СОДЕРЖАНИЕ

Номер 6, 2021	
Роль микробиологических процессов в формировании геохимических барьеров и окислительно-восстановительных зон при загрязнении металлами почв и водоносных горизонтов вблизи полигонов ТКО	
В. С. Путилина, Т. И. Юганова	3
ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ	
Оценка неотектонических движений в центральной части Восточно-Европейской платформы	
И. В. Коробова, В. М. Макеев	17
Сравнительный количественный анализ морфологического строения грядовых аридных ландшафтов озерных котловин применительно к решению геоэкологических задач	
Т. В. Гоников	28
Изменения объемной активности почвенного радона и температурные вариации в скважине во время процесса подготовки землетрясения	
И. А. Козлова, С. В. Бирюлин, А. К. Юрков, Д. Ю. Демежко	37
ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ	
Влияние капиллярных сил на прочность глинистых грунтов	
Ф. С. Карпенко, В. Н. Кутергин, С. И. Фролов, О. В. Сереброва	47
ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ	
Химический состав и формы нахождения металлов в водах района шахты "Люпикко-I" (Питкярантский рудный район, Карелия)	
А. А. Конышев, Е. С. Сидкина, Е. А. Солдатова, Е. В. Черкасова, И. А. Бугаев, А. С. Торопов, Д. Н. Догадкин, И. Н. Громяк, И. Ю. Николаева	55
Биогеохимический состав почв побережья Татарского пролива в зимний период	
Л. А. Гаретова, Е. Л. Имранова, О. А. Кириенко, Н. К. Фишер	68
МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ	
Оценка степени уязвимости зданий при наводнениях	
В. Н. Бурова	81
Подход к оценке загрязнения почвенного компонента природно-техногенных систем для геоэкологической безопасности города	
T F $Muuayoo R F Sauvau o F R Fyydayoo A$	99

Contents

Number 6, 2021	
The role of microbiological processes in the formation of geochemical barriers and redox zones upon pollution of soils and aquifers with metals near MSW disposal sites	
V. S. Putilina, T. I. Yuganova	3
NATURAL AND HUMAN-INDUCED PROCESSES	
Assessment of neotectonic movements in the central part of the Eastern European platform	
I. V. Korobova, V. M. Makeev	17
Geoecological landscape pattern comparison of ridge landscapes in arid lake basins	
T. V. Gonikov	28
Volume radon activity changes and thermal variations in the well during earthquake preparation	
I. A. Kozlova, S. V. Biryulin, A. K. Yurkov, D. Yu. Demezhko	37
SOIL AND ROCK ENGINEERING	
The influence of capillary forces on the strength of clay soils	
F. S. Karpenko, V. N. Kutergin, S. I. Frolov, O. V. Serebrova	47
ENVIRONMENT CONTAMINATION	
Chemical composition and metal speciation in water near the mine "Lupikko-I" (Pitkyaranta mining district, Karelia)	
A. A. Konyshev, E. S. Sidkina, E. A. Soldatova, E. V. Cherkasova, I. A. Bugaev, A. S. Toropov, D. N. Dogadkin, I. N. Gromyak, I. Yu. Nikolaeva	55
Biogeochemical composition of soils on the Tatar Strait coast in winter	
L. A. Garetova, E.L. Imranova, O. A. Kirienko, N. K. Fisher	68
RESEARCH METHODS AND TECHNIQUES	
Specific features in assessing vulnerability of buildings upon floods	
V. N. Burova	81
The approach to assessing pollution of soil component in natural-anthropogenic	

89

systems for urban geoenvironmental safety

T. B. Minakova, V. G. Zaikanov, E. V. Buldakova

УЛК 550.424. 628.4

РОЛЬ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ФОРМИРОВАНИИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ БАРЬЕРОВ И ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ ЗОН ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ МЕТАЛЛАМИ ПОЧВ И ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ ВБЛИЗИ ПОЛИГОНОВ ТКО

© 2021 г. В. С. Путилина^{1,*}, Т. И. Юганова^{1,**}

¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер., 13, стр.2, Москва, 101000 Россия *E-mail: vputilina@yandex.ru **E-mail: tigryu@gmail.com
Поступила в редакцию 03.09.2021 г.
После доработки 03.09.2021 г.
Принята к публикации 10.09.2021 г.

В статье проанализирована роль микробиологических процессов в формировании геохимических барьеров и окислительно-восстановительных зон при загрязнении почв и водоносных горизонтов металлами. Значительный вклад в загрязнение окружающей среды вносят тяжелые металлы в местах захоронения отходов, их миграция с формирующимся фильтратом в зону аэрации и подземные воды. Особое внимание уделено характеристике поведения тяжелых металлов в сменяющихся окислительно-восстановительных условиях, их трансформации и поступлению в водоносные горизонты. Рассмотрены механизмы биологического преобразования металлов и снижения их токсического воздействия на окружающую среду. Отмечено, что биологическая детоксикация природной среды представляет собой совокупность процессов метаболизма и биоконцентрирования за счет комплексообразования, сорбции и биодеградации вещества, зависящую от биологической активности окружающей среды и природы загрязняющих веществ. Биоремедиация загрязненных территорий и водоносных горизонтов — одна из наиболее безопасных, экономически эффективных, экологически чистых технологий для обезвреживания загрязненных участков территорий и водоносных горизонтов.

Ключевые слова: микробиологические процессы, геохимические барьеры, окислительно-восстановительные зоны, загрязнение, почвы, подземные воды, металлы

DOI: 10.31857/S0869780921060084

ВВЕДЕНИЕ

Преобладающей формой обращения с твердыми коммунальными отходами (ТКО) во многих странах являются полигоны их захоронения, поскольку они экономичны и могут вместить различные типы, а также большие количества отходов. Однако полигон создает серьезные проблемы для населения из-за неблагоприятных воздействий на окружающую среду. Основное потенциальное воздействие на окружающую среду полигона это загрязнение грунтовых и поверхностных вод, связанное с миграцией фильтрата, который содержит различные типы опасных органических и неорганических загрязнителей [17]. В этой связи складирование ТКО вызывает множество экологических проблем. Тяжелые металлы (ТМ), содержащиеся в ТКО, относятся к наиболее опасным потенциальным поллютантам поверхностных и подземных вод.

Загрязнение окружающей среды ТМ вызывает большую озабоченность из-за значительного превышения их допустимого содержания в различных природных средах и, как следствие, обогащения металлами пищевых цепей живых организмов.

Многие металлы и металлоиды удерживаются в свалочном теле, почвах и горных породах посредством ряда механизмов: сорбции, осаждения, ионного обмена, комплексообразования и окислительно-восстановительных преобразований [10, 33]. Все эти процессы могут участвовать в формировании геохимических барьеров — определенных зон, в которых происходит резкое изменение подвижности и, следовательно, интенсив-

ности миграции химических элементов. Существует несколько видов таких барьеров, однако в природных условиях геохимические процессы часто происходят не в пределах одного барьера, а в совокупности барьеров, избирательно действующих на преобразование элементов разных групп [4].

Сорбиионные барьеры возникают на контакте воды с сорбентами и подразделяются на сорбционные с процессом катионного обмена (глинистый тип) и сорбционные гидроксидные или карбонатные, где сорбентами являются твердые фазы гидроксидов или карбонатов. Изменение кислотно-шелочных условий среды (рН) формирует шелочной гидролитический барьер, где происходят процессы гидролитического осаждения элементов со слабой устойчивостью комплексных соединений. Сульфидный барьер связан с образованием труднорастворимых сульфидов и формируется в зонах сульфатредукции и высокого содержания сульфидных вод. Снижение рН среды приводит к образованию труднорастворимых сульфидов.

Для свалочных отложений и зон аэрации характерны окислительно-восстановительные процессы, и во многих системах они приобретают ведущее значение, формируя окислительные и восстановительные барьеры. Окислительные преобразования приводят к осаждению окисленных форм ранее растворенных восстановленных соединений. Восстановительный процесс, напротив, ведет к преобразованию хорошо растворимых форм (например, сульфатных) в труднорастворимые восстановленные соединения (например, сульфидные, карбонатные). В этом случае при изменении окислительно-восстановительных условий восстановленные металлы могут вновь перейти в подвижное состояние [10].

Геохимические процессы с участием окислительно-восстановительных реакций, ведущие к формированию или растворению геохимических барьеров, могут быть в значительной степени обусловлены или усилены микробной активностью [3, 7, 30]. Окислительно-восстановительные процессы, связанные с микробиальным восстановлением металлов, относятся к аэробным процессам, происходящим в присутствии кислорода. Микроорганизмы получают энергию и растут за счет трансформации окисляемых органических соединений или других способных к восстановлению соединений с кислородом. Однако многие реакции с участием металлов происходят и в бескислородной среде. Такие среды благоприятны для жизнедеятельности анаэробных (диссимиляторных) микроорганизмов, которые изменяют окислительное состояние металлов, получая энергию по механизму, аналогичному аэробному дыханию. При диссимиляторном восстановлении ме**таллов** электроны от органических соединений, водорода или элементной серы переносятся к окисленной форме металла, например, железа, марганца, урана, селена, хрома и др.

Понимание природы и условий существования геохимических барьеров необходимо для правильной оценки и прогноза развития геоэкологической ситуации и защиты подземных вод. В настоящее время особое внимание уделяется защите ресурсов подземных вод от загрязнения металлами, поступающими из мест складирования ТКО. По мере того, как осадки инфильтруются через отходы, образуется фильтрат, который мигрирует вниз в виде шлейфа. В фильтрате содержатся растворимые органические вещества, обеспечивающие восстановительные условия в загрязненной почве и грунтовых водах. Восстановительная среда определяет биогеохимические процессы на полигонах отходов с участием аммония, железа, марганца, бикарбоната, сульфида, метана. Основные процессы в загрязненном потоке: биологическая деградация органического вещества и различные биологические и абиотические процессы [37]. В водоносном горизонте под свалкой формируется естественный окислительно-восстановительный градиент от верхней кислородной зоны к более низкой бескислородной зоне. Растворенное органическое вещество (РОВ), фильтрующееся из свалки, разлагается в последовательности окислительно-восстановительных реакций, которые определяются микробиологическим разложением органического вещества (ОВ). Особое внимание обращается на роль в биоразложении конечных электроноакцепторных процессов (КЭАП): аэробного дыхания, денитрификации, восстановления Mn(IV), Fe(III) и SO_4^{2-} , а также метаногенеза.

Настоящая статья посвящена исследованию роли микроорганизмов в формировании геохимических барьеров и окислительно-восстановительных зон, изменяющих подвижность металлов при загрязнении зон аэрации и водоносных горизонтов.

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ И ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ

До недавнего времени большинство исследований окислительно-восстановительных процессов с микробиальным восстановлением металлов было связано с микроорганизмами, живущими в присутствии кислорода. Эти аэробные бактерии получают энергию и растут за счет ассоциации окисляемых органических соединений или других способных к восстановлению соединений с кислородом. Аэробные микроорганизмы обладают высокой способностью усваивать металлы из

окружающей среды для синтеза металл-содержащих энзимов и кофакторов и тем самым уменьшать загрязнение металлами. Некоторые аэробные микроорганизмы играют важную роль в круговороте металлов в окружающей среде за счет окисления восстановленных форм железа и марганца до оксидов [30].

Однако большое количество реакций с металлами происходит в бескислородной среде, в водоносных горизонтах и подземных водах. Диссимиляторное восстановление металлов дает энергию для поддержания роста массы микроорганизмов, как и при переносе электронов к кислороду для аэробных микроорганизмов.

Железо — один из наиболее распространенных металлов в земной коре. В присутствии кислорода железо в почвах, водоносных горизонтах и донных отложениях находится в форме окси/гидроксида Fe(III). Значительная часть железа, доступного для микробного метаболизма, находится в форме слабо окристаллизованных оксидов, которые обычно существуют как покрытия на глинистых и других частицах. В бескислородной среде Fe(III) может быть восстановлено до двухвалентного железа Fe(II), и это одна из наиболее важных геохимических реакций, которая обеспечивает формирование железо-восстановительного барьера [25, 29].

К микроорганизмам, способным участвовать в восстановлении железа, относятся Pseudomonas sp., Shewanella putrefaciens и штамм BrY, которые растут за счет энергии окисления органических соединений или водорода с восстановлением Fe(III) по реакции [24, 29]:

$$H_2 + 2Fe(III) \rightarrow 2Fe(II) + 2H^+$$
.

Другие организмы, такие как Geobacter metal-lireducens и Desulfuromonas acetoxidans, растут за счет полного окисления ОВ до двуокиси углерода в присутствии Fe(III) как акцептора электронов. Характерные реакции [24, 29]:

В результате совместной активности различных типов железовосстанавливающих микроорганизмов большой набор ОВ может окисляться с образованием мономерных соединений типа сахаров, аминокислот, ароматических и длинноцепочечных жирных кислот, которые представляют РОВ. Бактерии трансформируют сахара и аминокислоты в короткоцепочечные жирные кислоты: (преимущественно ацетат-ион), водород H_2 , двуокись углерода и др. [24].

Большинство бактерий, которые могут окислять органические соединения, способны также использовать в качестве акцепторов электронов оксиды марганца [22, 30]. Однако Mn(IV) может легко восстанавливаться и соединениями Fe(II) до Mn(II) — железо-марганец восстановительный барьер. Поэтому в ряде случаев трудно установить последовательность окислительно-восстановительных процессов.

Микробиальное восстановление сульфата до сульфида также может обеспечить абиотическое восстановление железа, так как сульфид-ион может восстанавливать Fe(III). Однако в присутствии Fe(III) восстановление сульфата тормозится из-за предпочтительности микробиального [24].

Сульфатвосстанавливающие бактерии (СВБ) влияют на подвижность металла либо непосредственно путем восстановительного преобразования ионов металла в его нерастворимые формы, либо косвенно путем формирования сульфидов металла — сульфат-восстановительный барьер. Диссимиляторные СВБ играют важную роль в цикле серы и минерализации ОВ в анаэробных средах. Кроме того, восстановление сульфата может происходить в окисленных средах обитания микроорганизмов, где анаэробные ниши и активность супероксидной редуктазы (ферментов) обеспечивают защиту СВБ от токсичности кислорода [34].

Образующийся сульфид как конечный продукт микробиального восстановления сульфата может вносить вклад в связывание металла путем восстановления его оксикатионов и оксианионов (например, ионов урана и хрома) или путем осаждения катионов металлов в виде сульфидов. Кроме того, СВБ способны увеличивать удерживание металла за счет внеклеточного связывания, клеточного поглощения и накопления металлов, процессов окисления/восстановления и осаждения на поверхностях минералов [33].

Значимыми акцепторами электронов в анаэробном метаболизме, помимо сульфатов, Mn(IV) и Fe(III), являются нитраты и двуокись углерода. В свалочных отложениях, почвах, донных осадках и горных породах, находящихся в анаэробных условиях, конкурирующие конечные акцепторы электронов, например, нитрат и трехвалентное железо (последнее в форме Fe(III)-окси/гидроксида) могут уменьшать скорость и степень микробиального восстановления [35]. Ферригидрит имеет самый высокий окислительно-восстановительный потенциал из соединений окси/гидроксидов Fe(III) и следовательно - наибольшую способность конкурировать как акцептор электронов в микробном дыхании. Например, в работе [35] отмечалось 52%-е уменьшение восстановления уранила посредством Shewanella alga в присутствии ферригидрита, тогда как ни гётит, ни гематит не влияли на восстановление уранила. Наблюдаемые различия между Fe-окси/гидроксидами обусловлены площадью их поверхности и выделением свободной энергии. Например, железо (по крайней мере первоначально) более доступно для биовосстановления в форме ферригидрита, чем гётита или гематита [15, 35].

Микроорганизмы Geobacter metallireducens и Shewanella alga могут использовать гумусовые соединения (ГС) в качестве акцепторов электронов для поддержания анаэробного окисления органических соединений и водорода. Если такой метаболизм распространен среди микроорганизмов, то он может иметь существенное значение для микробного сообщества в анаэробных средах, например, в затопленных почвах, водоносных горизонтах и донных отложениях [26].

Микробиальный перенос электронов к ГС может быть значительным для сред с низким содержанием гумуса, если в них также содержится Fe(III). При этом электроны могут затем быть вновь перемещены от ГС к железу. Такой перенос электронов может проходить в абиотических процессах в отсутствие микроорганизмов. Окисленное железом ГС может снова акцептировать электроны от гумус-восстанавливающих микроорганизмов. Таким образом, в Fe(III)-содержащей среде даже при небольшом количестве гумуса возможен перенос электронов, и этот цикл может повторяться несколько раз [26].

Микробиальное восстановление Fe(III) — важный процесс в анаэробных условиях. Восстановление Fe(III) обычно не оказывает значительного влияния на качество воды в незагрязненных неглубоких водоносных горизонтах, которые, как правило, являются аэробными. Однако, когда неглубокие водоносные горизонты загрязнены растворимыми органическими соединениями, например, из фильтратов свалок или протекающих подземных резервуаров для хранения топлива, создаются анаэробные условия, и Fe(III) становится наиболее распространенным потенциальным акцептором электронов для окисления ОВ [27]. Поэтому загрязненные органическими соединениями водоносные горизонты обычно содержат обширные зоны, в которых восстановление Fe(III) является преобладающим КЭАП. Как правило, зона, в которой преобладает восстановление Fe(III), находится ниже по потоку от зон образования метана и сульфатредукции и выше по потоку от зон восстановления нитрата и Mn(IV). Причина такого распределения заключается в том, что метаногенез и сульфатредукция могут стать важными КЭАП только тогда, когда микробиальное восстановление Fe(III) становится ограниченным из-за доступности Fe(III).

Поступление ОВ со свалочным фильтратом в водоносные горизонты на участках расположе-

ния полигонов ТКО оказывает существенное влияние на окислительно-восстановительные условия подземных вод. В результате формируются окислительно-восстановительные зоны, расположенные в определенной последовательности по мере удаления от источника загрязнения: метаногенная, восстановления сульфата, восстановления железа, марганца, нитрата и аэробная (рис. 1). Однако, окислительно-восстановительные зоны не имеют строго определенных границ и часто перекрываются, так что нельзя исключить возможность одновременного присутствия того или иного вида растворенного соединения (SO_4^{2-}/S^{2-} , Fe^{3+}/Fe^{2+} , Mn^{4+}/Mn^{2+} , NO_3^-/NH_4^+) [2, 28, 37].

Кислород подавляет рост и активность анаэробов, но обычно доступен только на краю шлейфа загрязнения. В бескислородных условиях анаэробы используют акцепторы электронов, такие как нитрат, Fe(III) или сульфат, для окисления загрязняющих веществ. Когда эти акцепторы электронов истощаются, анаэробный метаболизм продолжается путем преобразования ОВ в метан и диоксид углерода [28].

