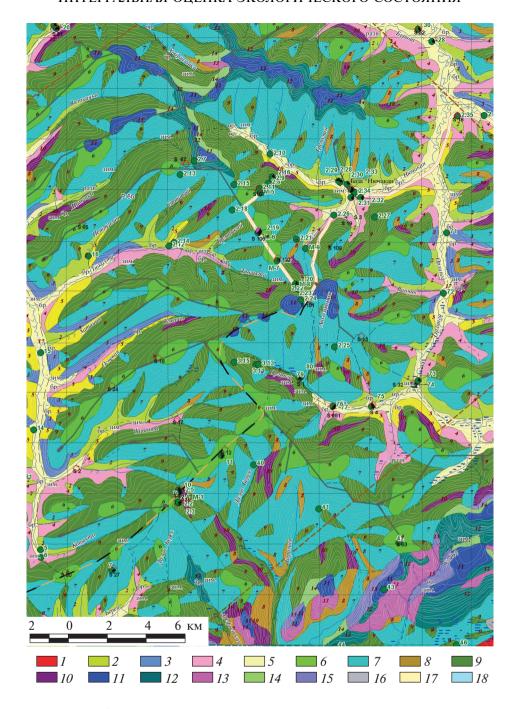


Рис. 2. Почвы центрального участка Ковыктинского ГКМ (табл. 1).

новлению нарушенных свойств можно отнести к среднеустойчивым [7]. Критериями устойчивости почв для дальнейшего освоения и хозяйственного использования территории являются: крутизна склона, степень покрытия поверхности почвеннорастительным покровом; наличие многолетней мерзлоты; гранулометрический состав, развитость и мощность почвенного профиля и т.п. В целом устойчивость почв уменьшается от невысоких выровненных поверхностей или пологих склонов с

увеличением высоты и крутизны склонов. В этом же направлении происходит смена суглинистых отложений каменистыми с малой мощностью рыхлой толщи, ухудшается теплообеспеченность. В северной части месторождения наблюдается невысокая устойчивость почв, так как там широко распространены мерзлотные почвы. Многолетняя мерзлота в почвах с мохово-перегнойным и торфянистым горизонтами зафиксирована на глубине 35—40 см и реже 60 см.

Таблица 1. Легенда к карте "Почвы Ковыктинского ГКМ"

1 аолица	1. Легенда к карте	почвы ковыктинско	OIO I KWI		
№ контура	Основные почвы	Сопутствующие почвы (около 15— 20% от площади контура)	Встречающиеся почвы (около 5— 10% от площади контура)	Рельеф	Подстилающие и коренные породы
1	Торфяно-крио- земы	Торфяно-подзолы	Торфяно-под- буры глеевые	Водораздел с абс. выс. 650-1070 м	Красноцветные карбонатно-сили-
2	Подбуры иллюви- ально-гумусовые	Буроземы оподзо- ленные	Серогумусовые типичные	Южный пологий склон (с клоном <15°)	катные отложения
3	Дерново-подзо- листые остаточно- карбонатные	Серогумусовые глинисто-иллювиированные	Буроземы типич- ные	Южный склон средней крутизны (15°—30°)	
4	Криоземы	Торфяно-криоземы	Торфяно-под- буры глеевые	Северный пологий склон (<15°)	
5	Торфяно-подзо- листые	Дерново-подзоли- стые остаточно-кар- бонатные	Буроземы темные	Северный склон средней крутизны (более 15°—30°)	
6	Дерново-подзо- листые типичные	Подзолистые типичные	Подбуры грубогу- мусированные	Водораздел абс. выс. 700-1080 м	Пестроцветные карбонатные пес-
7	Подзолистые остаточно-карбо- натные	Карболитоземы темногумусовые глинисто-иллюви-альные	Серогумусовые глинисто-иллю- виированные	Южный пологий склон (<15°)	чаники, алевро- литы, известняки, мергели, аргил- литы
8	Карбопетроземы	Карболитоземы темногумусовые	Буроземы темные остаточно-карбонатные	Южный крутой склон (>30°)	
9	Карболитоземы перегнойные	Дерново-подзоли- стые, темногумусо- вые глинисто- иллювиированные	Карболитоземы перегнойные	Северный пологий склон (<15°)	
10	Карболитоземы темногумусовые	Карболитоземы темногумусовые глинисто-иллювиальные	Темногумусовые глинисто-иллю-виированные	Северный крутой склон (>30°)	
11	Подзолы	Дерново-подзолы	Торфяно-подзолы	Водораздел абс. выс. 500-800 м	Бескарбонатные песчаники, алев-
12	Криометаморфи- ческие грубогуму- совые	Органо(пере- гнойно)-криомета- морфические	Дерново-подзолы	Южный пологий склон (<15°)	ролиты, аргил- литы
13	Буроземы оподзо- ленные	Подбуры оподзо- ленные	Дерново-подзо- листые	Южный склон средней кругизны (15°—30°)	
14	Подбуры пере- гнойные	Подзолистые пере- гнойные	Дерново-подзо- листые оподзо- ленные, криоземы	Северный пологий склон (<15°)	
15	Подбуры оподзо- ленные	Дерново-подзоли- стые	Буроземы	Северный склон средней крутизны (15°-30°)	
16	Темногумусовые метаморфизованные, аллювиальные гумусовые	Перегнойно-темно- гумусовые	Аллювиальные темногумусовые, криоземы	Высокие террасы	Красно-бурые пески, супеси с иногда карбонатной галькой

Таблица 1. Окончание

№ контура	Основные почвы	Сопутствующие почвы (около 15— 20% от площади контура)	Встречающиеся почвы (около 5— 10% от площади контура)	Рельеф	Подстилающие и коренные породы
17	Аллювиальные темногумусовые	Аллювиальные гумусовые, слоисто- аллювиальные	Аллювиальные перегнойно-глеевые, торфяно-минеральные, торфяно-глеевые, торфяно-криозем глееватый	Пойма, террасы средней высоты	Аллювий с разно- образными поро- дами: от илов и глин до песчано- галечниковых отложений
18	Аллювиальные торфяно-минеральные, торфяно-глеевые	Аллювиальные перегнойно-глее-вые, темногумусовые (глеевые)	Слоисто-аллюви- альные гумусовые, торфяно-криозем глееватый	Низкая пойма	Мощные торфяники с разнообразными аллювиальными отложениями (от глин до песчаных отложений)