ФОРМЫ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В СМЕНЯЮЩИХСЯ ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

В свалочном теле распределение геохимических барьеров происходит локально в зависимости от типа присутствующих отходов. На первом этапе депонирования формируется, как уже упоминалось, аэробная зона до тех пор, пока в пустотах свалочного тела присутствует кислород. Аэробные условия определяются концентрациями свободного кислорода (O_2), превышающими $1.0~\rm Mr~\rm J^{-1}$, и очень низкими концентрациями всех восстановленных видов [31].

Изменение окислительно-восстановительных условий в свалочном теле связано с процессами разложения отходов, где важным компонентом является ОВ, скорость и условия трансформации которого определяют тип окислительно-восстановительных реакций. В начальной стадии захоронения отходов металлы находятся в связанной форме. В открытых свалках неглубокого залегания со свободным доступом кислорода и кислородсодержащих атмосферных осадков происходит быстрое аэробное окисление ОВ, которое сопровождается образованием карбоновых кислот и снижением рН примерно до 6-5. В этих условиях часть связанных металлов переходит в растворенное состояние. Когда кислород полностью израсходован, начинаются анаэробные процессы, и уже другие соединения, такие как нитраты, сульфаты, оксиды марганца и железа, действуют как окислители, при этом изменяются окислительно-

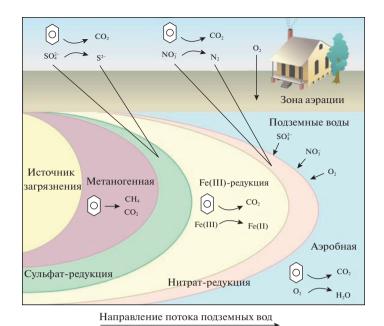


Рис. 1. Микробиальные процессы в загрязненном водоносном горизонте [28].

восстановительные условия. Анаэробное разложение ОВ сопровождается дополнительным образованием спиртов, карбоновых кислот и других органических соединений. При этом значение рН снижается примерно до 4-3, и происходит растворение многих все еще связанных соединений металлов. Эта фаза характеризуется максимальным количеством растворенных металлов в фильтрате. В ходе последующих стадий выделенные металлы будут в различной степени переадсорбироваться или переосаждаться. Если бескислородные отложения подвергаются воздействию атмосферного воздуха, то окислительно-восстановительные условия будут изменяться, при этом будет происходить окисление растворенных металлов и образование новых форм связанных металлов. Особенно часто такие процессы происходят, когда система подвергается периодическим изменениям.

Все этапы переработки свалочных отходов связаны с трансформацией ОВ и его взаимодействиями с металлами, которые на протяжении своей "жизни" в свалке с изменением окислительно-восстановительных условий могут несколько раз переходить из подвижного состояния в неподвижное, перемещаясь в теле свалке и покидая его, и, в конечном итоге, мигрировать в подземные воды [1, 7].

Особенно важной задачей является определение периода наиболее активного выхода металлов из связанного состояния в свалочном теле и возможности их поступления в водоносные горизонты. Этот период определяется аэробной фазой и анаэробной фазой ацетогенеза — образованием

карбоновых кислот и снижением pH, когда происходит активное растворение металлов и образование комплексных соединений с OB.

Изменение форм связывания тяжелых металлов — Zn, Cd, Pb и Cu — в циклах окисления—восстановления показано на примере слабо буферированных донных отложений [11]. Для эксперимента были выбраны образцы анаэробных отложений из устья р. Эльба (гавань г. Гамбург) с рН 6.43 и низким окислительно-восстановительным потенциалом —289 мВ.

Трансформация форм TM в отложениях происходила в результате следующих процессов:

- сорбция и десорбция,
- формирование и растворение карбонатных форм металлов,
- формирование и разложение растворимых и нерастворимых металлоорганических комплексных соединений,
- формирование и растворение оксидов и окси/гидроксидов,
- сорбция и соосаждение металлов с Fe/Mnоксидами, особенно в окислительной среде с нейтральным значением pH,
- осаждение сульфидов металлов в сильно восстановительной среде и растворение в форме сульфатов в окислительных условиях.

Благодаря этим процессам изменяются химические свойства соединений. На рис. 2 показана эволюция рН в трех сменяющихся окислительновосстановительных циклах в течение 210 сут.

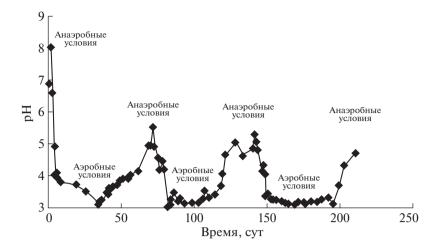


Рис. 2. Изменения рН в ходе последовательных циклов окисления—восстановления в донных отложениях р. Эльба [11].

В исхолных отложениях около 40% цинка были связаны во фракции сульфидов и органических соединений. После каждой стадии окисления доля этой фракции снижалась. По окончании 3-го окислительно-восстановительного цикла (в восстановительных условиях) в этой фракции осталось только 30% Zn. Наибольшие изменения были связаны с концентрацией растворенного Zn, которая постоянно возрастала. После восстановления в первом цикле цинк в растворе не был обнаружен. После двух последующих шиклов около 20% цинка, первоначально связанного в твердой фазе, растворилось. Снижались доли легко восстанавливаемого цинка, возрастали доли обменного цинка и связанного с карбонатом. В целом, трансформация происходила в менее устойчивых формах.

Аналогичные изменения были отмечены для кадмия. В исходных отложениях около 65% Сd были связаны в сульфид органической фракции. Эта доля постепенно снижалась. Одновременно происходило четко выраженное увеличение подвижности кадмия, особенно после стадий окисления.

Доля свинца в сульфид органической фракции была даже выше, чем для Cd и Zn. После 2-й и 3-й стадий окисления отмечалось небольшое увеличение его подвижности, которое, однако, было существенно менее значимым, чем для Cd и Zn.

Доля меди в сульфид органической фракции в исходном осадке была наивысшей по сравнению с другими металлами и никогда не была ниже 40%. Оставшаяся часть меди находилась в умеренно восстанавливаемой фракции. В течение стадий окисления содержание меди в этой фракции постоянно росло. Доля сульфид органической меди снижалась, но никогда не была ниже 40%. Только небольшая часть меди была растворена.

Таким образом, в исходных отложениях высокие доли ТМ находились в сульфид органических фракциях, которые возрастали в порядке Zn < Cd < Pb < Cu, что соответствует последовательности значений констант устойчивости сульфидных соединений металлов. При контакте с атмосферным воздухом или растворенным кислородом отложения окисляются и сульфидные соединения растворяются. В результате часть ТМ становится подвижной. В зависимости от химического состояния среды ТМ могут оставаться в растворе или переадсорбироваться на свежеосажденных оксидах железа, которые формируются при окислении [11].

МЕХАНИЗМЫ БИОРЕМЕДИАЦИИ МЕТАЛЛОВ

Фильтрат свалочных отложений содержит значительное количество ТМ, которые могут поступать в грунтовые воды и зону аэрации. Загрязнение ТМ опасно из-за токсических последствий их влияния на все формы жизни в окружающей среде. Эти металлы чрезвычайно чувствительны при низких концентрациях и могут храниться в пищевых цепях, создавая серьезную угрозу для здоровья населения. Различные органические загрязнители и металлы не поддаются разложению и остаются в окружающей среде в течение длительного времени. Микроорганизмы обладают различными механизмами связывания металлов и способностью к биосорбции [36].

Биологическое преобразование металлов — сложный процесс, который может происходить во многих средах обитания и реализовываться широким спектром микроорганизмов, в основном, бактериями и грибами. Металлы не разрушаются, но могут в результате биологической активности изменять валентность и/или преоб-

№ реакции Реагенты Продукты Окисление органического загрязнителя совместно с восстановлением Fe(III) 1 $7HCO_3^- + 36Fe(II) + 43H^+$ Толуол + 36Fe(III) + 21H₂O Восстановление растворимого металла до нерастворимой формы 2 $U(VI) + H_2*$ $U(IV) + 2H^+$ $Cr(VI) + 3/2H_2$ 3 $Cr(III) + 3H^+$ $Se(VI) + [3H_2]**$ 4 $Se(0) + 6H^{+}$ $Pb(II) + [H_2]$ 5 $Pb(0) + 2H^{+}$ $Tc(VII) + [3/2H_2]$ 6 $Tc(IV) + 3H^+$ Восстановление растворимого металла до летучей формы Hg(II) + [H₂] $Hg(0) + 2H^{+}$

Таблица 1. Реакции диссимиляторного восстановления токсичных металлов и органических соединений [25]

разовываться в менее токсичные металлоорганические соединения. Оба процесса можно рассматривать как механизмы детоксикации, поскольку в результате можно ожидать связывание металла.

Тяжелые металлы участвуют в процессе биоремедиации и могут высвобождаться из связанных форм при восстановлении оксидов железа и марганца, на которых они адсорбированы или с которыми они образуют смешанные соединения. Но при переходе в свободное состояние металлы при соответствующих условиях могут вновь образовывать труднорастворимые или нерастворимые соединения.

Многие важные загрязнители-металлы и металлоиды часто являются слаборастворимыми или более летучими в восстановленном состоянии, чем в окисленном (табл. 1) [21, 25].

Преобразования, включающие окислительновосстановительные процессы, изучались для элементов с переменной валентностью, например, ртути, хрома, урана, кобальта и др. [21, 22]. Было обнаружено несколько типов бактерий и дрожжей, восстанавливающих катионы ртути (Hg^{2+}) до элементного состояния (Hg). Это обычно приводит к испарению ртути из среды. Окисление элементной ртути до ее катионной формы может также происходить посредством микроорганизмов. Такой способностью обладают E. coli, Pseudomonas fluorescens, P. aeruginosa, Geobacter, Citrobacter sp., Bacillus subtilis и В. megatherium [22]. Хром, восстановленный теми же бактериями, нерастворим в восстановительных условиях и в среде нейтральной и слабо щелочной присутствует как $Cr(OH)_3$ [13, 22]. Изменение окислительного состояния радиоактивного Co^{3+} , связанного в устойчивые, хорошо растворимые комплексы с OB, до Co^{2+} осуществляется при участии *Geobacter metallireducens* и *Shewanella putrefaciens*. Образуются неустойчивые комплексы Co^{2+} с OB, которые в 25 раз слабее, чем комплексы с Co^{3+} , и хорошо адсорбируются почвами. В восстановлении Co^{3+} большую роль играют оксиды марганца Mn(IV), которые регулируют распределение электронов между бактериальной клеткой и оксидом Fe(III) [22].

В восстановительных условиях ТМ могут удаляться из раствора в виде сульфидных минералов, если доступно достаточное количество серы. Это характерно для меди, свинца, цинка, железа [34].

Бактерии могут повышать подвижность ТМ или радионуклидов путем их растворения и десорбиии, благодаря выделению протонов и формированию различных лигандов. Обычно в присутствии активной микробной популяции рН почв, донных осадков или осадочных пород снижается, а количество растворенного органического углерода увеличивается. Таким образом, больше металлов может быть переведено в подвижные формы комплексных соединений [18]. С другой стороны, бактерии могут адсорбировать, удерживать и связывать в комплексные соединения металлы и радионуклиды путем поверхностных взаимодействий и формирования хелатирующих агентов, в результате чего металлы переходят в более устойчивые формы. Известно о высокой сорбционной способности живой биомассы грибов для Cd и о ее низкой способности к выделению удержанного Cd [18]. Эти исследования показали, что наиболее подвижная фракция Cd в отложениях была

^{*} Здесь H_2 обозначает, что молекулярный H_2 является донором электронов для восстановления металла. Однако, микроорганизмы могут также использовать для восстановления этих металлов органические доноры электронов.

^{**} Здесь $[H_2]$ обозначает два электрона, отданные различными органическими донорами электронов; не было показано, что донором электронов для восстановления этих металлов в чистой культуре был молекулярный H_2 .

удержана биомассой *Trichoderma koningii*. Это было связано с переходом Cd в самую устойчивую осадочную фракцию.

Металлы могут *повышать микробную актив- ность* в результате метаболических взаимодействий. Например, никель использовался *Alcaligenes* sp. для увеличения активности гидрогеназы и фактически накапливался в клеточной стенке. Возможно внутриклеточное поглощение урана бактериями *P. aeruginosa*, оно могло занимать до 15% сух. вес. клеток [18].

Известны некоторые бактерии (Alcaligenes, Acinetobacter, Arthrobacter, Azospirillum, Bacillus, Pseudomonas, Rhizobium и др.), способные растворять минералы фосфата. Образующийся фосфатион реагирует со многими переходными и тяжелыми металлами, металлоидами и радионуклидами, быстро формируя вторичные осадки фосфата, устойчивые в широком диапазоне геологических условий. Использование твердых фаз соединений фосфата, как изолирующего агента для преобразования многих металлов в загрязненных отложениях, создает значительный потенциал для долговременной экологической реабилитации. Например, биодобавки P. putida и A. piechaudii в комбинации с добавками фосфата показали возможность реабилитации почв. загрязненных свинцом и ураном [18]. Таким образом, микроорганизмы способны усиливать или подавлять процессы реабилитации окружающей среды от загрязнения *in situ*.

Преобразование некоторых металлов в металлоорганические соединения путем метилирования – еще один механизм их детоксикации. Способность к метилированию была установлена для ртути, свинца, кадмия и олова. На этот процесс могут влиять различные факторы окружающей среды, а также количество и разновидности микробов, присутствующих в данной среде обитания. Метилирование может катализироваться широким спектром микроорганизмов: аэробными и анаэробными бактериями, дрожжами и грибами. Но продукты метилирования могут быть более токсичными, чем свободный металл, они часто оказываются летучими и выделяются в атмосферу. Так обстоит дело с ртутью и ее метилированными производными: метил- и диметилртутью. Металлоорганические соединения могут также подвергаться микробиологическому и химическому разложению, что приводит к повторному высвобождению металла, обычно вновь в летучей форме. Такое разложение реализуется многими видами микробов [14].

Преобразования металлов происходят в широком спектре сред обитания, например, в озерах и речных отложениях, почвах, речных водах и активированных осадках, и в каждом случае действующий микробный состав различен. Как уже от-

мечалось, в преобразование металлов может быть вовлечено широкое разнообразие микроорганизмов. Тот факт, что специализированной преобразующей микрофлоры не существует, означает, что процесс трансформации — широко распространенное явление, характерное для разнородных организмов всех видов сред обитания. Способность микроорганизмов преобразовывать некоторые металлы и таким образом снижать их токсичность объясняется устойчивостью микробов к металлам.

БИОВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ МЕТАЛЛОВ ИЗ ЗОН ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Биоремедиация загрязненных территорий и водоносных горизонтов рассматривается как одна из наиболее безопасных, экономически эффективных и экологически чистых технологий для обезвреживания участков, загрязненных широким спектром загрязняющих веществ. Исследования по микробиологии водоносных горизонтов, подвергшихся воздействию свалок [8, 20], позволили получить представление о микробных профилях водоносных горизонтов, подверженных воздействию фильтрата.

Термин "биоремедиация" был введен для описания процесса использования биологического агента для удаления токсичных отходов из окружающей среды. В процессе биоремедиации используются различные агенты, такие как бактерии, грибы, водоросли и высшие растения, в качестве основных инструментов для обработки ТМ, присутствующих в окружающей среде. Биоремедиация, как *in situ*, так и *ex situ*, привлекла значительный научный интерес благодаря возможности естественной очистки сред вследствие биологического разложения в природных условиях [19].

В основе методов биоремедиации лежит возможность удаления металлов, накопленных в почвах, донных отложениях, горных породах, а также загрязненных водоносных горизонтах, при изменении окислительно-восстановительных условий [21, 22, 25]. Если металл полностью или частично удаляется, результатом может быть уменьшение или полное исчезновение токсических воздействий. Существует несколько стратегий рекультивации загрязненных водоносных горизонтов. Они в широком смысле подразделяются на искусственные и естественные. Первые, которые включают в себя обычную откачку и очистку. работают быстрее, но требуют значительных экономических затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание [8, 16]. С другой стороны, природное истощение, такое как биоремедиация in situ, предлагает недорогие, экологически безопасные, но эффективные средства [8, 23]. Кроме того, в отличие от откачки и очистки, биоремедиация на месте не приводит к образованию вторичных отходов. Поэтому это наиболее предпочтительный вариант восстановления подземных вод *in situ* [32]. Однако рекультивация *in situ*, особенно внутренняя биоремедиация, происходит медленно, и подземные воды остаются загрязненными в течение длительного времени, хотя восстановление может быть ускорено путем внесения добавок [23].

Анаэробное окисление органических соединений с восстановлением железа Fe(III) — очень важный процесс биоремедиации загрязненных подземных вод и стимуляции диссимиляторного восстановления металлов как метода связывания токсичных металлов в подземной среде [9, 30]. Но этот процесс часто сдерживается доступностью углерода, и процесс окисления *in situ* заметно тормозится. Добавление источников углерода стимулирует восстановление нитрата или Fe(III), что влияет на подвижность металлов [12].

В России изучались процессы биовыщелачивания металлов из почв с использованием микроорганизмов и синтетических сред для их развития [5, 6]. В работе [5] показана возможность выщелачивания ТМ и урана из загрязненных почв металлорезистентной культурой Bacillus cereus (MPK). Эта культура оказалась устойчивой к концентрации меди, кобальта 2-3 ммоль π^{-1} и урана(VI) 1 ммоль π^{-1} . Для обеспечения развития MPK использовалась синтетическая среда, содержащая (NH₄)₂SO₄, K₂HPO₄, KH₂PO₄, MgSO₄ и источники углерода (легко усваиваемые глюкоза или ацетат натрия – наиболее распространенные субстраты биологического круговорота ОВ в прирокачестве сорбента была выбрана легкосуглинистая темно серая оподзоленная почва лесостепной зоны. Сорбционные эксперименты проводились на суспензии с отношением "твердая: жидкая" фаза 1:10. Изучаемые металлы адсорбировались в последовательности U(VI) > > Cu > Co > Sr. Такой порядок сохранялся при сорбции как из индивидуальных растворов, так и из растворов, содержащих смеси металлов в эквимолярных концентрациях. Как показали результаты экспериментов, существуют две области рН, благоприятные для микробиальной экстракции U(VI) из почвы: при рН 4-5, когда уран переходит в жидкую фазу в виде цитратного бинуклеарного комплекса $(UO_2)_2(C_6O_7H_5)_2$, и при pH 8-9 с выносом урана в виде карбонатного комплекса UO₂CO₃. Эти комплексы являются водорастворимыми. В результате бактериального процесса степень выщелачивания U(VI) в слабокислой области рН достигала 99%, в слабощелочной не превышала 85%.