Практически во всех почвах территории наблюдаются пирогенные изменения (прогорание подстилки и органических горизонтов, остатки древесного угля, изменение органического вещества, реакции почв и т.п.) в результате лесных пожаров в разное время и в различной степени. На отрицательных элементах рельефа в связи с дополнительным поступлением талых вод усиливается заболачивание (в случае уничтожения растительности в результате вырубок и пожаров). С повышением увлажнения собственно торфянокриоземы эволюционируют в торфяно-криоземы глеевые, а в дальнейшем — в торфяно-глееземы. В мерзлотных подзолистых почвах при этом также развиваются процессы оглеения и оторфования.

На территории котлованов, выемок, канав и насыпей возобновление растительности затруднено из-за отсутствия почвенного покрова, бедности элементами питания и неблагоприятных водно-физических свойств подстилающих пород. На склонах в условиях не только с многолетней, но и с сезонной мерзлотой, нарушение почвеннорастительного покрова приводит к развитию солифлюкции [24].

Всего площадь нарушенных земель на территории Ковыктинского газоконденсатного месторождения составляет 0.25% общей территории, так как территория слабо освоена. Средняя плотность населения территории исследования составляет от 0.3 до 1 чел./км² [4].

Загрязнение почв

В табл. 2 и рис. 3 приведены результаты анализов некоторых свойств почв. Выявлено, что реак-

ция среды почвенной суспензии ($pH_{\rm H_2O}$) имеет широкий диапазон от кислых до щелочных значений. Верхние горизонты лесных почв на карбонатных породах обладают реакцией, близкой к нейтральной. Дерново-подзолистая почва отличается постоянно слабокислой реакцией по всему профилю. Невысокая кислотность этих почв отражает провинциальную особенность среднесибирских почв с дифференцированным профилем и может быть объяснена сменой в недалеком прошлом моховых темнохвойных лесов травяными светлохвойными [13, 24].

Почвы на территории площадок буровых скважин часто имеют более щелочную реакцию за счет удаления верхних горизонтов или их перемешивания с почвообразующими породами, а также техногенных солевых потоков. Содержание органического углерода в верхних горизонтах почв естественных ландшафтов высокое, более 5% [29]. Эмбриоземы и техноземы [2] на площадках размещения буровых скважин имеют более низкое содержание органического углерода – от 0.1 до 1.7%. По анализу водной вытяжки естественные почвы не засолены. Водная вытяжка почв площадок давно эксплуатируемых буровых скважин и базы "Нючакан" имеет хлориднокальциевый и хлоридно-натриевый состав. Общее количество минеральных солей водной вытяжки почв достигает 0.15%. Сильная минерализация была отмечена в 2005-2006 гг. в почве (хемозем) вблизи нерекультивированной буровой скважины в верховьях р. Типуй (1.7%) и в районе буровой скважины 18 (5.6%), на которой произошла авария в 2004 г. Авария связана с выбросом на поверхность 2200 м³ напорного пластового вы-