Проведено сравнительное выщелачивание металлов из образцов почвы, загрязненной смесью металлов, под действием металлорезистентных

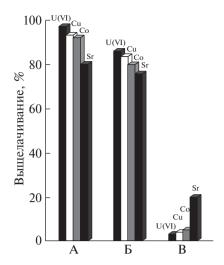


Рис. 3. Биовыщелачивание ТМ из почвы, загрязненной их смесью. Развитие *Bacillus cereus* BKM 4368 в течение 18 ч на среде с: A — глюкозой до pH 4.0—4.2; B — ацетатом до pH 9.0—9.2; B — контроль (выщелачивание под действием минеральной среды с pH 6.8 без источника углерода) [5].

бактерий, развивающихся на глюкозе или ацетате, а также при обработке минеральной средой без источника углерода (контроль) [5]. Полученные данные представлены на рис. 3. При отсутствии бактерий выщелачивание металлов практически не происходит (см. рис. 3 В). Уран, кобальт и медь были более прочно связаны с почвой, чем стронций. В контрольном эксперименте эти металлы оставались практически полностью в неподвижном состоянии, в отличие от стронция, который выщелачивался на 20%. Одновременное выщелачивание металлов Co, Cu, U было более эффективным с глюкозой, чем в среде с ацетат-ионом. Результаты проведенного исследования показали возможность эффективного биовыщелачивания ТМ из загрязненной почвы в суспендированном варианте. Оно может быть положено в основу технологии обезвреживания сильно загрязненных участков почвы [5].

Другой пример с применением биовыщелачивания приведен в работе [6], где изучена возможность обогащения бокситов путем их обезкремнивания и обезжелезивания с использованием микроорганизмов. В этих исследованиях показано, что некоторые гетеротрофные бактерии, Ba-cillus mucilaginosus и B. circulans, способны повышать кремниевый модуль (отношение Al_2O_3/SiO_2) некоторых типов бокситов.

Изучена способность 63 штаммов микроорганизмов, относящихся к 15 родам, извлекать кремний, железо и алюминий из каолинит-гематит-бемитового боксита. Показано, что большинство изученных микроорганизмов способно с разной степенью активности и селективности извлекать

указанные элементы в раствор. Суммарный вынос элементов под воздействием наиболее активных мицелиальных микромицетов превышал контрольный эксперимент в 137—165 раз, а у остальных штаммов мицелиальных микромицетов – в 9.7–45 раз. Под действием дрожжевых культур извлечение элементов в раствор возрастало в 3–11 раз. В случае бактерий родов *Pseudo*monas и Bacillus - в 3-10 раз. Селективность процесса выноса элементов из боксита зависит от природы метаболитов, выделяемых микроорганизмами, и их активности в растворении минералов, входящих в состав боксита. Так, в условиях развития микроорганизмов T. thiooxidans при рН 1.95 в раствор переходит в основном Al; Fe и Si в этих условиях в раствор не выносятся. В случае мицелиальных микромицетов при рН 2.5-3.5 выщелачивались в основном кремний и железо.

Деятельность, связанная с добычей и переработкой урановой руды, привела к появлению обширных областей загрязненных почв и водоносных горизонтов. Радионуклиды не могут быть разрушены, но токсичность этих неорганических загрязнителей можно снизить путем изменения их химической формы. Использование фосфата, изолирующего агента для преобразования радионуклидов при низких концентрациях в загрязненных почвах и отложениях, открывает значительный потенциал для долговременной экологической реабилитации. Известны некоторые бактерии (Alcaligenes, Acinetobacter, Arthrobacter, Azospirillum, Bacillus, Pseudomonas, Rhizobium и др.), способные растворять минералы фосфата и таким путем усиливать или ингибировать процессы реабилитации окружающей среды in situ относительно загрязнения ураном при использовании добавок фосфата. Эти разновидности бактерий обычны в почвах и донных осадках. Биодобавки P. putida и A. piechaudii в комбинации с добавками фосфата продемонстрировали потенциал для реабилитации почв стрельбища, загрязненных свинцом, и возможно, эти бактерии также удастся использовать для реабилитации почв и погребенных осадочных пород, загрязненных ураном [18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами (ТМ) вызывает большую озабоченность из-за значительного превышения их допустимого содержания в различных природных средах и, как следствие, обогащения металлами пищевых цепей живых организмов. Значительный вклад в загрязнение окружающей среды ТМ вносят места складирования отходов и миграция ТМ с формирующимся фильтратом в зону аэрации и подземные воды. Многие металлы удерживаются в свалочном теле, почвах и горных породах по-

средством ряда механизмов: сорбции, осаждения, ионного обмена, комплексообразования и окислительно-восстановительных преобразований. Геохимические процессы с участием окислительно-восстановительных реакций, ведущие к формированию или растворению геохимических барьеров, могут быть в значительной степени обусловлены или усилены микробной активностью.

Микробиологическое преобразование с участием металлов — важный процесс, который может происходить во многих средах обитания и реализовываться широким спектром микроорганизмов, в основном, бактериями и грибами. Металлы не могут разрушаться, но могут в результате биологического воздействия менять валентности и/или преобразовываться в металлоорганические соединения. Оба процесса можно рассматривать как механизмы детоксикации.

Множество процессов с участием микроорганизмов происходит в бескислородной среде водоносных горизонтов и подземных вод. Эти среды благоприятны для жизнедеятельности анаэробных (диссимиляторных) микроорганизмов, которые трансформируют металлы, получая энергию по механизму, аналогичному аэробному дыханию с использованием кислорода.

В анаэробных условиях Fe(III) — наиболее распространенный потенциальный акцептор электронов для окисления органического вещества (ОВ). Поэтому водоносные горизонты, загрязненные органическими соединениями, обычно содержат обширные окислительно-восстановительные зоны, в которых восстановление Fe(III) является преобладающим конечным электроноакцепторным процессом. Зона, в которой преобладает процесс восстановления Fe(III), находится ниже по потоку от окислительно-восстановительных зон образования метана и сульфатредукции и выше по потоку от зон восстановления нитрата и Mn(IV).

В ходе восстановительного растворения оксидов железа и марганца анаэробными микроорганизмами адсорбированные металлы могут выделяться в раствор, при этом железо и марганец изменяют свое валентное состояние с понижением и также переходят в растворимые формы. Обычно в присутствии активной микробной популяции рН отложений снижается, а количество растворенного органического вещества (РОВ) увеличивается. Таким образом, больше металлов могут быть преобразованы в более *подвижные* формы — комплексные соединения с РОВ.

При изменении окислительно-восстановительных условий восстановленные железо и марганец окисляются и формируют устойчивые твердые фазы окси/гидроксидных соединений, которые являются важными поглотителями растворенных и комплексных соединений осталь-

ных металлов. Поглотителями также могут быть карбонатные и смешанные карбонат-фосфатные осалки металлов.

Микроорганизмы могут адсорбировать, удерживать и связывать в комплексные соединения металлы и радионуклиды путем поверхностных взаимодействий и выделения хелатирующих агентов, переводя металлы в более устойчивые формы. В результате формируются геохимические барьеры с измененными условиями миграции элементов, которая может быть усилена деятельностью микробов. Развитие процессов микробиальной трансформации металлов из связанных форм в подвижные, доступные для экстракции, является одним из наиболее перспективных направлений в реабилитации окружающей среды. Природная ремедиация почв, загрязненных ТМ, протекает очень медленно. Актуальной становится задача активизации процессов удаления ТМ из почв и горных пород, в том числе для предотвращения загрязнения полземных вод. Микроорганизмы могут повышать подвижность ТМ или радионуклидов, благодаря выделению протонов и образованию различных лигандов при трансформации ОВ. Таким образом, больше металлов может перейти в более подвижные формы за счет связывания в комплексные соединения с РОВ.

Биологическая детоксикация природной среды представляет собой совокупность процессов метаболизма и биоконцентрирования за счет комплексообразования, сорбции и биодеградации вещества, зависящую от биологической активности окружающей среды и природы загрязняющих веществ.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания и плана НИР по теме $N_{\rm P}$ г.р. AAAA-A19-119101890052-5 и при финансовой поддержке гранта $P\Phi\Phi U N_{\rm P} 20-05-00574$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Галицкая И.В.*, *Путилина В.С.*, *Юганова Т.И*. Роль органического вещества в миграции тяжелых металлов на участках складирования твердых бытовых отходов // Геоэкология. 2005. № 5. С. 411–422.
- 2. Галицкая И.В., Путилина В.С., Юганова Т.И. Формирование зональности окислительно-восстановительных состояний в водоносных горизонтах под влиянием полигонов и свалок ТБО // Геоэкология. 2008. № 5. С. 401—410.
- 3. *Галицкая И.В.*, *Путилина В.С.*, *Юганова Т.И*. Роль микроорганизмов в поведении урана в системе вода—порода // Геоэкология. 2016. № 4. С. 320—334.
- 4. *Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М.* Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: Наука, 2004. 677 с.
- 5. Никовская Г.Н., Ульберг З.Р., Коваль Л.А. Коллоидно-химические процессы в биотехнологии извле-

- чения тяжелых металлов из почвы // Коллоидный журнал. 2001. Т. 63. № 6. С. 820—824.
- 6. Огурцова Л.В., Каравайко Г.И., Авакян З.А., Корнеевский А.А. Активность различных микроорганизмов в выносе элементов из боксита // Микробиология. 1989. Т. 58. № 6. С. 956—962.
- 7. Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И. Влияние органического вещества на миграцию тяжелых металлов на участках складирования твердых бытовых отходов: Аналит. обзор. Сер. Экология; Вып. 76. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН; ИГЭ РАН, 2005. 100 с.
- 8. Abiriga D., Jenkins A., Alfsnes K., Vestgarden L.S., Klempe H. Characterisation of the bacterial microbiota of a landfill-contaminated confined aquifer undergoing intrinsic remediation // Science of the Total Environment. 2021. V. 785. Paper 147349. 12 p.
- 9. Anderson R.T., Vrionis H.A., Ortiz-Bernad I., Resch C.T., Long P.E., Dayvault R., Karp K., Marutzky S., Metzler D.R., Peacock A., White D.C., Lowe M., Lovley D.R. Stimulating the *in situ* activity of Geobacter species to remove uranium from the groundwater of a uranium-contaminated aquifer // Applied & Environmental Microbiology. 2003. V. 69. № 10. P. 5884–5891.
- Burkhardt E.-M., Meißner S., Merten D., Büchel G., Küsel K. Heavy metal retention and microbial activities in geochemical barriers formed in glacial sediments subjacent to a former uranium mining leaching heap // Chemie der Erde – Geochemistry. 2009. V. 69, Suppl. 2. P. 21–34.
- 11. Calmano W., Hong J., Förstner U. Binding and mobilization of heavy metals in contaminated sediments affected by pH and redox potential // Water Science & Technology. 1993. V. 28. № 8–9. P. 223–235.
- 12. Edwards L., Kusel K., Drake H., Kostka J.E. Electron flow in acidic subsurface sediments contaminated with nitrate and uranium // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2007. V. 71. № 3. P. 643–654.
- 13. Flyhammar P. Estimation of heavy metal transformations in municipal solid waste // The Science of the Total Environment. 1997. V. 198. № 2. P. 123–133.
- 14. *Gadd G.M.*, *Griffiths A.J.* Microorganisms and heavy metal toxicity // Microbial Ecology. 1978. V. 4. № 4. P. 303–317.
- 15. Hansel C.M., Benner S.G., Neiss J., Dohnalkova A., Kukkadapu R.K., Fendorf S. Secondary mineralization pathways induced by dissimilatory iron reduction of ferrihydrite under advective flow // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2003. V. 67. № 16. P. 2977–2992.
- Hyldegaard B.H., Jakobsen R., Weeth E.B., Overheu N.D., Gent D.B., Ottosen L.M. Challenges in electrochemical remediation of chlorinated solvents in natural groundwater aquifer settings // Journal of Hazardous Materials. 2019. V. 368. P. 680–688.
- 17. *Kjeldsen P., Barlaz M.A., Rooker A.P., Baun A., Ledin A., Christensen T.H.* Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A Review // Critical Reviews in Environmental Science & Technology. 2002. V. 32. № 4. P. 297–336.
- 18. Knox A.S., Brigmon R.L., Kaplan D.I., Paller M.H. Interactions among phosphate amendments, microbes and uranium mobility in contaminated sediments //

- The Science of the Total Environment. 2008. V. 395. \mathbb{N}_2 2-3. P. 63-71.
- 19. *Kulshreshtha A., Agrawal R., Barar M., Saxena S.* A review on bioremediation of heavy metals in contaminated water // IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology & Food Technology. 2014. V. 8. № 7. P. 44–50.
- 20. Lin B., Braster M., Röling W.F., van Breukelen B.M. Iron-reducing microorganisms in a landfill leachate-polluted aquifer: complementing culture-independent information with enrichments and isolations // Geomicrobiology Journal. 2007. V. 24. № 3–4. P. 283–294.
- 21. *Lloyd J.R.*, *Lovley D.R*. Microbial detoxification of metals and radionuclides // Current Opinion in Biotechnology. 2001. V. 12. № 3. P. 248–253.
- Lloyd J.R., Lovley D.R., Macaskie L.E. Biotechnological application of metal-reducing microorganisms // Advances in Applied Microbiology. 2003. V. 53. P. 85–128.
- Logeshwaran P., Megharaj M., Chadalavada S., Bowman M., Naidu R. Petroleum hydrocarbons (PH) in groundwater aquifers: an overview of environmental fate, toxicity, microbial degradation and risk-based remediation approaches // Environmental Technology & Innovation. 2018. V. 10. P. 175–193.
- 24. Lovley D.R. Anaerobes into heavy metal: Dissimilatory metal reduction in anoxic environments // Trends in Ecology & Evolution. 1993. V. 8. № 6. P. 213–217.
- Lovley D.R. Bioremediation of organic and metal contaminants with dissimilatory metal reduction // Journal of Industrial Microbiology. 1995. V. 14. P. 85–93.
- 26. Lovley D.R., Fraga J.L., Blunt-Harris E.L., Hayes L.A., Phillips E.J.P., Coates J.D. Humic substances as a mediator for microbially catalysed metal reduction // Acta Hydrochimica et Hydrobiologica. 1998. V. 26. № 3. P. 152–157.
- Lovley D.R., Anderson R.T. Influence of dissimilatory metal reduction on fate of organic and metal contaminants in the subsurface // Hydrogeology Journal. 2000. V. 8. № 1. P. 77–88.

- 28. *Lovley D.R.* Anaerobes to the rescue // Science. 2001. V. 293. № 5534. P. 1444–1446.
- Lovley D.R. Dissimilatory metal reduction: From early life to bioremediation // ASM News. 2002. V. 68. P. 231–237.
- 30. *Lovley D.R.* Extracellular electron transfer: wires, capacitors, iron lungs, and more // Geobiology. 2008. V. 6. № 3. P. 225–231.
- 31. Lyngkilde J., Christensen T.H. Redox zones of a landfill leachate pollution plume (Vejen, Denmark) // Journal of Contaminant Hydrology. 1992. V. 10. P. 273–289.
- 32. O'Connor D., Hou D., Ok Y.S., Song Y., Sarmah A.K., Li X., Tack F.M. Sustainable in situ remediation of recalcitrant organic pollutants in groundwater with controlled release materials: a review // Journal of Controlled Release. 2018. V. 283. P. 200–213.
- 33. *Picardal F., Cooper D.G.* Microbially mediated changes in the mobility of contaminant metals in soils and sediments // Ahmad I., Hayat S., Pichtel J. (Eds.), Heavy Metal Contamination of Soil: Problems and Remedies. Enfield, NH: Science Publishers, Inc., 2005. P. 43–88.
- 34. Sitte J., Akob D.M., Kaufmann C., Finster K., Banerjee D., et al. Microbial links between sulfate reduction and metal retention in uranium- and heavy metal-contaminated soil // Applied & Environmental Microbiology. 2010. V. 76. № 10. P. 3143–3152.
- 35. Stewart B.D., Neiss J., Fendorf S. Quantifying constraints imposed by calcium and iron on bacterial reduction of Uranium(VI) // Journal of Environmental Quality. 2007. V. 36. № 2. P. 363–372.
- 36. *Tarekegn M.M.*, *Salilih F.Z.*, *Ishetu A.I*. Microbes used as a tool for bioremediation of heavy metal from the environment // Cogent Food & Agriculture. 2020. V. 6. № 1. Paper 1783174. 19 p.
- 37. *Vodyanitskii Yu.N.* Biochemical processes in soil and groundwater contaminated by leachates from municipal landfills (Mini review) // Annals of Agrarian Science. 2016. V. 14. № 3. P. 249–256.

THE ROLE OF MICROBIOLOGICAL PROCESSES IN THE FORMATION OF GEOCHEMICAL BARRIERS AND REDOX ZONES UPON POLLUTION OF SOILS AND AQUIFERS WITH METALS NEAR MSW DISPOSAL SITES

V. S. Putilina^{a,#} and T. I. Yuganova^{a,##}

^a Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS, Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia [#]E-mail: vputilina@yandex.ru ^{##}E-mail: tigryu@gmail.com

The article analyzes the role of microbiological processes in the formation of geochemical barriers and redox zones in the contamination of soils, rocks and groundwater with metals. A significant contribution to environmental pollution is made by heavy metals in waste storage sites, their migration with the forming filtrate to the aeration zone and ground-water. Special attention is paid to the characteristics of the behavior of heavy metals in changing redox conditions, their transformation and entry into groundwater. The mechanisms of biological transformation of metals in order to reduce their toxic impact on the environment are considered. It is noted that the biological detoxification of the natural environment is a combination of the processes of metabolism and bioconcentrating due to complex formation, sorption and biodegradation of the substance, depending on the biological activity of the environment and the nature of pollutants. The bioremediation of

contaminated territories and aquifers is one of the safest, cost-effective, environmentally friendly technologies for the detoxification of contaminated areas of territories and aquifers.

Keywords: microbiological processes, geochemical barriers, redox zones, pollution, soils, groundwater, metals

REFERENCES

- 1. Galitskaya, I.V., Putilina, V.S., Yuganova, T.I. *Rol' organicheskogo veshchestva v migratsii tyazhelykh metallov na uchastkakh skladirovaniya tverdykh bytovykh otkhodov* [The role of organic matter in heavy metal migration at the storage sites of municipal solid wastes]. *Geoekologiya*, 2005, no. 5, pp. 411–422. (in Russian)
- Galitskaya, I.V., Putilina, V.S., Yuganova, T.I.
 Fromirovanie zonal'nosti okislitel'no-vosstanovitel'nykh
 sosto-yanii v vodonosnykh gorizontakh pod vliyaniem
 poligonov i svalok TBO [Formation of redox state zon ality in aquifers affected by MSW storage sites and
 dumps] // Geoekologiya, 2008, no. 5, pp. 401–410. (in
 Russian)
- 3. Galitskaya, I.V., Putilina, V.S., Yuganova, T.I. *Rol' mikroorganizmov v povedenii urana v sisteme voda-poro-da* [The role of microorganisms in uranium behavior in the water-rock system]. *Geoekologiya*, 2016, no. 4, pp. 320–334. (in Russian)
- Krainov, S.R., Ryzhenko, B.N., Shvets, V.M. Geokhimiya podzemnykh vod. Teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty [Groundwater geochemistry. Theoretical, applied, and environmental aspects]. Moscow, Nauka Publ., 2004, 677 p. (in Russian)
- 5. Nikovskaya, G.N., Ul'berg, Z.P., Koval', L.A. *Kolloid-no-khimicheskie protsessy v biotekhnologii izvlecheniya tyazhelykh metallov iz pochvy* [Colloidal chemical processes in biotechnology of extracting heavy metals from soils]. *Kolloidnyi zhurnal*, 2001, vol. 63, no. 6, pp. 820–824. (in Russian)
- Ogurtsova, L.V., Karavaiko, G.I., Avakyan, Z.A., Korneevskii A.A. Aktivnost' razlichnykh mikroorganizmov v vynose elementov iz boksita [Activity of different microorganisms in withdrawal of elements from bauxite]. Mikrobiologiya, 1989, vol. 58, no. 6, pp. 956–962. (in Russian)
- 7. Putilina, V.S., Galitskaya, I.V., Yuganova, T.I. *Vliyanie* organicheskogo veshchestava na migratsiyu tyazhelykh metallov na uchastkakh skladirovaniya tverdykh bytovykh otkhodov: Analit. Obzor. Ser. Ekologiya; vyp. 76 [Influence of organic matter on migration of heavy metals at the disposal sites of municipal solid waste: Analytic review. Ecology series. Issue 76]. Novosibirsk: GPNTB SO RAN, 2005, 100 p. (in Russian)
- 8. Abiriga, D., Jenkins, A., Alfsnes, K., Vestgarden, L.S., Klempe, H. Characterisation of the bacterial microbiota of a landfill-contaminated confined aquifer undergoing intrinsic remediation. *Science of the Total Environment*, 2021, vol. 785, paper 147349, 12 p.
- Anderson, R.T., Vrionis, H.A., Ortiz-Bernad, I., Resch, C.T., Long, P.E., Dayvault, R., Karp, K., Marutzky, S., Metzler, D.R., Peacock, A., White, D.C., Lowe, M., Lovley, D.R. Stimulating the *in situ* activity of *Geobacter* species to remove uranium from the groundwater of a uranium-contaminated aquifer. *Ap*-

- plied & Environmental Microbiology, 2003, vol. 69, no. 10, pp. 5884–5891.
- Burkhardt, E.-M., Meißner, S., Merten, D., Büchel, G., Küsel, K. Heavy metal retention and microbial activities in geochemical barriers formed in glacial sediments subjacent to a former uranium mining leaching heap. Chemie der Erde – Geochemistry, 2009, vol. 69, suppl. 2, pp. 21–34.
- 11. Calmano, W., Hong, J., Förstner, U. Binding and mobilization of heavy metals in contaminated sediments affected by pH and redox potential. *Water Science & Technology*, 1993, vol. 28, no. 8–9, pp. 223–235.
- 12. Edwards, L., Kusel, K., Drake, H., Kostka, J.E. Electron flow in acidic subsurface sediments contaminated with nitrate and uranium. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, vol. 71, no. 3, pp. 643–654.
- 13. Flyhammar, P. Estimation of heavy metal transformations in municipal solid waste. *The Science of the Total Environment*, 1997, vol. 198, no. 2, pp. 123–133.
- 14. Gadd, G.M., Griffiths, A.J. Microorganisms and heavy metal toxicity. *Microbial Ecology*, 1978, vol. 4, no. 4, pp. 303–317.
- Hansel, C.M., Benner, S.G., Neiss, J., Dohnalkova, A., Kukkadapu, R.K., Fendorf, S. Secondary mineralization pathways induced by dissimilatory iron reduction of ferrihydrite under advective flow. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, vol. 67, no. 16, pp. 2977–2992.
- 16. Hyldegaard, B.H., Jakobsen, R., Weeth, E.B., Overheu, N.D., Gent, D.B., Ottosen, L.M. Challenges in electrochemical remediation of chlorinated solvents in natural groundwater aquifer settings. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, vol. 368, pp. 680–688.
- Kjeldsen, P., Barlaz, M.A., Rooker, A.P., Baun, A., Ledin, A., Christensen, T.H. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science & Technology*, 2002, vol. 32, no. 4, pp. 297–336.
- 18. Knox, A.S., Brigmon, R.L., Kaplan, D.I., Paller, M.H. Interactions among phosphate amendments, microbes and uranium mobility in contaminated sediments. *The Science of the Total Environment*, 2008, vol. 395, no. 2–3, pp. 63–71.
- 19. Kulshreshtha, A., Agrawal, R., Barar, M., Saxena, S. A review on bioremediation of heavy metals in contaminated water. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology & Food Technology*, 2014, vol. 8, no. 7, pp. 44–50.
- 20. Lin, B., Braster, M., Röling, W.F., van Breukelen, B.M. Iron-reducing microorganisms in a landfill leachate-polluted aquifer: complementing culture-independent information with enrichments and isolations. *Geomicrobiology Journal*, 2007, vol. 24, no. 3–4, pp. 283–294.
- 21. Lloyd, J.R., Lovley, D.R. Microbial detoxification of metals and radionuclides. *Current Opinion in Biotechnology*, 2001, vol. 12, no. 3, pp. 248–253.

- Lloyd, J.R., Lovley, D.R., Macaskie, L.E. Biotechnological application of metal-reducing microorganisms.
 Advances in Applied Microbiology, 2003, vol. 53, pp. 85–128
- Logeshwaran, P., Megharaj, M., Chadalavada, S., Bowman, M., Naidu, R. Petroleum hydrocarbons (PH) in groundwater aquifers: an overview of environmental fate, toxicity, microbial degradation and riskbased remediation approaches. *Environmental Technol*ogy & *Innovation*, 2018, vol. 10, pp. 175–193.
- 24. Lovley, D.R. Anaerobes into heavy metal: Dissimilatory metal reduction in anoxic environments. *Trends in Ecology & Evolution*, 1993, vol. 8, no. 6, pp. 213–217.
- Lovley, D.R. Bioremediation of organic and metal contaminants with dissimilatory metal reduction. *Jour*nal of Industrial Microbiology, 1995, vol. 14, pp. 85–93.
- Lovley, D.R., Fraga, J.L., Blunt-Harris, E.L., Hayes, L.A., Phillips, E.J.P., Coates, J.D. Humic substances as a mediator for microbially catalysed metal reduction. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 1998, vol. 26, no. 3, pp. 152–157.
- Lovley, D.R., Anderson, R.T. Influence of dissimilatory metal reduction on fate of organic and metal contaminants in the subsurface. *Hydrogeology Journal*, 2000, vol. 8, no 1, pp. 77–88.
- 28. Lovley, D.R. Anaerobes to the rescue. *Science*, 2001, vol. 293, no. 5534, pp. 1444–1446.
- Lovley, D.R. Dissimilatory metal reduction: From early life to bioremediation. ASM News, 2002, vol. 68, pp. 231–237.
- 30. Lovley, D.R. Extracellular electron transfer: wires, capacitors, iron lungs, and more. *Geobiology*, 2008, vol. 6, no. 3, pp. 225–231.

- 31. Lyngkilde, J., Christensen, T.H. Redox zones of a land-fill leachate pollution plume (Vejen, Denmark). *Journal of Contaminant Hydrology*, 1992, vol. 10, pp. 273–289
- 32. O'Connor, D., Hou, D., Ok, Y.S., Song, Y., Sarmah, A.K., Li, X., Tack, F.M. Sustainable in situ remediation of recalcitrant organic pollutants in groundwater with controlled release materials: a review. *Journal of Controlled Release*, 2018, vol. 283, pp. 200–213.
- 33. Picardal, F., Cooper, D.G. Microbially mediated changes in the mobility of contaminant metals in soils and sediments // Ahmad I., Hayat S., Pichtel J. (Eds.), Heavy Metal Contamination of Soil: Problems and Remedies. Enfield, NH: Science Publishers, Inc., 2005, pp. 43–88.
- 34. Sitte, J., Akob, D.M., Kaufmann, C., Finster, K., Banerjee, D., et al. Microbial links between sulfate reduction and metal retention in uranium- and heavy metal-contaminated soil. *Applied & Environmental Microbiology*, 2010, vol. 76, no. 10, pp. 3143–3152.
- 35. Stewart, B.D., Neiss, J., Fendorf, S. Quantifying constraints imposed by calcium and iron on bacterial reduction of Uranium(VI). *Journal of Environmental Quality*, 2007, vol. 36, no. 2, pp. 363–372.
- 36. Tarekegn, M.M., Salilih, F.Z., Ishetu, A.I. Microbes used as a tool for bioremediation of heavy metal from the environment. *Cogent Food & Agriculture*, 2020, vol. 6, no. 1, paper 1783174, 19 p.
- 37. Vodyanitskii, Yu N. Biochemical processes in soil and groundwater contaminated by leachates from municipal landfills (Mini review). *Annals of Agrarian Science*, 2016, vol. 14, no. 3, pp. 249–256.

_____ ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ _____ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.24 (235.216)

ОЦЕНКА НЕОТЕКТОНИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

© 2021 г. И. В. Коробова^{1,*}, В. М. Макеев^{1,**}

¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН), Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия *E-mail: irakorv@mail.ru **E-mail: vmakeev@mail.ru Поступила в редакцию 09.07.2021 г.

После доработки 29.07.2021 г. Принята к публикации 10.08.2021 г.

Структурно-геоморфологические исследования проведены во Владимирско-Нижегородском и Московском регионах с целью оценки амплитуд и скоростей суммарных и поэтапных неотектонических движений, определяющих интенсивность геологических процессов. Количественная оценка основана на исследовании разнотипных денудационных поверхностей выравнивания и речных террас, относящихся к эрозионно-аккумулятивным циклам. Фактический материал: сведения о возрасте, генезисе и составе отложений, структурно-геоморфологические разрезы, а также полевые маршрутные наблюдения. Результаты исследований указывают на дифференцированность неотектонических движений по амплитудам и скоростям, обусловленную особенностями геодинамических условий формирования новейших и современных структур. На основе эоплейстоценовой опорной поверхности впервые оценены вертикальные скорости неотектонических деформаций и скорости эрозионных процессов (глубинное врезание) за неоплейстоцен-голоценовое время в Москворецкой геодинамически активной зоне. Установлено, что скорость деформации составляет 0.005 мм/год, а скорость эрозионного врезания в 5 раз выше неотектонической и составляет 0.025 мм/год. Суммарная величина эндогенной и экзогенной составляющих равна 0.03 мм/год. Результаты исследований подтверждают раннее сделанные выводы, что на платформенных территориях незначительная скорость неотектонических движений вызывает интенсивное развитие

Ключевые слова: структурно-геоморфологический метод, неотектонические структуры, геодинамически активные зоны, денудационные уровни, речные террасы, амплитуды и скорости движений, геоэкологически значимые дислокации

экзогенных геологических процессов. Активность этих процессов является одной из причин при-

остановки проектирования и строительства Нижегородской атомной станции.

DOI: 10.31857/S0869780921060047

ВВЕДЕНИЕ

Целью исследований является оценка суммарных амплитуд и поэтапных скоростей неотектонических движений на основе структурно-геоморфологического метода. Исследования были проведены в Московском (долина р. Москва) и Владимирско-Нижегородском (долина р. Ока) регионах в связи с необходимостью обеспечения безопасности территорий, подверженных негативным экзогенным геологическим процессам (карст, суффозия, оползни, подпруживание и т.п.) и интенсивным техногенным нагрузкам.

Московский регион — это городская агломерация, интенсивно расширяющаяся и уплотняющаяся в последнее время [3]. Во Владимирско-Нижегородском регионе планировалось строительство особо важного и технически сложного

объекта — Нижегородской АЭС (на данный момент проект строительства "заморожен"), а также ведется проектирование и строительство автомагистралей, трубопроводных систем и др. объектов.

В основу оценки неотектонических движений положена эрозионно-аккумулятивная (тектоно-климатическая) цикличность, которая в рельефе выражена эрозионно-денудационными поверхностями выравнивания и речными цикловыми террасами. В настоящее время известно несколько способов вычисления амплитуды и скорости неотектонических движений.

В работах С.Б. Ершовой и ее коллег на примере Западно-Сибирской плиты приводится методика расчета суммарных (неотектонических) и поэтапных амплитуд скоростей и движений, основанная на оценке возраста и мощности мор-

ских отложений, абсолютных отметок уровня палеобассейна и на учете палеогеографических условий [2]. В нашем случае в центральной части Восточно-Европейской платформы морские отложения, как стратиграфически выверенные опорные горизонты, отсутствуют, что влечет за собой ограниченность применения метода.

В работах А.В. Вострякова и др. исследователей амплитуда поднятий вычисляется на основе разности абс. высот современного рельефа и рельефа, образованного к началу новейшего этапа $(Pg_3^3-N_1^2)$ [12]. Величина их расхождения принимается в качестве мощности денудационного среза (смытые породы) или амплитуды поднятия. С нашей точки зрения, такая оценка величины смыва неоднозначна, поскольку на месте предполагаемого среза часто устанавливают наличие покровных отложений с горизонтами почв, датируемых возрастом смытых пород. Это указывает либо на то, что денудационного среза (смыва) не было, либо на неточность в определении возраста почв.

Наиболее продвинутой в этом отношении является методика оценки неотектонических движений С.А. Несмеянова [11]. Преимуществом ее является разработанность на хорошо обнаженных территориях, где ярко выражены формы и типы рельефа вследствие устойчивого и длительного орогенеза. В основу методики положены представления, что амплитуды поднятий условно пропорциональны глубинам врезов, а суммарная амплитуда новейшего поднятия соответствует максимальным абс. отметкам рельефа. Данная методика взята нами за основу расчетов.

МЕТОД РАСЧЕТА АМПЛИТУД И СКОРОСТЕЙ НЕОТЕКТОНИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ

Строение рельефа определяется закономерно повторяющимися эрозионно-аккумулятивными (тектоно-климатическими) циклами, связанными с неравномерным или непрерывно-прерывистым развитием неотектонических движений и глобальными циклическими изменениями климата [15]. Отражением этой цикличности является отчетливо выраженная ступенчатость водоразделов и склонов и связанная с ней последовательность накопления коррелятных отложений во впадинах. Каждый цикл включает врез, выраженный невысоким склоном, и прилежащую к его подножию поверхность выравнивания - педимент. Врез формируется в период тектонического поднятия территории, а поверхность выравнивания, сопряженная с аккумуляцией, — во время его прекращения. При этом принимается, что глубина вреза равна амплитуде поднятия. Геоморфологическая ступенчатость, образованная в процессе

неотектонических движений, является объектом нашей опенки.

Скорость неотектонических движений рассчитывается по формуле:

$$V = A/t$$

где V— средние суммарные или постадийные скорости поднятий; A — амплитуда поднятия за этап (глубина вреза плюс высота эрозионного уступа террасы); t — время, отвечающее продолжительности этапа [10, 14].

У цикловых террас оценивается относительная глубина вреза и высота уступа над поверхностью террасы, а также продолжительность этапа в относительных значениях. Согласно полевым наблюдениям, в рассматриваемых регионах высота уступа террас в среднем небольшая и составляет 1.5-2.5 м. Глубина вреза и мощность отложений определялась по фондовым и литературным материалам (данные буровых скважин) [1, 12]. У денудационных поверхностей оценивалась абс. высота и продолжительность этапа в абсолютных значениях. На основе полевых исследований установлено, что относительная высота уступа денудационных поверхностей обычно не превышает 20 м. На этих поверхностях и особенно в тыловой их части часто накапливаются делювиальные и лессовые отложения, сглаживающие ступенчатость, что вызывает затруднения при их картографировании. Мощность покровных отложений вычитается при оценке амплитуд и скоростей.

ОЦЕНКА НЕОТЕКТОНИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ ВЛАДИМИРСКО-НИЖЕГОРОДСКОГО РЕГИОНА

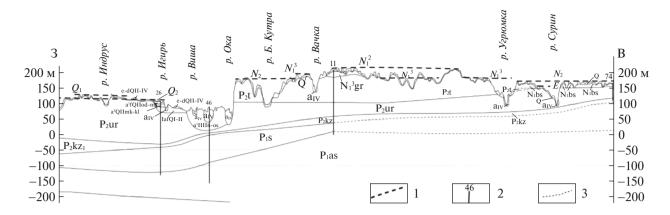
В результате проведенных структурно-геоморфологических исследований в регионе выделены денудационные поверхности выравнивания, речные террасы и неотектонические структуры, на основе которых оценены суммарные и поэтапные амплитуды и скорости движений (рис. 1, рис. 2) [1, 6, 12].

Денудационные поверхности выравнивания и речные террасы

В рельефе рассматриваемого региона выделено 6 денудационных поверхностей выравнивания (ступеней) и исследовано 4 речные террасы (см. рис. 1).

Денудационные поверхности:

— Первая среднемиоценовая поверхность (ламкинский цикл, N_1^2) является самой высокой из всех и наиболее древней. Фрагменты этой поверхности сохранились на водоразделах с абс. отметками 200-220 м.



- Вторая позднемиоценовая поверхность (горелковско-бушуевский цикл, N_1^3) врезана в первую. Абс. отметки поверхности 180-200 м.
- Третья плиоценовая поверхность (челнинско-чистопольский цикл, N_2), соответственно, врезана во вторую. Поверхность находится на абс. отметках 160-180 м.
- Четвертая эоплейстоценовая поверхность (E) развита на абс. отм. 140—160 м. Ее образование связано с петропавловско-покровским циклом, вершиной развития которого является донское ледниковье.
- Пятая поверхность образовалась во вторую половину раннего неоплейстоцена (мучкапско-окский цикл, Q_1 mč-ok), находится на абс. отметках 120-140 м. Формирование цикла завершилось окским оледенением.
- Шестая поверхность сформировалась в первую половину среднего неоплейстоцена (калужско-московский цикл, Q_2 kž—ms), расположена на абс. отметках 100-120 м и корреллируется с четвертой надпойменной террасой (115-117 м).