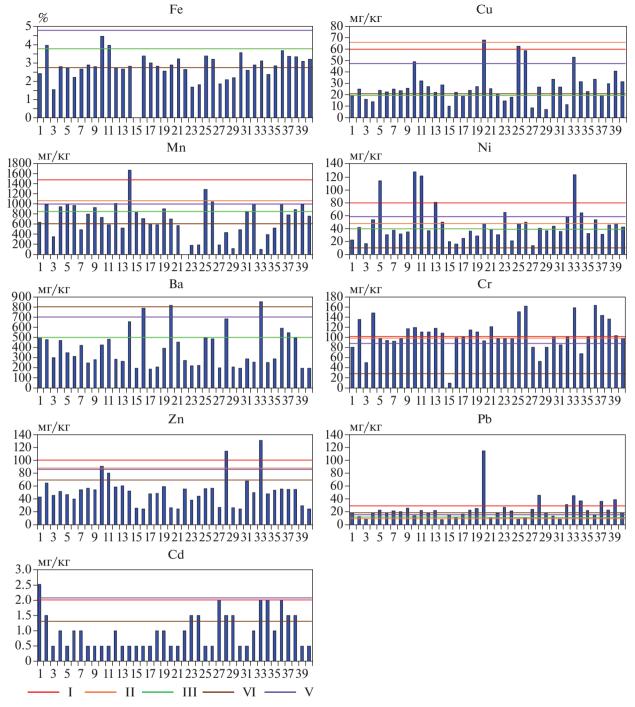


Рис. 3. Содержание Fe и микроэлементов в почвах КГКМ. Местоположение, почва, горизонт: скв. 70, дерново-подбур: 1 − гор. АҮ, 2 − [AY]; скв. 70, криозем грубогумусированный: 3 − Оао, 4 − [CR + Оао]tr; скв. 70, криозем грубогумусированный: 5 − Оао, 6 − [CR + Оао]tr; скв. 70, дерново-подбур турбированный: 7 − [AY + BF]tr; скв. 70, дерново-подбур: 8 − АҮ, 9 − BF; скв. 70, бурозем: 10 − АҮ, 11 − BM; скв. 70, бурозем: 12 − АҮ, 13 − BM [AY]; скв. 70, технозем: 14 − BM; скв. 107, дерново-подбур: 15 − АҮ, 16 − АҮ/BF; 70 м от скв. 107 на С−3, подбур грубогумусированный: 17 − Оао, 18 − BF; скв. 106, торфяно-побдур: 19 − BHFg; скв. 102, дерново-подбур: 20 − АҮ, 21 − BF; ПАЭС, Ю−В край площадки, технозем: 22 − АҮ/BF; 128 м на Ю−В от ПАЭС, торфяно-подбур: 23 − BF; ПАЭС, торфяно-подбур: 24 − BF; 545 м от ПАЭС на С−3, дерново-подбур: 25 − АҮ, 26 − BF, 27 − С; скв. 101, подзолистая грубогумусовая: 28 − Оао, 29 − EL; скв. 101, дерново-подзолистая: 30 − АҮ; скв. 104, криозем грубогумусированный: 31 − Оао; скв. 67, дерново-подзолистая: 32 − EL[AY]; 200 м от скв. 67, подзол иллювиально-гумусово-железистый: 33 − О, 34 − E, 35 − BHF; С−3 угол базы "Нючакан", дерново-подзолистая: 36 − АҮ; Ю−В угол базы "Нючакан", споисто-аллювиальная: 37 − C[AY]; база "Нючакан", эмбриозем: 38 − С; база "Нючакан", аллювиальная торфяно-минеральная: 39 − TC, 40 − C[T]. I − ПДК и ОДК для почв [ГН 2.1.7.2041-0636, ГН 2.1.7.2042-06]; II − региональный фон для почв Прибайкалья [16]; III − почвенный кларк по А.П. Виноградову [10], Добровольскому [19]; IV − кларк по А.П. Виноградову для литосферы [10].

Таблица 2. Химический анализ водной вытяжки почв ключевых участков КГКМ, 2012 г.

2		Topicome					Водо	Водорастворимые, смоль(экв)/кг	мые, смо	ль(экв)	/KT			Минера-
площадки	Почва	т оризонт, глубина, см	$C_{ m opr}, \%$	Hd	HCO ₂	Cl_	SO_4^-	NO ₅	NO ₂	Ca+	$^+$ g $^+$	K^{+}	Na+	лизация, %
					5));;	-) 1	70	1103)			2/
10	Криозем грубогумусиро-	Oao, 7–19	65.7*	5.4	0.420	0.080	0.283	Не обн.	Не обн.	0.500	0.210	0.041	0.029	0.146
	ванный турбированный, скв. 70	[CR + Oao]tr, $19-20$	3.1	5.9	0.092	0.020	0.102	*	0.078	0.152	0.101	0.002	0.017	0.016
2.4	Дерново-подбур,	AY, $3-19$	0.9	7.07	0.022	0.176	0.225	*	0.005	0.171	0.068	900.0	0.208	0.035
	скв. 70 (26)	BF, 19–37	2.2	7.34	0.464		0.204	*	0.007	0.457	0.139	0.022	0.682	980.0
9 P	Технозем, скв. 70(26)	BM, 2–4	1.7	8.25	0.791	0.658	0.363	Следы	Следы	0.375	0.142	1.193	0.222	0.111
15 P	Дерново-подбур, скв. 107	AY, 4–11	5.6	5.54	0.850	0.206	0.217	Не обн.	Не обн.	0.600	0.225	0.043	0.204	0.038
(M-5)		AY/BF, 11–25	1.2	5.35	0.130	0.375	0.125	Следы	Следы	1.138	0.018	0.338	0.129	0.081
16 P (M-6)	Дерново-подбур, скв. 106	AY, 5–13	14.4	7.00	0.875	0.538	0.604	Не обн.	0.018	0.750	0.625	Следы	0.542	0.111
		BF, 13–28	3.7	5.79	0.105	0.118	0.121	Следы	Следы	0.095	0.055	0.130	990.0	0.022
17 P (M-7)	Дерново-подбур, скв. 102	AY, 5–11	12.5	4.71	0.175	0.662	0.704	Не обн.	Не обн.	0.575	0.350	0.373	0.230	0.103
		BF, 11–29	2.7	4.91	0.050	0.138	960.0	*	*	0.135	090.0	0.069	0.008	0.119
18 P	Эмбриозем, ПАЭС	B, 2–18	9.0	4.78	0.925	0.575	0.531	*	*	1.300	0.375	0.371	0.108	0.121
2.20	Технозем, ПАЭС	B, 15–35	8.0	5.92	980.0	0.034	0.092	*	*	0.147	0.067	900.0	0.005	0.015
2.23	Дерново-подбур, ПАЭС	AY, 10–20	2.4	7.49	0.134	0.022	0.112	*	*	0.158	0.116	0.008	0.003	0.019
		BF, 20–29	1.3	7.25	0.120	0.064	0.112	*	*	0.243	0.057	0.003	0.008	0.021
		C, 29–40	0.2	5.28	0.052	0.024	0.112	*	*	0.072	0.092	0.004	0.009	0.012
2.24	Подзолистая грубогумусовая, скв. 101	EL, 15–25	2.2	5.46	0.114	0.040	0.087	*	*	0.156	0.088	0.005	0.005	0.017
19 P (M-9)	Дерново-подзолистая, скв. 101	Oao, 7–15	12.6	5.73	0.775	0.338	0.104	*	*		0.275	0.024	0.345	990.0
2.27	Криозем грубогумусиро- ванный, скв. 104	Oao, 0–15	1	7.73	0.376	0.068	0.115	*	0.008	0.418	0.134	0.007	0.015	0.042
2.1	Дерново-подзолистая, скв. 67	EL[AY], 15–28	1.6	5.19	0.018	0.048	0.158	*	Не обн.	0.036	0.092	0.011	0.068	0.021
2.15	Подзол иллювиально-	E, $5-9$	8.0	5.15	0.082	0.216	0.137	*	0.025	0.116	0.071	0.074	0.207	0.031
	железистый, скв. 67	BHF, 9–20	3.2	5.04	0.064	0.059	0.124	*	90000	960.0	0.068	900.0	0.067	0.016
2.33	Эмбриозем, база "Нюча- кан"	C, 0–20	0.1	7.20	0.224	0.240	0.0137	*	Не обн.	0.304	0.100	90000	0.206	0.041
14 P (M-4)	Аллювиальная торфяно-	TC, 4–11	65.7*	99.5	0.800	0.586	0.558	*	0.014	0.950	0.200	0.357	0.312	0.116
	минеральная, база "Нюча- C[Т], 11- кан"	C[T], 11–25	1	6.11	0.135	0.090	0.073	0.001	Не обн.	0.235	0.040	0.004	0.000	0.132
* Потери при	* Потери при прокаливании.					-	-				-			

ПОЧВОВЕДЕНИЕ № 2 2020

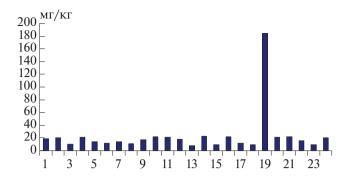


Рис. 4. Содержание нефтепродуктов в почвах КГКМ. Местоположение, горизонт: 1 — скв. 70, BF; 2 — скв. 70, AY; 3 — скв. 70, [AE]; 4 — скв. 70, Oao; 5 — скв. 70, [CR + Oao]tr; 6 — скв. 70, Oao; 7 — скв. 70, [CR + Oao]tr; 8 — скв. 70, [AY + BF]tr; 9 — скв. 70, AY; 10 — скв. 70, AY; 11 — скв. 70, BM; 12 — скв. 70, AY; 13 — скв. 107, P; 14 — 70 м от скв. 107 на С—3, Oao; 15 — скв. 106, BM; 16 — скв. 106, AY; 17 — скв. 102, BM; 18 — скв. 101, P; 19 — ПАЭС, BF; 20 — 1 км от скв. 102, ПАЭС, BF; 21 — скв. 104, AY; 22 — скв. 67, AY; 23 — база "Нюча-кан", BM; 24 — около скв. 108, AY.

сокоминерализованного рассола (рапы) с глубины около 2000 м (зона контакта бельской и усольской свит нижнего кембрия) и стеканием потока рапы в долину р. Орлингская Нюча [5]. Жидкая фаза потока имела сильнокислую среду (рН 3.3-3.5), обусловленную высокой концентрацией Cl^- (370—390 г/дм³). В общей минерализации этого рассола (700—730 г/дм³) среди катионов преобладал Ca^{2+} (около 200 г/дм³). Через несколько дней после аварийного выброса водная вытяжка из верхнего слоя почвы под рапой содержала в смоль(экв)/кг: Cl^- 370-800, $Ca^+-290-600$, $NH_4^+-80-260$, $Mg^{2+}-60-200$, Na^+ и $K^+-25-200$, общая сумма минеральных солей — 825-2886 [29].

Почвенные растворы фоновых участков часто гидрокарбонатно-кальциевые, реже — сульфатно-кальциевые. Концентрация в них ионов в ммоль(экв)/дм³: $HCO_3^- - 0.1 - 0.5$ (в среднем 0.2), $Ca^{2+} - 0.2 - 0.8$ (0.4), $SO_4^{2-} - 0.02 - 0.21$ (0.06), $Cl^- - 0.01 - 0.20$ (0.05), $Na^+ - 0.01 - 0.06$ (0.02) [29].

По результатам химических анализов экологическое состояние почв площадок буровых скважин в основном характеризуется как относительно неудовлетворительное. Содержание Мп, Zn, Ni, Cr и Pb в почвах буровых площадок превышает региональный фон Прибайкалья [16] в 1.2—12 раз. На некоторых буровых площадках содержание цинка, никеля, хрома и свинца в почвах превышает санитарно-гигиенические нормы (ГН 2.1.7.2041-06, ГН 2.1.7.2042-06) в 1.2, 1.3, 1.6 и 3.7 раз соответственно. В почвах площадок обустройства месторождения, которые эксплуатируются более 30 лет, повышенные содержания химических элементов выявлены на глу-

бине более 20 см. Концентрация определенных химических элементов в большинстве почв фоновой территории близка к их кларкам в литосфере и кислых породах.

В результате проведенных исследований химического состава 518 образцов выявлено, что фоновые уровни (среднее содержание на условно чистой территории) КГКМ для Fe, Mn, Ba, Zn, Cu, Ni, Cr, Pb и Cd в почвах центральной зоны КГКМ составили 37539, 683, 308, 42, 19, 48, 92, 18 и 0.8 мг/кг соответственно. Концентрация марганца, бария, цинка, меди, никеля, хрома, свинца и кадмия в почвах площадок буровых скважин превышает фоновые значения, установленные для территории КГКМ, в 1.9, 2.5, 2.2, 3.6, 2.6, 1.7, 6.3 и 3.1 раз соответственно.

Как следует из рис. 4, повышенное содержание нефтепродуктов (184 мг/кг) в почве для данного региона, превышающее фоновое содержание в 8 раз, но не превышающее ОДК (1000 мг/кг), зафиксировано в районе передвижной автоматизированной газотурбинной электростанции (ПАЭС). Фоновое содержание нефтепродуктов для территории Ковыктинского газоконденсатного месторождения, не затронутой деятельностью человека, составляет в среднем 21.7 мг/кг [29].

Экологическое районирование

Степень нарушения почвенного покрова в зоне освоения КГКМ высокая, но имеет локальных характер. Кроме трансформации всех ландшафтных компонентов на буровых площадках и линейных сооружениях, происходят нарушения почвенно-растительного покрова и природных вод под воздействием пирогенного и других антропогенных факторов. Для решения проблемы загрязнения почв проведено экологическое районирование территории по категориям значимости для их хозяйственного использования и сохранения ценных коренных темнохвойных лесов, а также чувствительности почв к возможным антропогенным воздействиям.

Ресурсное значение почв оценивали с позиций их потенциальной возможности к использованию в лесном и сельском хозяйстве. Поскольку преобладают территории с естественным растительным покровом, в качестве критерия оценки значения большей части почв использовали их способность к поддержанию естественной биологической продуктивности растительных сообществ.