Речные террасы [1, 6]:

- Четвертая терраса (калужско-московский горизонт, a^4II kž—ms) сложена аллювием, представленным песками с линзами и прослоями суглинков мощностью до 26 м. Абс. отметки поверхности 110-120 м.
- Третья терраса (одинцовско-московский горизонт, а 3 II od-ms) представлена песками и суглинками мощностью до 23 м. Абс. отметки поверхности 100-110 м.

- Вторая терраса (микулинско-калининский горизонт, af ²III mk—kl) выполнена песками иногда с гравием, суглинками и глинами мощностью до 25 м. Абс. отметки поверхности террасы 90—100 м.
- Первая терраса (ленинградско-осташковский, а¹III ln—os) сложена аллювием, представленным песками (в основании с гравием), суглинками и глинами мощностью до 23 м. Абс. отметки поверхности террасы 80—90 м.
- Пойма (aIV) сложена преимущественно песками в основании с гравием, в приповерхностной части суглинками, глинами и торфом общей мощностью до 26 м. Абс. отметки поверхности 70 м.

Неотектонические структуры

Владимирско-Нижегородский регион включает неотектонические структуры первого и второго порядка, геодинамически активные зоны $(\Gamma \partial A3)$ и линеаменты (см. рис. 2) [6]. Структурами первого порядка (главными) являются Приволжское поднятие (северо-западная часть), Окско-Муромский прогиб СВ-ЮЗ простирания и Клязьминско-Волжский субширотный прогиб. Структуры второго порядка (локальные) осложняют главные. На границах разнопорядковых структур вследствие их разнонаправленного развития выделены геодинамически активные зоны $(\Gamma \partial A3)$, которые относятся к зонам повышенной трещиноватости и проницаемости. Карстовосуффозионные формы, интенсивно развитые в

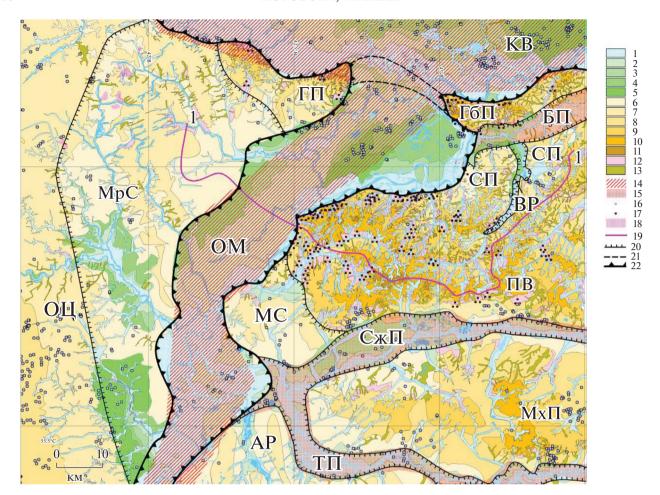


Рис. 2. Структурно-геоморфологическое и неотектоническое строение Владимирско-Нижегородского региона. 1 — пойма. Террасы: 2 — первая, 3 — вторая, 4 — третья, 5 — четвертая. Денудационные ступени: 6 — шестая, 7 — пятая, 8 — четвертая, 9 — третья, 10 — вторая, 11 — первая, 12 — склоны, 13 — овраги и ложбины. Геодинамически активные зоны: 14 — локальные, 15 — региональные. Карстово-суффозионные формы по данным: 16 — дешифрирования космоснимков, 17 — геологических карт, 18 — участки развития карста, 19 — линеаменты. Границы новейших структур: 20 — поднятий и прогибов второго порядка (бергштрихи направлены в сторону прогиба), 21 — внутридепрессионная седловина между Окско-Муромским (ОМ) и Клязьминско-Волжским (КВ) прогибами; 22 — структуры первого порядка, 23 — участки вероятной активности оползней, 24 — структурно-геоморфологический профиль 4—4. ОЦ — Окско-Цнинский вал, МрС — Муромская ступень, БП — Балахнинский прогиб, ГП — Гороховецкое и ГбП — Горбатовское поднятия. Приволжское поднятие: СжП — Сережинский; ТП — Тешинский; ВР — Ворсменский; БП — Богородский прогибы; МС — Монаковская ступень. Поднятия: ПВ — Павловское. МхП — Мухтоловское и АР — Ардатовское, СП-Степуринское.

регионе, приурочены к тектоническим нарушениям ($\Gamma \partial A3$ и линеаментам) и тяготеют к ложбинам, врезам рек, оврагам и тыловым швам террас. Очевидно, что тектонические и эрозионные зоны нарушают защитные функции четвертичных моренных суглинков и пермских глин уржумского яруса, перекрывающих сульфатно-карбонатные отложения, что приводит к повышенному выщелачиванию последних. Это особенно ярко выражено на участках, где к земной поверхности максимально приближена поверхность сульфатнокарбонатных пород (см. Мухтоловское поднятие и др.).

Согласно структурно-геодинамическим исследованиям, в регионе неотектонические напря-

жения являются разнотипными по ориентации и стресс-режиму (сжатие/растяжение) [6, 8]. Под влиянием этих напряжений развиваются изгибные структуры, которые имеют разные формы и простирание. В северо-западной части Приволжской возвышенности в условиях субмеридионального сжатия образуются субширотные поднятия и прогибы. В северо-восточной части Окско-Донского прогиба под воздействием напряжений субширотного растяжения формируются субмеридиональные структуры (Окско-Цнинский вал и др.). Региональные поля напряжений пересекаются и образуют косую геодинамически активную зону северо-восточного простирания, которую наследует Окско-Муромский

Таблица 1. Оценка неотектонических движений Владимирско-Нижегородского региона

Эрозионно-аккумулятивные циклы и их возраст		Мощность аллювия, м	Абс. отм., м	Ампли- туда подня- тия, м	Скорость движения, мм/год		
Речные террасы							
Пойма, aIV	0.011	13.6	70	16.6	1.56		
Первая терраса, а ¹ III ln-os		12.8	80-90	14.8	0.32		
Вторая терраса, af ² III mk-kl		4.3	90-100	6.3	0.90		
Третья терраса, а ³ II od-ms		10.8	100-110	12.8	0.11		
Четвертая терраса, а ⁴ II kž-ms		12.9	110-120	14.9	0.08		
Денудационные поверхности выравнивания (ступени)							
Калужско-московский цикл, Q_2 (шестая ступень)			100-120	110	0.87*		
Мучкапско-окский цикл, Q_1 (пятая ступень)			120-140	130	0.17		
Петропавловско-покровский цикл, Е (четвертая ступень)			140-160	150	0.08		
Челнинско-чистопольский цикл, N_2 (третья ступень)			160-180	170	0.05		
Горелковско-бушуевский цикл, N_1^3 (вторая ступень)			180-200	190	0.04		
Ламкинский цикл, N_1^2 (первая ступень)			200-220	210	0.03		

^{*}Курсивом обозначены приблизительные значения скоростей

прогиб северо-восточного простирания, включая долину р. Ока (см. рис. 2). Очевидно, что интерференция разнотипных напряжений и деформаций вызывает развитие зон повышенной трещиноватости и водно-флюидной проницаемости в палеозойских породах, в том числе и в ближней зоне Нижегородской АЭС, что подтверждается дешифрированием линеаментов.

Суммарные и поэтапные амплитуды и скорости движений

Во Владимирско-Нижегородском регионе на основе высот денудационных поверхностей выравнивания, глубин врезов речных террас, заполненных аллювиальными отложениями и их возраста оценены суммарные и поэтапные амплитуды и скорости неотектонических движений (табл. 1).

Согласно строению террас, самые высокие поэтапные скорости движений относятся к второй половине среднего неоплейстоцена (см. третья терраса) 0.11 мм/год, первой половине позднего неоплейстоцена (см. вторая терраса) 0.9 мм/год и голоцену 1.56 мм/год. Высокие скорости можно связать с двумя факторами, действующими одновременно, но независимыми друг от друга: 1) деградацией московского ледникового покрова, которая привела к релаксации упругих напряжений сжатия, и 2) неотектоническими напряжениями, действующими на их фоне. Интерференция упругих и неотектонических напряжений, возможно,

является причиной увеличения скорости движений.

Согласно деформациям самой древней денудационной поверхности (первая ступень), суммарная неотектоническая амплитуда поднятия за среднемиоцен-четвертичное время составляет 220 м, а скорость движения — 0.03 мм/год. Наибольшие скорости поэтапных движений относятся к раннечетвертичному времени 0.17 мм/год (пятая ступень) и среднечетвертичному времени 0.87 мм/год (шестая ступень). Но эти скорости, несмотря на их относительно повышенные значения, в 2 и более раза меньше максимальных позднечетвертичных, особенно по сравнению с голоценом — 1.56 мм/год.

Следует заметить, что оценка неотектонических движений, основанная на строении террас и денудационных поверхностей, является приблизительной. Причин этому несколько. Глубина циклового вреза террасы аппроксимировалась с амплитудой поднятия, но при этом не учитывалось влияние экзогенного фактора – цикличности климата. Повышенная обводненность русла может привести к интенсивному врезанию за относительно малое время. Особенно это характерно для голоценовой поймы, формирование которой происходит всего за 0.011 млн лет. Не последнюю роль здесь играет различие в способах оценки движений по террасам и денудационным ступеням, рассмотренных выше. По сравнению с террасами, у которых возраст врезания исчисля-

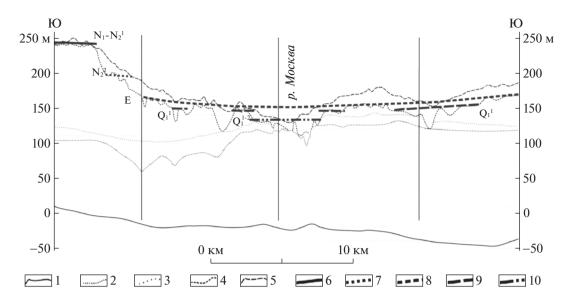


Рис. 3. Структурно-геоморфологический профиль Московского региона (положение профиля см. на рис. 4). 1 — кровля верейского горизонта среднего карбона (репер для оценки позднепалеозойских структур). Эрозионные границы по: 2 — каменноугольным отложениям, 3 — келловей-оксфордским глинам и 4 — мезозойским отложениям. 5 — рельеф земной поверхности. Поверхности денудационного выравнивания (ступени): 6 — миоцен-раннеплиоценовая, $N_1 - N_2^1$; 7 — позднеплиоценовая, N_2^2 ; 8 — эоплейстоценовая, N_2 0 (репер для оценки четвертичных деформаций); 9 — ранненеоплейстоценовая, N_1^2 1.

ется десятками тысяч лет, оценка скорости движений по денудационным ступеням составляет от несколько сот тысяч лет до 7 и более млн лет. При этом амплитуда вреза, к которому развивается поверхность, часто не превышает 20 м.

ОЦЕНКА НЕОТЕКТОНИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ В МОСКОВСКОМ РЕГИОНЕ

В Московском регионе исследованы денудационные поверхности выравнивания, речные террасы и неотектонические структуры с целью определения суммарных и поэтапных амплитуд и скоростей движений, включая оценку эндогенных и экзогенных геологических процессов в Москворецкой геодинамически активной зоне.

Денудационные поверхности выравнивания и речные террасы

В рассматриваемом регионе выделено пять эрозионно-денудационных поверхностей выравнивания и три эрозионно-аккумулятивных террасы (рис. 3, табл. 2) [4, 5, 7, 17].

Денудационные поверхности выравнивания:

— Первая миоцен-раннеплиоценовая поверхность (мэотис-понтический цикл, N_1 – N_2^1) сохранилась на самых высоких водоразделах Теплостанского и Клинско-Дмитровского поднятий на абс. отметках 238–242 м.

- Вторая позднеплиоценовая поверхность (киммерийско-акчагыльский цикл, N_2^2) распространена немного шире на Теплостанском, Кунцевском и Клинско-Дмитровском поднятиях на абс. отметках 200-220 м.
- Третья эоплейстоценовая поверхность (E) широко развита на абс. отметках 150—180 м. Когда-то единая поверхность уверенно восстанавливается на всех геолого-геоморфологических разрезах, что позволило отнести ее к опорной.
- Четвертая ранненеоплейстоценовая поверхность (Q_1^I) распространена на абс. отметках 140—158 м. Ее формирование предшествовало сетунскому оледенению, что позволило связать ступень с татаровской палеодолиной (педимент).
- Пятая поздненеоплейстоценовая поверхность (Q_1^2) развита на абс. отметках $100-130\,$ м. Она наклонена в сторону хорошевской палеодолины, выполненной разновозрастными отложениями, в том числе относящимися ко времени предшествующему донскому оледенению.

Речные террасы [7]:

- Третья ходынская терраса (а³QII hd) является аллювиально-флювиогляциальной, сложена разнозернистыми песками с небольшим количеством гравия и гальки мощностью 6—7 м. Абс. отметки поверхности террасы от 156 до 174 м.
- Вторая мневниковская терраса (a²QIII mn) сложена гравием, галькой, среднезернистыми

Продол-Абс. от-Относит. Амплитуда Скорость Мощность Эрозионно-аккумулятивные циклы и их жительметки. превыподнятия. движения, возраст ность аллювия, м шение, м мм/год M M (млн лет) Речные террасы Пойма, aIV 0.011 15-16 115-125 4-6 (8)* 1.41 15.5 10 - 12126-130 8 - 14Первая серебряноборская терраса, a¹III sb 0.046 13.0 0.29 0.07 10 - 12136-141 25-28(20)Вторая мневниковская терраса, a²III mn 12.7 0.17 10 - 1120 - 356 - 7 M156 - 174Третья ходынская терраса, а³II hd 0.115 8.5 0.07 Денудационные поверхности выравнивания (ступени) 100-130 0.528 115 0.22 Пятая преддонская ступень, Q_1^2 140-158 0.760 149 0.19 Четвертая предсетуньская ступень, O_1^1 Третья эоплейстоценовая ступень, Е 1.8 150-180 0.09 165 200-220 0.06 Вторая поздне-плиоценовая ступень, N_2^2 3.6 210 Первая миоцен-раннеплиоценовая сту-5.33 238-242 240 0.04

Таблица 2. Оценка неотектонических движений в Московском регионе

песками и суглинками. Терраса двухуровенная, мощность ее аллювия составляет 10—12 м и 10—11 м. Абс. отметки поверхности террасы от 136 до 141 м.

- Первая серебряноборская терраса (a¹QIII sb), отложения представлены мелко- и среднезернистыми песками с гравием и галькой, суглинками и супесями мощностью 10—12 м. Абс. отметки поверхности террасы 126—130 м.
- Пойма (aIV) сложена гравийно-галечными, разнозернистыми песками с прослоями суглинков мощностью от 14 (4) м до 16 м. Абс. отметки поверхности от 115 до 125 м.

Неотектонические структуры

Московский регион включает Кунцевское, Теплостанское (Наро-Фоминское) и Клинско-Дмитровское (южное крыло) поднятия и Центральный (Подмосковный) пологий прогиб (рис. 4) [7, 16]. Все перечисленные структуры начиная с понтического времени $(N_1-N_2^1)$ и поныне (голоцен) устойчиво и длительно развивающиеся. Некоторым исключением является Центральный прогиб, в котором в качестве инверсионных выделены Центрально-Московское, Лосиноостровское и др. поднятия. Несогласное сочленение Центрального прогиба с поднятиями позволило выделить отрицательную Москворецкую и флексур-

ную Лихоборскую Г∂АЗ, характеризующиеся сквозным секущим строением [9, 17].

Из двух ГдАЗ наибольший интерес представляет Москворецкая, поскольку занимает центральное положение в мегаполисе – ее наследует долина р. Москва. Геометрические размеры зоны: ширина около 3 км, длина более 100 км. Г∂АЗ простирается далеко за пределы рассматриваемого региона в юго-восточном направлении. На северо-западе на пересечении с Лихоборской ГдАЗ ее развитие обрывается. Согласно деформациям эоплейстоценовой опорной поверхности, возрасту палеодолин и террас, заложившихся в пределах зоны, ГдАЗ рассматривается как эоплейстоценголоценовая. Ее образование связывается с региональными напряжениями латерального сжатия и растяжения, наводимыми соответственно с юга со стороны Наро-Фоминского поднятия и с восток-юго-востока со стороны Окско-Донского активного прогиба [7, 16, 17]. В этой связи Г∂АЗ рассматривается как сбросо-сдвиговая.

Москворецкая $\Gamma \partial A3$ интенсивно изменяет геологическую среду Московского городского мегаполиса по напряженному состоянию и деформациям, что вызывает активизацию опасных экзогенных геологических процессов (воронки, провалы, суффозия, оползни, подпруживание и др. процессы) и образование ореолов вторичного химического загрязнения. С этой точки зрения $\Gamma \partial A3$ является потенциально геоэкологически

^{*}Цифры в скобках – противоречивые данные, требующие уточнения.

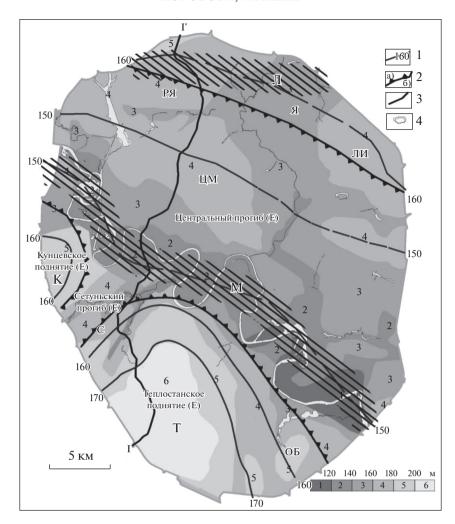


Рис. 4. Неотектоническое строение Московского региона согласно деформациям эоплейстоценовой поверхности выравнивания. 1- изогипсы эоплейтоценовой поверхности, 2- границы неотектонических структур (бергштрихи направлены в сторону прогибаний), 3- структурно-геоморфологический профиль по линии I-I (см. на рис. 3), 4- Московская кольцевая дорога (МКАД). Шкала - абс. высоты, м: 1-100-120, 2-120-140, 3-140-160, $4\cdot160-180$, 5-180-200, 6->200. Геодинамически активные зоны ($\Gamma ∂$ АЗ): M- Москворецкая, M- Лихоборская. M- Теплостанское поднятие, M- Орехово-Борисовское поднятие, M- Кунцевское поднятие, M- Центрально-Московский прогиб, M- Рублевско-Верхнеяузский прогиб, M- Лосиноостровско-Измайловское поднятие, M- Яузский прогиб. Буква в скобках M- Эоплейстоценовый возраст структур (M-

значимой и требует к себе повышенного внимания и оценки [13].

Суммарные и поэтапные амплитуды и скорости движений

В Московском регионе суммарные и поэтапные амплитуды и скорости неотектонических движений впервые оценены на основе возраста и отложений эрозионно-аккумулятивных циклов, а также высотного положения денудационных поверхностей выравнивания (табл. 2).