Днища долин и их склоны представляют участки наибольшего экологического риска попадания загрязнителей в речную систему. Склоновые территории, не имеющие с водотоками непосредственной связи, и где почвенно-растительный покров, являясь площадным сорбционным барьером, имеет

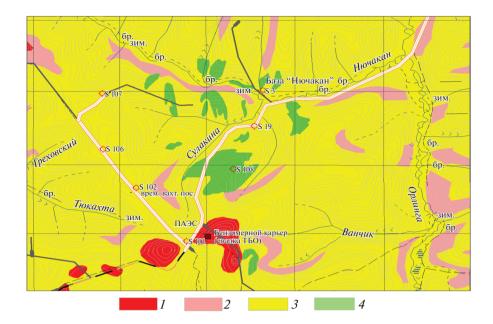


Рис. 5. Почвенно-экологическое районирование территории центрального участка КГКМ (см. табл. 3).

высокий потенциал самоочищения, относятся к зонам среднего экологического риска. Пониженный риск свойственен элювиальным геосистемам уплощенных вершин плато, структурных останцов, удаленных от речных долин.

По показателям значимости и чувствительности почв, а также составленной почвенной карте построена схема экологического районирования, согласно общей концепции ландшафтного планирования [35], ориентированной на сохранение почвенного покрова и поддержания плодородия почв, а также на минимизацию механического и химического воздействия при разработке и эксплуатации газоконденсатного месторождения. Выделены три целевые зоны: сохранение, развитие и улучшение (рис. 5, табл. 3, 4).

Оценку значимости и чувствительности почв проводили на основе ряда критериев, которые выбирали с ориентацией на приоритетную цель использования. Основная цель — сохранение и

повышение биологической продуктивности растительных сообществ.

Противоэрозионная устойчивость почв определяется, прежде всего, состоянием растительности, так как развитый растительный покров почти полностью защищает земли от эрозии.

Основная целевая функция использования территории — поддержание естественной биологической продуктивности растительных сообществ (табл. 4). Для каждого типа леса учитывали запас древесины с корректировкой на возраст и полноту древостоя, устанавливали связь растительности (коренной или производной) с почвами и включали такие почвенные показатели, как мощность гумусового горизонта, гранулометрический состав, каменистость, заболоченность, наличие мерзлоты.

Чувствительность почв к техногенному воздействию (механическому нарушению и химическому загрязнению) оценивали в четырех категориях (очень высокая, высокая, средняя, низкая).

Таблица 3. Легенда к карте "Почвенно-экологическое районирование территории центрального участка КГКМ"

№ единицы легенды (рис. 5)		Цель
1	Преимущественно сохранение современ-	Отказ от использования
2	ного состояния/использования	Сохранение существующего устойчивого экстенсивного использования или перевод в эту категорию
3	Преимущественно развитие существующего и планируемого использования	Экстенсивное развитие
4	Преимущественно улучшение/санация	Улучшение с последующим переводом в категорию экстенсивного использования

Таблица 4. Почвы и биологическая продуктивность растительных сообществ

		Биопродук	тивность
Почвы	Растительные сообщества	лесов (запас древесины), м ³ /га	лугов (поедаемая масса), ц/га
Высоко	е значение		
Торфяно(дерново)-подзолы, торфяно(дерново)подбуры, криометаморфические грубогумусовые, торфяно-криоземы, органо(перегнойно)-криометаморфические, подзолистые перегнойные, подбуры перегнойные мощные слабокаменистые на вершинных поверхностях, пологих и покатых склонах	Темнохвойные коренные с участками светлохвойных и производные на их месте	>200	
Темногумусовые, перегнойно-темногумусовые, аллювиальные темногумусовые на пологих придолинных склонах южной экспозиции, в долинах рек	Придолинные пологосклоновые, долинные луговые злаково-разнотравные, осоково-разнотравные		>10
_	е значение		1
Буроземы, буроземы темногумусовые, подзолистые, дерново-подзолистые среднемощные среднекаменистые на вершинных поверхностях, пологих и покатых склонах Аллювиальные перегнойно-глеевые и аллювиальные гумусовые в долинах рек	Светлохвойные и темно- хвойные на пологих склонах и водоразделах и производ- ные на их месте Долинные луговые разно- травно-осоковые, осоково- разнотравные	100-200	5-10
Низко	езначение		Ī
Горные маломощные сильнокаменистые на крутых склонах: карболитоземы темногумусовые и перегнойные, карбопетроземы	Светлохвойные и темно-хвойные преимущественно на крутых склонах	<100	
Аллювиальные торфяно-минеральные, торфяно-глеевые, торфяно-криоземы в долинах рек	Ерниковые из кустарниковых видов ив и берез в сочетании с осоковосфагновыми, осоковыми, редко луговыми		<5

Ее устанавливали на основе почвенных (содержание гумуса, структура, плотность, сложение, гранулометрический состав) и геоморфологических (уклон поверхности) показателей. Процессы водной и ветровой эрозии почв могут проявиться на исследуемой территории при нарушении маломощного легкосуглинистого и песчаного почвенного покрова в результате чрезмерных антропогенных нагрузок, лесных пожаров, сведения леса, перевыпаса и распашки на крутых склонах. Выделены: 1 — высокочувствительные, 2 — среднечувствительные и 3 — низкочувствительные почвы.

Обобщенные результаты оценки степени риска нарушения почв в процессе строительства и эксплуатации объектов разведочной скважины представлены в табл. 5, где по 4-балльной шкале оценены значимость тех или иных комбинаций почвенного покрова с позиций их ценности для

формирования коренных ландшафтов, пригодности к использованию в земледелии и лесном хозяйстве, чувствительность почв к техногенному воздействию (к разрушению дернины, к химическому загрязнению), и сама степень экологического риска, определенная качественно путем суммирования баллов значимости и чувствительности. Чем больше баллов, тем больше чувствительность и значимость почв.

Наиболее крупные массивы высокозначимых низкочувствительных почв представлены темногумусовыми и перегнойно-темногумусовыми слабокаменистыми разностями почв плоских склонов. По своим продуктивным и растительным свойствам они относятся к числу лучших.

К высокозначимым и выскочувствительным относятся торфяно-подзолы, торфяно-подбуры почвы,

Таблица 5. Оценка риска нарушения комбинаций почвенного покрова в процессе строительства и эксплуатации объектов разведочных скважин						
	Назначение почв	Чувствительность к техногенным				

№ единицы	Назнач	ение почв	Чувствительность к техногенным нагрузкам		Степень
легенды (рис. 2)	хозяйственное использование	сохранение ценных коренных ландшафтов	нарушению	химическому загрязнению	экологического риска
1	Низкое (1)	Высокое (3)	Высокая (3)	Высокая (3)	Высокая (10)
2	Среднее (2)	Среднее (2)	Средняя (2)	Средняя (2)	Средняя (8)
3	Среднее (2)	Среднее (2)	Средняя (2)	Средняя (2)	Средняя (8)
4	Низкое (1)	Высокое (3)	Высокая (3)	Высокая (3)	Высокая (10)
5	Низкое (1)	Очень высокое (4)	Высокая (3)	Средняя (2)	Высокая (10)
6	Среднее (2)	Среднее (2)	Средняя (2)	Средняя (2)	Средняя (8)
7	Среднее (2)	Среднее (2)	Средняя (2)	Средняя (2)	Средняя (8)
8	Низкое (1)	Низкое (1)	Очень высокая (4)	Высокая (3)	Высокая (9)
9	Низкое (1)	Низкое (1)	Очень высокая (4)	Высокая (3)	Высокая (9)
10	Низкое (1)	Низкое (1)	Очень высокая (4)	Высокая (3)	Высокая (9)
11	Низкое (1)	Очень высокое (4)	Высокая (3)	Средняя (2)	Высокая (10)
12	Низкое (1)	Высокое (3)	Высокая (3)	Высокая (3)	Высокая (10)
13	Среднее (2)	Среднее (2)	Средняя (2)	Средняя (2)	Средняя (8)
14	Среднее (2)	Среднее (2)	Средняя (2)	Средняя (2)	Средняя (8)
15	Среднее (2)	Среднее (2)	Средняя (2)	Средняя (2)	Средняя (8)
16	Высокое (3)	Низкое (1)	Низкая (1)	Средняя (2)	Низкая (7)
17	Высокое (3)	Низкое (1)	Средняя (2)	Средняя (3)	Средняя (8)
18	Низкое (1)	Низкое (1)	Высокая (3)	Очень высокая (4)	Высокая (9)

водораздельных поверхностей под ценными (для экосистемы) коренными кедровыми лесами. Среди них в качестве сопутствующих выделяются высокочувствительные подзолы, подзолы перегнойные, подбуры перегнойные, криоземы, торфяно-криоземы. Для них характерен низкий потенциал устойчивости. Нарушение торфянистых и перегнойных горизонтов приводит к резкому снижению их теплоизоляционных свойств, что может вызвать необратимые трансформации и деградацию почв при таянии многолетней мерзлоты. Происходит заболачивание с изменением физических и химических свойств почв в сторону ухудшения. Наличие мерзлотных почв ограничивает использование такой территории в поисково-промышленных целях.

Учитывая дефицит сельскохозяйственных земель, особую ценность представляют почвы речных долин. К ним относятся аллювиальные темногумусовые и гумусовые *низкочувствительные* к механическому воздействию, а также аллювиальные торфяно-минеральные, торфяно-глеевые почвы, высокочувствительные.

Среднезначимые среднечувствительные почвы занимают значительно большую площадь. Они представлены дерново-подбурами, подбурами, дерново-подбурами, дерново-подбурами, под-

золистыми, буроземами, буроземами темными на вершинных поверхностях, на пологих и покатых склонах.

Низкозначимые высокочувствительные почвы приурочены к крутым склонам и пониженным участкам речных долин. Первые отличаются коротким каменистым профилем, вторые - наличием мерзлоты. И те, и другие имеют плохие лесорастительные свойства. Почвы крутых склонов представлены широко распространенными комбинации карболитоземов темногумусовых и карбо-петроземов и менее распространенных буроземов маломощных сильнокаменистых. Почвы низких пойм такие, как аллювиальные перегнойно-глеевые, аллювиальные торфяно-минеральные, аллювиальные торфяно-глеевые, криоземы и торфяно-криоземы, чувствительны и к механическому, и химическому воздействиям. В первом случае чувствительность обусловлена наличием мерзлоты, во втором - высокой сорбционной емкостью торфа и перегнойно-гумусового горизонтов, а также присутствием мерзлотного грунта, являющегося механическим барьером.

Анализ значения и чувствительности почв позволяют сделать вывод о преобладающем распространении на территории Ковыктинского ГКМ

средне- и низкозначимых почв средней и высокой степени чувствительности. Среднезначимые среднечувствительные почвы на данной территории представляют общий фон.

Преимущественно сохранение современного состояния/использования

Отказ от использования. В эту зону включены высокозначимые и чувствительные почвы: торфяно-подзолы, дерново-подзолы, подзолы.

Очень чувствительные к эрозионным процессам почвы: высококаменистые маломощные на крутых склонах — карболитоземы темногумусовые, карбопетроземы.

Мерзлотные и торфянистые — аллювиальные торфяно-минеральные, аллювиальные торфяноглеевые, криоземы, торфяно-криоземы, криометаморфические грубогумусовые, органо(перегнойно)-криометаморфические.

Сохранение существующего устойчивого экстенсивного использования или перевод в эту категорию. Сюда вошли ценные почвы, обладающие хорошими предпосылками по биопродуктивности: дерново-подзолистые, буроземы темные, дерново-подбуры на относительно выровненных поверхностях.

Преимущественно развитие существующего и планируемого использования. Экстенсивное развитие. В эту зону включены среднезначимые среднечувствительные почвы, находящиеся в настоящее время в экстенсивном использовании. Зона занимает обширную территорию. В ее пределах распространены:

- почвы вершинных поверхностей, пологих и покатых склонов под лесом: буроземы, подзолистые, подбуры;
- почвы участков речных долин, используемые под сенокосы и пастбища: аллювиальные темногумусовые, гумусовые и перегнойно-глеевые.