Судя по положению самой высокой миоценраннеплиоценовой поверхности, общая амплитуда поднятий за неотектонический этап (суммарная) составляет 240 м, а скорость движения

0.04 мм/год. Постадийные скорости движений, оцененные на основе цикличности, дважды увеличивались в периоды: 1) с миоцен-раннеплиоценового (понтического) времени (N_1 – N_2^1) и до преддонского времени включительно (Q_1^2) с 0.04 до 0.22 мм/год, и 2) с ходынского времени до голоцена включительно с 0.07 до 1.41 мм/год. В голоценовое время отмечается максимальная активность неотектонических движений.

Относительно резкое и кратковременное замедление скорости поднятия территории с $0.22~(Q_1^2)$ до 0.07~мм/год (а³II hd) приходится на время московского оледенения и формирования аллювиально-флювиогляциальной террасы. Уменьшение скорости, возможно, обусловлено противо-

действием гравитационного давления ледника неотектоническому поднятию территории. Установлено, что мощность ледниковой "шапки" только на Теплостанском поднятии доходила до 3 км [5], что не могло не сказаться на снижении скорости. Как правило, снятие ледниковой нагрузки вызывает релаксацию упругих напряжений и поднятие ("всплывание") территории с увеличением скорости с 0.07 (a^3 II hd) до 1.41 мм/год (aIV). Поднятие территории происходило на фоне неотектонических дифференцированных движений с образованием прогибов (Центральный и др.) и поднятий: Теплостанского, Клинско-Дмитровского и др. На границах движений с разным знаком формировались Москворецкая и Лихоборская ГдАЗ (см. рис. 4). Повышенные напряжения и деформации в этих зонах вызывают активизацию интенсивных экзогенных процессов: оползневых, суффозионно-карстовых и др.

Оценка эндогенных и экзогенных процессов в Москворецкой геодинамически активной зоне

Москворецкая зона (Г∂АЗ), локализованная в сопряжении Теплостанского поднятия и Центрального (Подмосковного) прогиба, в районе Воробьевых гор рельефно выражена деформацией опорной эоплейстоценовой поверхности, которая наследуется эрозионным уступом Лужницкого меандра. Возраст деформации в абс. значениях составляет 1800 тыс. лет (см. рис. 4). Строение Г∂АЗ позволило количественно оценить эндогенные и экзогенные процессы, произошедшие в ней за эоплейстоцен-голоценовое время.

В районе Воробьевых гор в исследуемой зоне бровка эоплейстоценовой поверхности находится на абс. отметках 160 м, а в районе Лужницкого меандра Москвы-реки — на абс. отметках 150 м. Разница по высоте составляет 10 м, которую можно рассматривать как величину вертикальной амплитуды за 1800 тыс. лет. Кратчайшее расстояние между изолиниями этих абс. отметок — 3000 м. Поделив амплитуду на расстояние (база), получим, что уклон эоплейстоценовой поверхности в зоне составил ~0.003. Деформация, выраженная уклоном денудационной поверхности выравнивания, наследует более древнюю деформацию похожего типа, выраженную по кровле девонских отложений, уклон которой — 0.0037 [7]. Несмотря на их разновозрастность, эти две величины, оцененные разными исследователями, являются практически сопоставимыми, что может указывать на достоверность их оценки. В свою очередь, девонская деформация приурочена к северному уступу Московского рифейского авлакогена, уклон которого составляет максимальную величину 0.1. Увеличение вниз по разрезу величин разновозрастных уклонов указывает на их глубинное тектоническое происхождение.

В этом аспекте можно оценить скорость вертикальных движений в Москворецкой $\Gamma \partial A3$. С учетом амплитуды (10 м) и эоплейстоценового времени ее формирования (1 800 тыс. лет) скорость составляет 0.005 мм/год. По сравнению с одновозрастной поверхностью, скорость неотектонических движений которой для региона в целом оценена как 0.09 мм/год (см. табл. 2), в Москворецкой $\Gamma \partial A3$ на базе 3000 м она меньше почти на порядок. Причиной этого является различие в подходах к оценке скоростей движений. Возможно, что скорость, оцененная только по величине вертикальной деформации (амплитуды поднятия) эоплейстоценовой поверхности без учета эрозионной составляющей, более реалистична.

Активная зона довольно длительно и устойчиво наследуется врезом р. Москва, включая ее палеодолины. Это позволило оценить величину скорости ее глубинного врезания за неоплейстоцен-голоценовое время в границах зоны. Глубина вреза р. Москвы (тальвега) в коренные каменноугольные отложения относительно высоты бровки эоплейстоценовой поверхности составляет 45.5 м, а скорость с учетом времени — 0.025 мм/год. Таким образом, в Москворецкой ГдАЗ скорость эрозионного врезания в тот же временной этап в 5 раз выше по сравнению со скоростью неотектонической деформации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во Владимирско-Нижегородском и Московском регионах исследована эрозионно-аккумулятивная цикличность, выраженная в рельефе разновозрастными и разнородными геоморфологическими ступенями: денудационными поверхностями выравнивания и речными террасами. Разнотипная цикличность формировалась под влиянием прерывистых неотектонических движений и планетарной изменчивости климата. Поэтапная количественная оценка этих движений указывает на дифференцированность амплитуд и скоростей, обусловленную особенностями геодинамических условий формирования неотектонических структур.

В регионах средняя амплитуда поднятий за новейшее время составляет около 220 м, скорость поднятия 0.035 мм/год. Из поэтапных скоростей относительно высокие скорости движений отмечаются во второй половине среднего неоплейстоцена — 0.9 мм/год (Владимирско-Нижегородский регион), а самые большие в голоцене — 1.41 и 1.56 мм/год. Снижение скоростей почти на порядок характерно для первой половины среднего неоплейстоцена — 0.07 и 0.08 мм/год. Одна из причин их изменчивости — цикличность ледниковых и межледниковых эпох, происходящая на фоне неотектонических напряжений. Ледниковая гравитационная нагрузка на рельеф может

вызвать снижение скоростей поднятия территории, а ее снятие в ходе деградации ледника — их увеличение.

В Москворецкой Г∂АЗ впервые оценена скорость неотектонических (эоплейстоценовых) деформаций, которая составляет 0.005 мм/год. Оценка скорости врезания (экзогенного фактора) показала превышение ее над неотектонической в 5 раз − 0.025 мм/год. Увеличенная скорость эрозионных процессов подтверждает раннее сделанные выводы, что на платформенных территориях относительно небольшие величины неотектонических движений могут вызывать интенсивные экзогенные геологические процессы, в том числе опасного ряда.

Площадка Нижегородской АЭС находится на пятой ранненеоплейстоценовой ступени, которая формировалась в мучкапско-окский эрозионно-аккумулятивный цикл. Скорость движений для этого цикла составляет 0.17 мм/год, а с поправкой на эрозионную составляющую 0.03 мм/год. К голоценовому времени она увеличилась на порядок и оценивается 1.56 мм/год. Резкое возрастание скорости движений привело к интенсивному развитию экзогенных процессов, в частности, суффозионно-карстовых, что явилось одной из причин приостановки строительства АЭС и проведения дополнительных более углубленных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Геологическая карта м-ба 1:200000. Изд. 2-е. Серия Средневолжская. Лист О-38-ХХХІІ. Объяснит. записка. Сост-ли: Поздняков Л.Н., Клинк Б.Е., Купрюшина Н.И. / Ред. Б.А. Гантов. М.: Московский филиал ФГБУ "ВСЕГЕИ", 2018. 102 с.
- 2. *Ершова С.Б.* Анализ новейших движений при инженерно-геологическом районировании (на примере Западно-Сибирской плиты). М.: Изд-во МГУ, 1976. 142 с.
- 3. Инженерные изыскания для строительства: практика и опыт Мосгоргеотреста / Под ред. А. В. Антипова, В.И. Осипова. М.: ООО Изд-во "Проспект", 2012, 352 с.

- 4. Карта поверхностей выравнивания и кор выветривания СССР. М.: ГУГК СССР. 1972.
- Кожевников А.В., Кожевникова В.Н., Рыбакова Н.О. Стратиграфия подмосковного плейстоцена // Бюл. МОИП. 1979. Т. 54. В. 2. С. 103—127.
- 6. *Коробова И.В.* Структурно-геоморфологическая зональность Владимирско-Нижегородского региона и ее геоэкологическое значение // Вестник Пермского университета. Сер. геология. 2021. Т. 20. № 1. С. 63—74.
- 7. *Макаров В.И., Бабак В.И., Федонкина И.Н.* Новейшая тектоническая структура и рельеф. Москва: геология и город. М.: АО "Московские учебники и Картолитография". 1997. С. 86—105.
- 8. Макарова Н.В., Макеев В.М., Дорожко А.Л., Коробова И.В. Геодинамические системы и геодинамически активные зоны Восточно-Европейской платформы // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2016. Т. 91. Вып. 4–5. С. 9–26.
- 9. *Макеев В.М., Макарова Н.В., Леденев В.Н., Дорож-ко А.Л. и др.* Основы концепции геодинамической безопасности экологически опасных сооружений // Геоэкология. 2015. № 2. С. 99—110.
- Международная хроностратиграфическая шкала ISC IUGS. Международная стратиграфическая комиссия. 2020b. URL: https://stratigraphy.org/ICSchart/QuaternaryChart1.jpg
- 11. *Несмеянов С.А.* Оротектонический метод. М.: ООО "Миттель-Пресс" 2017. 376 с.
- 12. Новейшие отложения, рельеф и неотектоника северной части Приволжской возвышенности / Ред. В.М. Седайкин. Саратов: СГУ. 1985. 207 с.
- 13. Осипов В.И., Кутепов В.М., Макаров В.И. Геологические условия градостроительного развития г. Москвы // Уникальные и специальные технологии в строительстве. 2006. № 1 (4). С. 10–22.
- 14. Стратиграфический кодекс России (МСК международный стратиграфический кодекс). Издание третье. испр. и доп. СПб.: ВСЕГЕИ, 2019. 96 с.
- 15. *Хаин В.Е.* О непрерывно-прерывистом типе тектонических процессов // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1950. № 6. С. 13–21.
- 16. *Dorozhko A.L.*, *Makeev V.M.* Large-scale Structural and Geodynamic Mapping of Platform Territories on the Example of Moscow // J. of Earth Science and Engineering. 2013. № 3. P. 527–539.
- 17. *Grigor'eva S.V., Makarov V.I.* Large-Scale Mapping of Neotectonics of Platform Territories: Case Study of Moscow // Water Resources. 2011. V. 38. № 7. P. 902–915.

ASSESSMENT OF NEOTECTONIC MOVEMENTS IN THE CENTRAL PART OF THE EASTERN EUROPEAN PLATFORM

I. V. Korobova^{a,#} and V. M. Makeev^{a,##}

^a Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS (IEG RAS), Ulansky per. 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia [#]E-mail: irakorv@mail.ru

##E-mail: vmakeev@mail.ru

Structural and geomorphological studies were carried out in the Vladimir-Nizhny Novgorod and Moscow regions in order to assess the amplitudes and velocities of total and gradual neotectonic movements that determine the intensity of geological processes. The quantitative assessment is based on the study of different types

of denudation surfaces of leveling and river terraces related to erosion-accumulative cycles. Factual material includes information about the age, genesis and composition of sediments, structural and geomorphological sections, as well as field route observations. The research results indicate the differentiation in neotectonic movements by amplitudes and velocities due to the peculiarities of geodynamic conditions upon the formation of new and modern structures. On the basis of the Eopleistocene reference surface, the vertical rates of neotectonic deformations and the rates of erosion processes (deep embedding) for the Neo-Pleistocene-Holocene time in the Moskvoretskaya geodynamically active zone are estimated for the first time. The deformation rate has been estimated at 0.005 mm/year, the rate of erosive embedding being 5 times higher than the neotectonic one (0.025 mm/year). The total value of endogenous and exogenous components is 0.03 mm/year. The research results confirm the previous conclusion that an insignificant speed of neotectonic movements on platforms causes the intensive development of exogenous geological processes. Activity of these processes is one of the reasons for the postponement of designing and construction of the Nizhny Novgorod nuclear power plant.

Keywords: structural-geomorphological method, neotectonic structures, geodynamically active zones, denudation levels, river terraces, amplitudes and velocities of movements, geoecologically significant dislocations

REFERENCES

- Geologicheskaya karta m-ba 1:200000 Izdaniye vtoroye. Seriya Srednevolzhskaya. List O-38-XXXII [Geological map scale 1: 200,000 Second edition. Middle Volga series. Sheet O-38-XXXII] Ob"yasnit. zapiska. Compiled by Pozdnyakov, L.N., Klink, B.Ye., Kupryushchina, N.I. Gantov B.A., Editor. Moscow, 2018, 102 p. (in Russian)
- 2. Ershova, S.B. *Analiz noveishikh dvizhenii pri inzhener-no-geologicheskom raionirovanii (na primere Zap.-Sib. plity)* [Analysis of the latest movements in engineering geological zoning (by the example of the West Siberian Plate)]. Moscow, MGU Publ., 1976, 142 p. (in Russian)
- 3. *Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva: praktika i opyt Mosgorgeotresta* [Engineering survey for construction: practice and experience of Mosgorgeotrest]. A.V. Antipov, V.I. Osipov, Eds. Moscow, Prospekt Publ., 2012, 352 p. (in Russian)
- 4. Karta poverkhnostei vyravnivaniya i kor vyvetrivaniya SSSR [Map of alignment surfaces and weathering crusts of the USSR]. Moscow, GUGK SSSR Publ., 1972. (in Russian)
- 5. Kozhevnikov, A.V., Kozhevnikova, V.N., Rybakova, N.O. *Stratigrafiya podmoskovnogo pleistotsena* [Stratigraphy of the Moscow region Pleistocene]. *Byul. MOIP*. 1979, vol. 54, no. 2, pp. 103–127. (in Russian)
- Korobova, I.V. Strukturno-geomorfologicheskaya zonal'nost' Vladimirsko-Nizhegorodskogo regiona i eyo geoekologicheskoe znacheniye [Structural and geomorphological zoning of the Vladimir-Nizhny Novgorod region and its geoecological significance]. Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya, 2021, vol. 20, no. 1, pp. 63–74. (in Russian)
- 7. Makarov, V.I., Babak, V.I., Fedonkina, I.N. *Noveishaya tektonicheskaya struktura i rel'ef. Moskva: geologiya i gorod* [The newest tectonic structure and relief. Moscow: geology and the city]. Moscow, Moskovskie uchebniki i kartolitografiya Publ., 1997, pp. 86–105. (in Russian)
- 8. Makarova, N.V., Makeev, V.M., Dorozhko, A.L., Korobova, I.V. *Geodinamicheskie sistemy i geodinamicheski aktivnye zony Vostochno-Evropeiskoi platformy* [Geody-

- namic systems and geodynamically active zones of the East European platform]. *Byull. MOIP. Otd. Geol.* 2016, vol. 91, no. 4–5, pp. 9–26. (in Russian)
- 9. Makeev, V.M., Makarova, N.V., Ledenev, V.N., Dorozhko, A.L., Sukhanova, N.V., Karfidova, E.A., Korobova, I.V. *Osnovy kontseptsii geodinamicheskoi bezopasnosti ekologicheski opasnykh sooruzhenii* [Fundamentals of the concept of geodynamic safety of environmentally hazardous structures]. *Geoekologiya*, 2015, no. 2, pp. 99–110. (in Russian)
- Mezhdunarodnaya khronostratigraficheskaya shkala ISC IUGS. Mezhdunarodnaya stratigraficheskaya komissiya. [International chrono-stratigraphic scale ISC IUGS.]. 2020. Available at: www.stratigraphy.org/index.php/ics-chart-timescale
- Nesmeyanov, S.A. Orotektonicheskiy metod [Orotectonic method]. Moscow, LLC "Mittel-Press" 2017. 376 p. (in Russian)
- 12. Noveishie otlozheniya, rel'ef i neotektonika severnoi chasti Privolzhskoi vozvyshennosti [The newest sediments, relief and neotectonics of the northern part of the Volga Upland.]. V.M. Sedaykin, Ed., Saratov, SGU Publ., 1985, 207 p. (in Russian)
- 13. Osipov, V.I., Kutepov, V.M., Makarov, V.I. *Geologicheskie usloviya gradostroitel'nogo razvitiya g. Moskvy* [Geological conditions of urban development in Moscow]. *Unikal'nye i spetsial'nye tekhnologii v stroitel'stve*. 2006, no. 1 (4), pp. 10–22. (in Russian)
- 14. Stratigraficheskii kodeks Rossii (MSK mezhdunarodnyi stratigraficheskii kodeks) [Stratigraphic Code of Russia (MSC International Stratigraphic Code)]. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2019, 96 p. (in Russian)
- 15. Khain, V.Ye. *O nepreryvno-preryvistom tipe tektonich-eskikh protsessov* [On the continuous-discontinuous type of tectonic processes]. *Izv. AN SSSR. Ser. geol.* 1950, no. 6, pp. 13–21. (in Russian)
- Dorozhko, A.L., Makeev, V.M. Large-scale structural and geodynamic mapping of platform territories on the example of Moscow. *J. of Earth Science and Engineer*ing, USA. 2013, no. 3, pp. 527–539.
- 17. Grigor'eva, S.V., Makarov, V.I. Large-scale mapping of neotectonics of platform territories: case study of Moscow. *Water Resources*, 2011, vol. 38, no. 7, pp. 902–915.

_____ ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ _____ ПРОЦЕССЫ

УЛК 504.064.37

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ГРЯДОВЫХ АРИДНЫХ ЛАНДШАФТОВ ОЗЕРНЫХ КОТЛОВИН ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РЕШЕНИЮ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАЛАЧ

© 2021 г. Т. В. Гоников^{1,2,*}

¹ Географический факультет МГУ им. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, Москва, ГСП-1, 119991 Россия ² Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия *E-mail: gonikov.timur@vandex.ru

> Поступила в редакцию 14.04.2021 г. После доработки 24.05.2021 г. Принята к публикации 10.06.2021 г.

В статье представлены результаты сравнительного анализа ландшафтных морфологических структур двух крупных физико-географических объектов — бэровских бугров Северного Прикаспия и островных грядовых комплексов оз. Чад. Методами математической морфологии ландшафта установлено сходство в строении указанных ландшафтных рисунков, выраженное в логнормальном распределении диаметров гряд и пуассоновском распределении особых точек. Анализ проводился на четырех участках распространения бэровских бугров и двух участках оз. Чад. Количественные исследования морфологической структуры грядовых аридных ландшафтов озерных котловин дают новый материал для исследования происхождения этих ландшафтов. Предложены подходы к решению ряда геоэкологических и инженерных задач в подобных ландшафтах.