Средняя чувствительность почв к водной эрозии и химическому загрязнению допускает развитие и использование отдельных частей выделенной территории. Прежде всего, это относится к участкам с уже сложившимся хозяйственным укладом или новыми способами хозяйствования, а также промышленного освоения. Такое использование почв должно носить преимущественно экстенсивный характер и быть ориентировано на

- перевод всех видов деятельности на экологически обоснованные методы ведения хозяйства и развитие тех новых видов деятельности, которые отвечают этим требованиям;
- использование методов ведения лесного хозяйства, способствующих сохранению лесных почв и их естественного плодородия:

 развитие пахотного земледелия и поддержку плодородия почв лугов с целью развития животноводства мясомолочного направления.

Преимущественно улучшение с последующим переводом в категорию экстенсивного использования. К этой зоне отнесены участки водоразделов и склонов с сильно нарушенным в результате пожаров и вырубок напочвенным покровом и дерновым горизонтом. Здесь должны быть реализованы следующие принципы улучшения: ориентация на естественное восстановление почвенного покрова, отказ от любого вида использования, повышение устойчивости почв к эрозионным процессам, сохранение указанной территории после проявления положительных результатов до полного восстановления свойственных для них растительных сообществ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Почвенный покров территории Ковыктинского газоконденсатного месторождения разнообразен. В формировании почв на фоне биоклиматических факторов ведущую роль играют литологогоморфологические. Значительную роль в почвообразовании играет многолетняя мерзлота. В результате проведенных исследований и анализа литературных данных выделено 26 основных типов и подтипов почв на данной территории. Вертикальная зональность, крутизна склонов и породы имеют определяющее влияние на формирование и пространственное распределение почв.

Наиболее трансформированными и загрязненными участками почв на территории месторождения являются площадки размещения буровых скважин. Здесь наблюдается слабое засоление и повышенное содержание цинка, никеля, хрома и свинца, превышающее санитарно-гигиенические нормы.

По категориям значимости и чувствительности почв проведено экологическое районирование исследуемой территории для потенциального их освоения и использования. Выявлено, что большая часть территории пригодна для использования, за исключением почв мерзлотно-таежных и ценных ландшафтов, например, кедровых лесов, а также крутых склонов. В результате освоения территорий мерзлотных ландшафтов наблюдаются процессы заболачивания, а на площадках крутых склонов могут активизироваться процессы эрозии почв.

В целом, природные особенности Лено-Ангарского плато — маломощные неустойчивые горнотаежные почвы на красноцветных породах, положение кедра и пихты на северной границе их ареалов, формирование в этих условиях чистого стока верховьев р. Лена — служит основанием для бережного отношения к этому уникальному ландшафту и

строгой регламентации техногенных нагрузок, ужесточения требований ко всем этапам освоения подземных ресурсов — от геолого-разведочных работ до рекультивации нарушенных земель.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Абалаков А.Д., Нечаева Е.Г., Щетников А.Г. Почвенно-геохимическое картографирование для целей охраны окружающей среды // География и природные ресурсы. 1997. № 1. С. 25–33.
- 2. Андроханов В.А. Почвенно-экологическое состояние техногенных ландшафтов: динамика и оценка. Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Новосибирск, 2005. 32 с.
- 3. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 487 с.
- 4. Атлас Иркутской области / Отв. ред. Воробьев В.В. М., 2004. 90 с.
- 5. *Белозерцева И.А.* Воздействие на почвы // Природопользование Сибири. Серия монографий "География Сибири в начале XXI в.". Иркутск, 2014. С. 244—257.
- Белозерцева И.А., Сороковой А.А. Почвенно-экологическое районирование Байкальского региона // Геодезия и картография. 2018. № 10. С. 54–64.
- 7. *Белозерцева И.А.*, *Сороковой А.А.* Устойчивость почв // Атлас развития Байкальского региона. Иркутск, 2017. http://atlas.isc.irk.ru
- 8. Белозерцева И.А., Рыжов Ю.В. Химический состав естественных и антропогенно нарушенных почв правобережного лесостепного Приангарья (на примере Боханского района Иркутской области) // Известия Иркутского гос. ун-та. Сер. Биология. Экология. 2017. Т. 20. С. 47—60.
- 9. Булатов А.И., Макаренко П.П., Шеметов В.Ю. Справочник инженера-эколога нефтедобывающей промышленности по методам анализа загрязнителей окружающей среды. М., 1999. 634 с.
- 10. *Виноградов А.П.* Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 236 с.
- 11. Водяницкий Ю.Н., Савичев А.Т., Трофимов С.Я., Шишконакова Е.А. Накопление тяжелых металлов в загрязненных нефтью торфяных почвах // Почвоведение. 2012. № 10. С. 1109—1114.
- 12. Водяницкий Ю.Н., Аветов Н.А., Савичев А.Т., Трофимов С.Я., Шишконакова Е.А. Влияние загрязнению нефтью и пластовыми водами на зольный состав олиготрофных торфяных почв в районе нефтедобычи (Приобье) // Почвоведение. 2013. № 10. С. 1253—1262. https://doi.org/10.7868/S0032180X13100146
- 13. *Воробьева Г.А.* Почвы Иркутской области: вопросы классификации, номенклатуры и корреляции. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2009. 149 с.

- 14. *Глазовская М.А.* Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. М.: Высшая школа, 1988. 328 с.
- 15. Глазовская М.А., Пиковский Ю.И., Коронцевич Т.И. Комплексное районирование территории СССР по типам возможных изменений природной среды при нефтедобыче // Ландшафтно-геохимическое районирование и охрана среды. Вопросы географии. Вып. 120. М.: Мысль, 1983. С. 84—108.
- 16. Гребенщикова В.И., Лустенберг Э.Е., Китаев Н.А., Ломоносов И.С. Геохимия окружающей среды Прибайкалья. Байкальский геоэкологический полигон. Новосибирск: Академическое изд-во "Гео", 2008. 234 с.
- Государственный доклад "О состоянии окружающей природной среды Иркутской области в 1994 г.".
 Иркутск, 1995. 203 с.
- 18. Добровольский В.В. География микроэлементов. Глобальное рассеяние. М.: Мысль, 1983. 272 с.
- 19. Добровольский Г.В., Урусевская И.С. География почв. М.: Колос, 2004. 460 с.
- 20. *Карновский Ю.З.* Экология Городов Западной Сибири: Новосибирск не самый худший. Но проблемы есть. 2009. http://experts.megansk.ru/full_news.html?id_news=67
- 21. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 c. http://soils.narod.ru
- 22. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 223 с.
- 23. Кузьмин В.А. Почвы Предбайкалья и Северного Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1988. 175 с.
- 24. *Кузьмин В.А., Белозерцева И.А.* Современное состояние почвенного покрова // Экологически ориентированное планирование землепользования в Байкальском регионе (Ковыктинское газоконденсатное месторождение). Иркутск, 2004. С. 91–99.
- 25. *Медведев Ю.О.*, *Диковская Н.В.* Растительность // Экологически ориентированное планирование землепользования в Байкальском регионе. Ковыктинское газоконденсатное месторождение. Иркутск, 2004. С. 99—110.
- 26. Методические рекомендации по выявлению деградированных и загрязненных земель. М.: Роскомзем, Минсельхозпром, Минприроды РФ, 1995. http://pandia.ru/text/78/664/70746.php
- 27. Напрасников А.Т., Белозерцева И.А., Напрасникова Е.В. География и экология почв. Иркутск, 2016. 189 c. https://elibrary.ru/download/elibrary_26269464_81162240.pdf
- 28. *Нечаева Е.Г.* Ландшафтно-геохимические изменения в тайге при геологических изысканиях подземных недр // География и природные ресурсы. 1997. № 4. С. 81–87.
- 29. Нечаева Е.Г., Белозерцева И.А. Ландшафтно-геохимический мониторинг в районе освоения подземных энергетических ресурсов Лено-Ангарского плато // Мониторинг и прогнозирование вещественно-динамического состояния геосистем сибирских регионов. 2010. С. 154—172.
- 30. *Одинцова Т.А., Бачурин Б.А.* Научно-методические подходы к организации мониторинга нефтяных

- загрязнений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 6. С. 176—182.
- 31. *Пиковский Ю.И.* Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993.
- 32. Пиковский Ю.И., Геннадиев А.Н., Краснопеева А.А., Пузанова Т.А. Углеводородные геохимические поля в почвах района нефтяного промысла // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5, География. 2009. № 5. С. 28—35.
- 33. Почвы Иркутской области. Иркутск, 1983. 223 с.
- 34. *Ровинский Ф.Я., Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А.* Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. Л.: Гидрометеоиздат, 1988.
- 35. Руководство по ландшафтному планированию. Методические рекомендации по ландшафтному планированию. М.: Государственный центр экологических программ, 2001. Т. II. 73 с.
- Сазонов А.Г. Почвенный покров и почвы междуречья Ханды и Киренги // Докл. Ин-та географии Сибири и ДВ. 1969. Вып. 21. С. 40–47.
- 37. *Середина В.П.* Оценка техногенного воздействия нефти на свойства почв Западной Сибири // Известия Томского политех. ун-та, 2003. Т. 306. № 2. С. 34—37.
- 38. Сизиков А.М. Геологическое строение // Атлас Иркутской области. М., 2004. С. 21.

- 39. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М.: Изд-во Моск, ун-та, 1998.
- 40. Солнцева Н.П. Общие закономерности трансформации почв в районах добычи нефти (формы проявления, основные процессы, модели) // Восстановление нефтезагрязенных почвенных экосистем. М.: Наука, 1988. С. 23—42.
- 41. Солнцева Н.П., Пиковский Ю.И. Геохимическая трансформация дерново-подзолистых почв под воздействием нефти // Техногенные потоки вещества в ландшафтах и состояние экосистем. М.: Наука, 1981. С. 29—40.
- 42. Техногенные потоки вещества в ландшафтах и состояние экосистем / Под ред. Глазовской М.А. М.: Наука, 1981. 255 с.
- 43. Физико-географическое районирование // Национальный атлас России. 2000. https://geographyofrussia.com/wp-content/uploads/2014/12/350-351.jpg
- 44. *Флоровская В.Н.* Люминесцентно-битуминологический метод в нефтяной геологии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1957. 291 с.
- 45. Экологически ориентированное планирование землепользования в Байкальском регионе. Ковыктинское газоконденсатное месторождение. Иркутск, 2004. 159 с.

Experience of Integrated Assessment of Soil Cover State at Production of Underground Energy Resource in Middle Angara Catchment

I. A. Belozertseva^{1, 2, *}

¹Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, 664033 Russia
²Irkutsk state university, Irkutsk, 664011 Russia
*e-mail: belozia@mail.ru

Long-term research served as a basis for compiling a soil map of the most transformed part of the gas-condensate field in the Middle Angara region. The study area refers to North Near-Baikal mountain province with podzols (Podzols), soddy-podzolic (Retisols), peat-podzols (Histic Podzols), peat-cryozems (Histic Cryosols), gray-humus (Cambisols) and dark-humus (Phaeozems) soils. Natural pedodiversity and levels of toxic chemical elements are described. In soils of some sites in the gas-condensate field, the content of oil products, lead, zinc, nickel and chrome exceed the background values; soil waters chemical composition changed, as revealed in boreholes, and weak chloride salinity was recorded. Ecological zoning of the territory according to importance for humans and environment is suggested, as well as soil rating in terms of vulnerability to human impacts. The most part of the territory of the field is suitable for use and development, except for soils of permafrost-taiga, of valuable virgin landscapes and those on steep slopes. The zone of primary improvement with the subsequent transfer to category of extensive use includes sites with strongly damaged ground cover and sod layer.

Keywords: soils, mapping, pollution, ecological zoning, gas-condensate field, Irkutsk oblast