Ключевые слова: бэровские бугры, крупногрядовый рельеф, рисунок ландшафта, математическая морфология ландшафта, озеро Чад

DOI: 10.31857/S0869780921050052

ВВЕЛЕНИЕ

Грядовые ландшафты побережий крупных внутриконтинентальных озер (Каспийское море, Балхаш, Аральское море, Чад) в аридных зонах являются исключительно динамичными комплексами. Использование их человеком сопряжено с такими сложностями, как высокая динамика уровня воды, опустынивание, активность эоловых процессов, засоление почв. Такая сложная картина требует поиска нового взгляда на проблему изучения структуры и динамики подобных ландшафтов и выработку геоэкологических технологий их освоения. Для решения значительного комплекса таких задач важны количественные закономерности, которым подчиняется развитие морфологической структуры ландшафтов (ландшафтный рисунок). Зачастую именно с этими закономерностями может быть связано решение задач оценки риска поражения негативными процессами. Частота чередования природно-территориальных комплексов, формирующих ландшафт, их линейные и площадные размеры нередко являются определяющими степень пригодности территории для прокладки инженерных сооружений, возможные затраты и мероприятия по противодействию негативным процессам. Целый ряд исследований в последнее время посвящен изучению количественных характеристик ландшафтов, однако, большей частью подобные работы относятся к криолитозоне [3–5].

Цель настоящей работы — выявление количественных закономерностей морфологической структуры особого вида ландшафтов, а именно грядовых аридных ландшафтов озерных котловин, как основы для дальнейшего их использования при оценке геоэкологических условий строительства и эксплуатации инженерных сооружений. Решение задачи было основано на количественном анализе морфологической структуры ландшафтов-аналогов с элементами сравнительного анализа.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

- В качестве объектов исследования выбраны:
- грядовые ландшафты Северного Прикаспия (бэровские бугры);
 - грядовые ландшафты в районе оз. Чад.

Выбор этих объектов связан с тем, что они представлены обширными внутриконтинентальными экосистемами, формирующимися в условиях аридного климата, причем климатические особенности обусловили особые условия динамики данных ландшафтов — зависимость от колебаний уровня озер [1, 13]. Это привело к развитию ряда экзогенных процессов (эоловые процессы, засоление, морфолитодинамика), которые и определили существующую морфологическую структуру [19]. На территории РФ грядовые аридные ландшафты Прикаспия являются ареной строительства и эксплуатации значительных линейных сооружений.

Наиболее обширное распространение бэровских бугров приходится на западную часть дельты р. Волга. Эти ландшафты также известны под называнием Западные ильмени. Здесь бэровские бугры простираются на сотни километров, имея строго широтное направление. В восточной части волжской дельты распространены Восточные ильмени. Их площадь много меньше, направление гряд также широтное. Многочисленные гряды разбросаны так же и по площади современной дельты, но они частично разрушены деятельностью водотоков, поэтому их морфология отличается от грядово-волнистых ландшафтов Западных и Восточных ильменей. Другой ареал распространения бугров находится в западной части дельты р. Урал, южнее обширных территорий Рын-песков в Прикаспийской низменности, расположенных на водоразделе рек Волга и Урал. Еще один крупный ареал располагается между дельтами рек Эмба и Урал [2, 9, 12].

Природным особенностям грядовых ландшафтов бэровских бугров посвящено много исследований, а их происхождение много десятилетий является предметом дискуссий. Как правило, исследователями рассматриваются четыре основные гипотезы: морская, эрозионная, эоловая и полигенетическая [2, 14, 15]. В своем типичном проявлении ландшафт бэровских бугров представляет собой сочетание злаково-пустынных урочищ на грядах с урочищами межбугровых пространств. Вариации межбугровых комплексов представлены солончаковыми комплексами, ильменями (или ериками) или зональными полупустынными комплексами. Нередко встречаются участки эолового перевеивания, чаще всего они приурочены к склонам бугров или понижениям.

Грядовые комплексы оз. Чад располагаются непосредственно в чаше озерной котловины, образуя массовые скопления субпараллельных островов (рис. 1, 2). Работ, посвященных происхождению грядовых островных образований оз. Чад, не очень много. В основном акцент смещен на изучение динамики уровня озера. Большинство авторов указывает на их эоловое происхождение,

называя гряды "дюнами" [1, 17]. Однако некоторые исследователи указывают на необходимость более детального изучения генезиса гряд в совокупности с морфолитогенной динамикой озера [16]. В русскоязычной литературе эти островные комплексы упоминаются как эоловые дюны [7].

Озеро Чад в определенном смысле является пространственным аналогом Аральского моря. За последние 70 лет оз. Чад испытало значительное обмеление (до 5 м), сопровождающееся резким уменьшением водной поверхности озера (до 60%). Кроме того, колебания уровня озера могут сильно меняться в зависимости от сезона. В настоящее время большинство работ по изучению Чада посвящено колебанию его уровня [1]. История колебания уровня вод в голоцене обусловила специфическую динамику грядовых комплексов с образованием различных типов островных природно-территориальных комплексов (см. рис. 1) [18]. На больших площадях, осущенных в результате обмеления озера, образовался полосчатый ландшафтный рисунок, состоящий из грядовых островных комплексов, имеющих общую ориентацию с северо-запада на юго-восток. Часть этих гряд существовала еще до начала фиксации активного обмеления озера, другая часть появилась на осущенных площадях совсем недавно [7].

Спецификой настоящего исследования является подход, основанный на изучении рисунка ландшафта или ландшафтной мозаики территории [4]. Основной методический подход — анализ ландшафтных рисунков выделенных объектов в рамках математической морфологии ландшафта, и их последующее сопоставление.

Методика исследования включала следующие основные процедуры: 1) выбор эталонных участков, отражающих ландшафтные мозаики; 2) подбор материалов данных дистанционного зондирования (ДДЗ) для каждого эталонного участка; 3) создание схем ландшафтного дешифрирования; 4) выбор и получение морфометрических характеристик; 5) проверка полученных данных на соответствие статистическим законам распределения.

- 1. Выбор эталонных участков, отражающих ландшафтные мозаики. Было выбрано 6 участков, 4 из них представляют ландшафты Прикаспия с массовым распространением бэровских бугров. Другие два относятся к оз. Чад, его северной и южной части соответственно. Критериями выбора участка являлись массовость распространения грядовых комплексов, а также морфологическая однородность рисунка [4].
- 2. Подбор материалов ДДЗ для каждого эталонного участка. Основные материалы: цифровые модели рельефа (ЦМР) "Srtm" (90 м/пикс) и высокодетальные снимки "WorldView-1". Разрешение использованных высокодетальных снимков

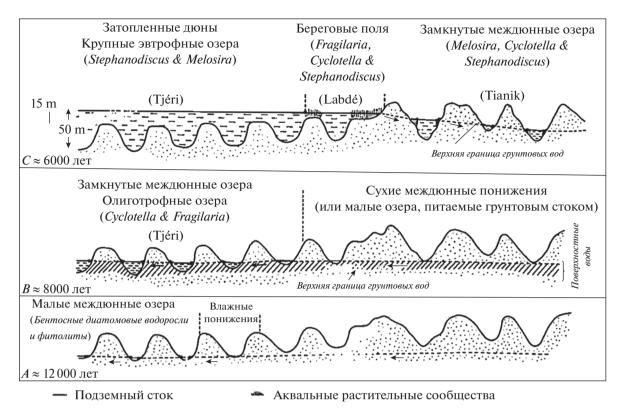


Рис. 1. Динамика грядовых комплексов оз. Чад в голоцене по [18].

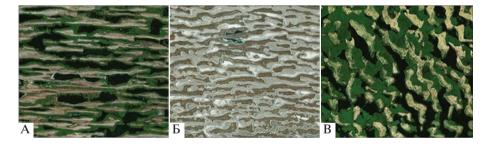


Рис. 2. Примеры изображений массового распространения грядовых структур. А – бэровские бугры в сочетании с ильменями в пределах палеодельты Волги, Б — бэровские бугры в сочетании с соровыми солончаками в дельте Урала, В — грядовые комплексы оз. Чад.

1 м/пикс. В ходе работы использовалась стандартная цветопередача. Подобная точность отражения рельефа не позволила использовать автоматическое выделение грядовых комплексов, поэтому данные ЦМР использовались во вспомогательных целях при проведении ручного дешифрирования комплексов.

3. Создание схем ландшафтного дешифрирования методом ручного дешифрирования высокодетальных космических снимков в программной среде ArcMap 10.3. В нашем случае акцент был сделан на выделение групп урочищ, представляющих песчаные вытянутые гряды, занятые различными полупустынными фитоценозами, и по-

ниженных участков, занятых солончаковыми комплексами. Подобная специфика определяется однородным бидоминантным строением рисунка грядово-волнистых ландшафтов Прикаспия.

4. Выбор и получение морфометрических характеристик. Морфологическая структура ландшафта в нашем случае отражается двумя типами показателей. Первые — это параметры, характеризующие морфометрические особенности бэровских бугров. Вторые — особые точки, характеризующие особенности расположения грядовых комплексов в пространстве. К параметрам, характеризующим морфометрию гряд, относились:

- а) диаметры гряд, представляющие из себя длину отрезка, проведенную между точкой начала и конца каждой гряды в системе ГИС линейные векторные объекты, длина которых рассчитывалась автоматически;
- б) *площади гряд*, аналогичные площади векторных полигонов (ландшафтные контуры); расчет площадей ландшафтных контуров проводился автоматически в программе ArcMap 10.3;
- в) *периметры гряд* (длина границы ландшафтного контура); расчет периметров ландшафтных контуров проводился автоматически в программе ArcMap 10.3.1.

К показателям расположения гряд в пределах однородных ландшафтных рисунков относились "особые" точки морфологической структуры:

- а) число точек начал гряд; точками начал гряд условно считались точки западной ориентации гряд (все бугры независимо от участка имеют субширотную ориентацию). Их получение сводилось к автоматическому определению крайних западных точек отрезков, представляющих диаметры грядовых комплексов;
- б) число точек пересечения и примыкания гряд. В рамках нашей работы точки примыкания и пересечения рассматривались совместно и расставлялись вручную, так как автоматический алгоритм этой процедуры показывал неудовлетворительные результаты. Часто точки примыкания совпадали с начальными и конечными точками, но рассматривались отдельно, так как являются существенно иной характеристикой;
- в) число точек окончания гряд. Точками окончания гряд считались восточные точки каждой отдельной гряды. Их получение сводилось к автоматическому определению крайних восточных точек отрезков, представляющих диаметры гряд.
- 5. Проверка полученных данных на соответствие статистическим законам распределения. Полученные характеристики проверялись на соответствие статистическим законам распределения в программе Statistica 13.

Распределение таких параметров, как длина, периметр и площадь гряд проверялось на соответствие логнормальному, гамма- и экспоненциальному законам распределения по критерию Пирсона. Начальной нулевой гипотезой являлась гипотеза об отсутствии различий между теоретическим и эмпирическим законом распределения. Выходной параметр, позволяющий судить о сходстве теоретического и существующего распределения, — величина *p*, представляющая собой вероятность превышения фактического значения

 χ^2 . В том случае, если ее значение превышает 0.05, в рамках данного исследования корректно гово-

рить, что распределение данных соответствует проверяемому статистическому закону на уровне значимости 0.95 [8, 10].

Показатели расположения гряд (число точек начала, пересечений и окончаний) проверялись на соответствие закону Пуассона. Для этого еще на этапе работ по получению соответствующих величин, в программе ArcMap 10 специальным модулем Poisson на каждый эталонный участок накладывались четыре векторных площадных слоя. Каждый из четырех слоев представлял собой 100 случайно заданных окружностей (пробных площадок), радиус которых был равен R, 1.5R, 2R, 3R соответственно, где R — радиус окружности первого векторного слоя (базовый), определялся по формуле:

$$R = \sqrt{\frac{s}{\pi n}},\tag{1}$$

где s — площадь участка; n — число контуров гряд.

Модуль автоматически рассчитывал, какое число точек попадает в окружность и создавал массив данных "Join count". Этот массив и был предметом анализа на соответствие распределения числа точек закону Пуассона в программе Statistica 13. Таким образом, на каждом эталонном участке расположение гряд характеризовалось тремя морфометрическими величинами, по каждой из которых анализировались четыре выборки, соответствующие четырем разным размерам пробных площадок (окружностей).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненный анализ морфологических структур позволил получить ряд количественных закономерностей. Одним из наиболее важных результатов является то, что на всех 6 участках показатели длин гряд и их периметров распределены по закону близкому к логнормальному. Значения p колеблются от 0.068 до 0.818 (табл. 1).

Плотность распределения диаметров гряд (d) в пределах однородного участка задается выражением:

$$f_d(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-(\ln x - a)^2/2\sigma^2},$$
 (2)

где a и σ — параметры распределения.

Сходство в логнормальном распределении диаметров гряд двух объектов хорошо прослеживается на полученных графиках плотностей распределений, представленных на рис. 3. Пик значений в обоих случаях приходится на длины 1000-1500 м.

Площадь гряд в двух случаях подчиняется экспоненциальному распределению, в других двух — логнормальному, еще в одном говорить о какомто соответствии статистическим законам распре-

Таблица 1. Результаты оценки согласия эмпирических распределений морфометрических характеристик гряд с различными статистическими законами распределения

		Объем выборки	Среднее значение	p			
№ участка	Морфометрические характеристики			Распределение			
		_		логнормальное	экспоненциальное		
1 (Дельта Волги)	Диаметры гряд	356	2194	0.492	0.000		
	Площадь гряд		617972	0.000	0.217		
	Периметр гряд		4737	0.818	0.000		
2 (Дельта Урала)	Диаметры гряд	279	2008	0.222	0.000		
	Площадь гряд		482397	0.000	0.269		
	Периметр гряд		4289	0.068	0.000		
3 (Дельта Урала)	Диаметры гряд	192	1412	0.053	0.000		
	Площадь гряд		1322972	0.599	0.000		
	Периметр гряд		4712	0.192	0.000		
4 (Дельта Урала)	Диаметры гряд	142	2493	0.096	0.000		
	Площадь гряд		996539	0.495	0.000		
	Периметр гряд		5646	0.054	0.000		
5 (Чад)	Диаметры гряд	482	2357	0.072	0.000		
	Площадь гряд		6548.78	0.523	0.000		
	Периметр гряд		2431764	0.288	0.068		
6 (Чад)	Диаметры гряд	282	1692	0.288	0.000		
	Площадь гряд		1256916	0.013	0.396		
	Периметр гряд		4584	0.129	0.000		

Жирным шрифтом выделены случаи согласия эмпирического и соответствующего теоретического распределения на уровне значимости 0.95.

деления не представляется возможным (см. табл. 1). Поэтому интерпретировать поведение данной морфометрической характеристики сложно.

Анализ дискретных показателей, характеризующих расположение гряд, продемонстрировал более пеструю картину (табл. 2).

В первую очередь обращает на себя внимание, что в большинстве случаев для всех групп точек закон Пуассона выполняется для участков, представляющих оз. Чад (*p* от 0.259 до 0.769). Xуже всего закон Пуассона выполняется на 3-м и 4-м участках. Однако на участках № 1 и № 2 закон Пуассона подтверждается. Случаи, когда закон Пуассона не выполняется, интерпретировать сложно. Данное обстоятельство нуждается в дополнительном исследовании. Результаты данных расчетов указывают, что особые точки морфологической структуры в 4-х случаях из 6 распределены по закону Пуассона. Это позволяет нам говорить, что закономерность морфологической структуры ландшафтов существует, как для бэровских бугров в дельте Урала, так и в районе оз. Чал.

Таким образом, периметры и длины грядовых структур аридных ландшафтов озерных котловин распределены логнормально внутри участков с

однородным ландшафтным рисунком, а точки начал, пересечений и окончания гряд в большинстве случаев подчиняются распределению Пуассона.

Выполненное исследование дает новый материал для решения вопроса о происхождении грядовых ландшафтов озерных котловин и бэровских бугров в частности. Установленные эмпирически закономерности указывают на сходство ландшафтных рисунков с участием бэровских бугров в пределах Северного Прикаспия и грядовых комплексов оз. Чал.

Однако изучение ландшафтного рисунка — лишь один из аспектов исследований сложных природных объектов. Результаты представленных выше расчетов не могут интерпретироваться как доказательство генетического сходства ландшафта бэровских бугров и грядового ландшафта в районе оз. Чад, скорее они указывают на необходимость более детальных сравнительных геоморфологических исследований.

С этой точки зрения, в работе затрагивается вопрос изучения крупногрядового рельефа котловин аридных озер в глобальном пространственном аспекте. Особенно интересным данный во-

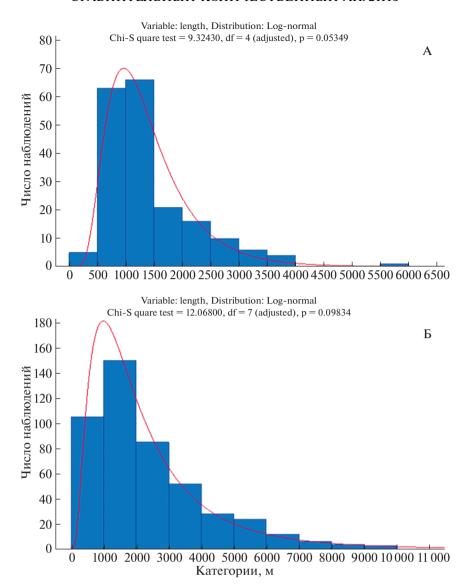


Рис. 3. Теоретический (линия) и эмпирический (гистограмма) график плотности логнормального распределения диаметров на участке: A - № 4 (дельта р. Урал), B - № 5 (оз. Чад).

прос предстает в связи с колебаниями уровней крупных аридных озерных геосистем и связанными с ними процессами морфолитогенной динамики [1, 7].

Изучение динамики грядовых комплексов в котловине Чада может дать новые данные для исследования формирования крупногрядового рельефа, в частности бугров Бэра. Так, сравнение разновременных космических снимков (в период с 1970 г. по настоящее время) позволяет отметить появление грядовых структур в северной и южной частях котловины оз. Чад. Их образование зачастую наблюдается в аквальных условиях, а ориентация не всегда соответствует направлению ветров, что позволяет усомниться в однозначности их эолового генезиса. На наш взгляд, необхо-

димо изучить данные процессы формирования гряд в связи с морфолитогенной динамикой озер и деятельностью течений. В этой связи, исследование может опираться на морскую гипотезу происхождения бэровских бугров [6, 11].

Полученные закономерности в определенной степени противоречат полигенетической теории генезиса бугров, предложенной в недавнее время [14]. В настоящее время отсутствуют результаты, свидетельствующие о том, что полигенетические рисунки описываются строгими статистическими законами. Помимо этого, в полигенетической теории фигурируют эрозионные процессы, а изученные крупногрядовые рисунки не указывают на сходство с эрозионными структурами, так как математические модели последних основаны на

34

Таблица 2. Результаты расчета оценки эмпирических распределений "особых" точек морфологической структуры на соответствие закону Пуассона

	Особые точки морфо- логической структуры		p			
№ участка		Количество точек	Закон Пуассона			
			R	1.5 <i>R</i>	2 <i>R</i>	3R
1 (Дельта Волги)	Точки начал гряд	163	0.044	0.331	0.098	0.199
	Точки сочленения гряд	124	0.019	0.510	0.373	0.108
	Точки окончания гряд	184	0.115	0.170	0.109	0.031
2 (Дельта Урала)	Точки начал гряд	187	0.010	0.010	0.115	0.904
	Точки сочленения гряд	118	0.118	0.245	0.223	0.766
	Точки окончания гряд	183	0.006	0.100	0.460	0.007
3 (Дельта Урала)	Точки начал гряд	189	0.012	0.005	0.000	0.000
	Точки сочленения гряд	105	0.267	0.471	0.117	0.013
	Точки окончания гряд	190	0.000	0.000	0.000	0.000
4 (Дельта Урала)	Точки начал гряд	135	0.068	0.004	0.000	0.000
	Точки сочленения гряд	191	0.526	0.007	0.001	0.201
	Точки окончания гряд	130	0.011	0.010	0.000	0.000
5 (Чад)	Точки начал гряд	269	0.716	0.001	0.304	0.738
	Точки сочленения гряд	270	д.о.	0.259	0.623	0.756
	Точки окончания гряд	115	0.033	0.688	0.485	0.769
6 (Чад)	Точки начал гряд	275	0.016	0.349	0.703	0.316
	Точки сочленения гряд	114	0.402	0.669	0.641	0.048
	Точки окончания гряд	264	0.008	0.679	0.485	0.433

Жирным шрифтом выделены случаи согласия эмпирического и теоретического распределения на уровне значимости 0.95.

экспоненциальных законах распределения [4]. Исходя из этого, рассмотрение эрозионного генезиса бугров с позиций математической морфологии ландшафта нецелесообразно.

Более сложным представляется и вопрос о сопоставлении бугров с типичными эоловыми образованиями. Рисунки эоловых равнин весьма разнообразны и мало изучены с применением аппарата математической морфологии. Созданная каноническая модель морфологической структуры грядового эолового ландшафта указывает на экспоненциальное распределение [4], что отличается от полученных нами результатов. Однако эта модель не описывает все типы морфологии эоловых равнин. Данный вопрос нуждается в дальнейшем изучении, поэтому теория эолового генезиса бэровских бугров также может быть рассмотрена в рамках математического изучения рисунков.

Полученные количественные закономерности в последующем могут быть использованы для решения различных задач. Так, логнормальность распределения длин гряд и пуассоновский характер их расположения позволяют при проектировании трубопровода или другого линейного сооружения аналитически определить вероятност-

ное распределение числа отрезков линейного сооружения, приходящихся на участки с агрессивными эколого-геохимическими условиями (соровые участки). Предположим, что проектируется сооружение длиной L. Исходным является тот факт, что в силу чередования число отрезков линейного сооружения, приходящихся на гряды, и число отрезков, приходящихся на соры¹, равны. Созданная модель позволяет для получения искомого распределения использовать комплексирование решений, полученных для оценки поражения трубопроводов термокарстовыми процессами при произвольной форме очагов [3, 4]. При этом для числа отрезков сооружения, приходяшихся на гряды, получаем распределение Пуассона:

$$P(v) = \frac{(\beta \gamma L)^{v}}{v!} e^{-2\beta \gamma L},$$

где β — средняя проекция гряды на ось перпендикулярную к данному линейному сооружению, γ —

¹ Соры (соровые бессточные понижения) — это и форма аридного рельефа, и уникальный ландшафт, в котором протекают одновременно специфические геоморфологические, гидрогеологические, геохимические, микробиологические и почвенные процессы).

средняя плотность расположения гряд. Учитывая постоянство угла пересечения гряд и сооружения (α) и выражение для средней длины гряды при ее распределении по логнормальному закону [8], получаем:

$$\beta = \exp(0.5\sigma^2 + a)\sin\alpha,$$

где a и σ — параметры распределения длин гряд.

Из полученного распределения числа отрезков сооружения, приходящихся на гряды, следует, в частности, что среднее число пересечений гряд, а значит и соровых участков, дается выражением:

$$\overline{v} = \gamma L \exp(0.5\sigma^2 + a) \sin \alpha$$

со средней длиной сооружения, приходящейся на соровые участки:

$$L_s = \gamma w L \exp(0.5\sigma^2 + a) \sin \alpha$$
,

где w — средняя ширина сора.

выводы

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

- 1. Эмпирические данные указывают на логнормальный характер распределения длин гряд в грядовых аридных ландшафтах озерных котловин и пуассоновское распределение их особых точек (начало, окончание, примыкание) в разных физико-географических условиях.
- 2. Количественные исследования морфологической структуры грядовых аридных ландшафтов озерных котловин дают новый материал для исследования их происхождения через сравнительный анализ и сопоставление ландшафтов крупных озерных экосистем в аридных регионах.
- 3. Выявленные закономерности морфологической структуры грядовых аридных ландшафтов озерных котловин могут быть использованы при оценке геоэкологических условий строительства, эксплуатации инженерных сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Абоссоло С.Э. Факторы формирования многолетних и межгодовых изменений уровня озера Чад: дисс....канд. геогр. наук. СПб.: РГГМУ, 1996. https://www.dissercat.com/content/faktory-formirovaniya-mnogoletnikh-i-mezhgodovykh-izmenenii-urovnya-ozera-chad
- 2. *Белевич Е.Ф.* О происхождении бугров Бэра // Геоморфология. 1979. № 2. С. 57—68.
- 3. Викторов А.С., Орлов Т.В., Садков С.А., Трапезникова О.Н. Использование подходов математической морфологии ландшафта при дистанционной оценке природных опасностей // Геоэкология. 2019. № 5. С. 61—73.

- 4. *Викторов А.С.* Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.
- Гоников Т.В., Викторов А.С. Модель морфологической структуры грядовых эоловых ландшафтов, сформировавшихся на основе барханных цепей // Геоэкология. 2020. № 5. С. 32—39.
- Жиндарев ЈІ.А., Никифоров Г.И., Рычагов Л.Г. Морфолитодинамика береговой зоны приустьевых областей и проблема происхождения бэровских бугров // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2001. № 1. С. 44—52.
- 7. Климанова О.А., Царева О.В. Изменение природных комплексов в котловине озера Чад в 1987—2007 гг. в условиях глобальных климатических изменений // Проблемы региональной экологии. 2014. Т. 3. С. 79—84.
- 8. *Королюк В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В., Турбин А.Ф.* Справочник по теории вероятностей и матстатистике. М.: Наука, 1985. 640 с.
- 9. Нижняя Волга: геоморфология, палеогеография и русловая морфодинамика / Под ред. Г.И. Рычагова и В.Н. Коротаева. М.: ГЕОС, 2002. 242 с.
- 10. *Пузаченко Ю.Г.* Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: Изд. центр "Академия", 2004. 416 с.
- 11. *Рычагов Г.И*. Новые данные о генезисе и возрасте бэровских бугров // Вестник Московского университета. Сер. 5: География. 2009. № 5.
- 12. *Рычагов Г.И.* Плейстоценовая история Каспийского моря. М.: Изд-во МГУ, 1997. 268 с.
- 13. *Свиточ А.А.* Большой Каспий: строение и история развития. М.: Изд-во МГУ, 2014. 272 с.
- 14. *Свиточ А.А., Клювиткина Т.С.* Бэровские бугры Нижнего Поволжья. М.: Типография Россельхозакадемии, 2006. 160 с.
- 15. *Badyukova E.N.* Genesis of the baery knolls developed in the northern caspian plain // Quaternary International. 2018. V. 465. № A. P. 11–21.
- Durand A. Oscillations of Lake Chad Over The Past 50,000 Years: New Data and New Hypothesis // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 39 (1982): 37–53.
- 17. *Grove A.T.* The Ancient Erg of Hausaland, and Similar Formations on the South Side of the Sahara // The Geographical Journal. 1958. V. 124. № 4. P. 528–533.
- Lake Chad: ecology and productivity of a shallow tropical ecosystem. Carmouze J.P., Durant J.R., Lévêque C. (eds.). Springer Science & Business Media, 2012. 576 p.
- 19. *Tabelinova A.S.* Geoecological zoning of the Northeastern Caspian// Arid Ecosystems. 2020. V. 26. № 3. P. 211–218.

GEOECOLOGICAL LANDSCAPE PATTERN COMPARISON OF RIDGE LANDSCAPES IN ARID LAKE BASINS

T. V. Gonikov^{a,b,#}

^a Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991 Russia
 ^b Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS, Ulanskii per., 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia
 [#]E-mail: gonikov.timur@yandex.ru

The paper presents the results of landscape pattern comparison between Baer mounds in the Northern Caspian region and Lake Chad dune islands. Using the methods of mathematical landscape morphology, a similarity was established in the structure of indicated landscape patterns expressed in the lognormal distribution of ridge diameters and the Poisson distribution of specific points. Four sections of the Baer mounds distribution and two sections of Lake Chad were analyzed. The necessity for a comprehensive comparative analysis is pointed out, taking into account the structural similarity of landscape pattern and a number of physical and geographical patterns. The foundations have been laid for solving a number of geoecological engineering problems in ridge coastal landscapes.

Keywords: Baer mounds, ridge landforms, landscape pattern, mathematical morphology of landscape, Caspian lowland, Lake Chad

REFERENCES

- 1. Abossolo, S.E. Faktory formirovaniya mnogoletnikh i mezhgodovykh izmenenii urovnya ozera Chad [Factors of the formation of long-term and interannual changes in the water level of Lake Chad]. Extended abstract Cand.Sci. (Geogr.) Dissertation, St.Petersburg, RGGMU, 1996. (in Russian)
- 2. Belevich, E.F. *O proiskhozhdenii bugrov Bera*, [On the origin of the Baer]. *Geomorfologiya*. 1979, no. 2, pp. 57–68. (in Russian)
- 3. Viktorov, A.S., Orlov, T.V., Sadkov, S.A., Trapeznikova, O.N. *Ispol'zovanie podkhodov matematicheskoi morfologii landshafta pri distantsionnoi otsenke prirodnykh opasnostei* [Remote assessment of natural hazards on the base of the mathematical morphology of landscape]. *Geoekologiya*, 2019, no. 5, pp. 61–73. (in Russian)
- 4. Viktorov, A.S. *Osnovnye problemy matematicheskoi morfologii landshafta* [The main issues of the mathematical morphology of landscape]. *Moscow, Nauka*, 2006, 252 p. (in Russian)
- 5. Gonikov, T.V., Viktorov, A.S. *Model' morfologicheskoi struktury gryadovykh eolovykh landshaftov, sformirovav-shikhsya na osnove barkhannykh tsepei* [The model of morphological structure of aeolian ridge landscapes formed by barchan chains]. *Geoekologiya*, 2020, no. 5, pp. 32–39. (in Russian)
- 6. Zhindarev, L.A., Nikiforov, G.I., Rychagov L.G. Morfolitodinamika beregovoi zony priust'evykh oblastei i problema proiskhozhdeniya berovskikh bugrov [Morpholitodynamics of the coastal zone of estuarine areas and the problem of the origin of the Baer hummocks]. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya, 2001, no. 1, pp. 44–52. (in Russian)
- Klimanova, O.A., Tsareva, O.V. Izmenenie prirodnykh kompleksov v kotlovine ozera Chad v 1987–2007 gg. v usloviyakh global'nykh klimaticheskikh izmenenii [Changes in natural complexes in the Lake Chad basin in 1987-2007 in the context of global climate changes]. Problemy regional'noi ekologii. 2014, vol. 3, pp. 79–84. (in Russian)
- 8. Korolyuk, V.S., Portenko, N.I., Skorokhod, A.V., Turbin, A.F. *Spravochnik po teorii veroyatnostei i mat-*

- statistike [Handbook on probability theory and statistics]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 640 p. (in Russian)
- 9. Nizhnyaya Volga: geomorfologiya, paleogeografiya i ruslovaya morfodinamika [The Lower Volga River area: geomorphology, paleogeography and channel morpholithodynamics]. G.I. Rychagov and V.N. Korotaev, Eds., Moscow, GEOS, 2002, 242 p. (in Russian)
- Puzachenko, Yu.G. Matematicheskie metody v ekologicheskikh i geograficheskikh issledovaniyakh [Mathematical methods in geographic and ecological research]. Moscow, Akademiya Publ., 2004, 416 p. (in Russian)
- 11. Rychagov, G.I. *Novye dannye o genezise i vozraste berovskikh bugrov* [New data on the genesis and age of the Baer hillocks]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya.* 2009, no. 5, pp. 59–68. (in Russian)
- 12. Rychagov, G.I. *Pleistotsenovaya istoriya Kaspiiskogo morya* [Pleistocene history of the Caspain Sea]. Moscow, MGU Publ., 1997, 268 p. (in Russian)
- 13. Svitoch, A.A. *Bol'shoi Kaspii: stroenie i istoriya razvitiya* [The Greater Caspian region: structure and history]. Moscow, MGU Publ., 2014, 272 p. (in Russian)
- 14. Svitoch, A.A., Klyuvitkina, T.S. *Berovskie bugry Nizhnego Povolzh'ya* [Baer mounds of the Lower Volga region]. Moscow, Rossel'khozakademiya Publ., 2006. 160 p. (in Russian)
- 15. Badyukova, E.N. Genesis of the Baer knolls developed in the Northern Caspian Plain. *Quaternary International*, 2018, vol. 465, no. A. pp. 11–21.
- Durand, A., Oscillations of Lake Chad over the Past 50,000 Years: New Data And New Hypothesis. *Palaeo-geography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1982, no. 39, pp. 37–53.
- 17. Grove, A.T. The ancient erg of hausaland, and similar formations on the south side of the Sahara. *The Geographical Journal*, 1958, vol. 124, no. 4, pp. 528–533.
- 18. Lake Chad: ecology and productivity of a shallow tropical ecosystem. Carmouze J.P., Durant J.R., Lévêque C., Eds. Springer Science & Business Media, 2012, 576 p.
- 19. Tabelinova, A.S. Geoecological zoning of the Northeastern Caspian. *Arid Ecosystems*, 2020, vol. 26, no. 3. pp. 211–218.

_____ ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ _____ ПРОЦЕССЫ

УЛК 550.3

ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ ПОЧВЕННОГО РАДОНА И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ВАРИАЦИИ В СКВАЖИНЕ ВО ВРЕМЯ ПРОЦЕССА ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

© 2021 г. И. А. Козлова^{1,*}, С. В. Бирюлин^{1,**}, А. К. Юрков^{1,***}, Д. Ю. Демежко^{1,****}

¹ Институт геофизики УрО РАН, ул. Амундсена, д. 100, Екатеринбург, 620016 Россия *E-mail: ikozlova 75@mail.ru **E-mail: serrega 2009@gmail.com ***E-mail: akyurkov@mail.ru ****E-mail: ddem 54@inbox.ru Поступила в редакцию 12.07.2021 г. После доработки 12.09.2021 г. Принята к публикации 25.09.2021 г.

Землетрясения — это явления, представляющие опасность для человека, инженерных сооружений и инфраструктуры. Возможность прогноза землетрясений подвергается сомнению, но это не останавливает исследования, проводимые в этом направлении. К наиболее физически обоснованным вероятным предвестникам землетрясений относятся изменения объемной активности радона и изменение температуры жидкости в скважинах, обусловленных изменением напряженно-деформированного состояния горных пород. На Южно-Курильском геофизическом стационаре ИМГГ ДВО РАН (о. Кунашир) в 2011—2018 гг. выполнялся мониторинг объемной активности почвенного радона (ОАР) и температурные измерения в скважине Кun-1. Выполнен анализ полученных данных и их сопоставление с землетрясениями, произошедшими за соответствующий период, с целью поиска закономерностей. За основу взята модель И.П. Добровольского, позволяющая оценивать радиус проявления предвестников явлений. Согласно модели, предвестник может проявиться в точке наблюдений, если отношение магнитуды землетрясения к расстоянию до эпицентра (в км) больше или равно 2.5. Показано успешное применение разработанных методик наблюдения и интерпретации радоновых и температурных аномалий, которое в перспективе позволит повысить вероятность успешного прогноза землетрясений в комплексе с другими методами.

Ключевые слова: землетрясение, краткосрочный прогноз, почвенный радон, радоновый мониторинг, температура, температурный мониторинг, магнитуда, Курильские острова

DOI: 10.31857/S0869780921060059

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение безопасной жизнедеятельности населения представляет собой одну из самых важных задач геоэкологии. Из всего многообразия вопросов, относящихся к этой проблеме, отдельно можно выделить природные катастрофические явления. Число жертв стихийных природных явлений и экономический ущерб от них во всем мире неуклонно растут.

Одно из первых мест в списке опасных природных явлений занимают землетрясения и их последствия — цунами, оползни. Например — катастрофическое землетрясение в марте 2011 г. в Японии. Возникшая после него волна цунами разрушила атомную электростанцию в Фукусиме и погубила около 16 тыс. человек. Отсутствие надежных методов прогноза, неоднозначность ин-

терпретации существующих, традиционных методов мониторинга подрывают доверие к ним со стороны населения и лиц, принимающих решения.

Среди примерно 200 возможных предвестников землетрясений следует отметить несколько наиболее физически обоснованных. Это предвестники, связанные с изменением проницаемости и объема деформируемого порового пространства. Изменение проницаемости горных пород влияет на поток почвенных газов, стремящийся к поверхности. Наиболее чувствительным индикатором изменений такого потока являются вариации объемной активности почвенного радона (OAP). В ряде случаев удавалось делать успешный прогноз при наблюдениях за вариациями OAP [13, 16].

Учитывая, что поровое пространство верхней части геологического разреза почти повсеместно

заполнено практически несжимаемой жидкостью водой, то в результате изменения объема порового пространства изменяется внутрипоровое давление, и возникают компенсационные перетоки. Компенсационные перетоки могут вызвать в скважине изменения уровня столба жидкости. На этом эффекте основан широко распространенный в мире гидрогеодинамический способ прогноза землетрясений. Данный способ также имеет положительные примеры при прогнозировании процесса подготовки землетрясений. Но отмечаются случаи, когда землетрясения не сопровождаются изменениями уровня воды в скважине. Причинами, кроме отсутствия гидравлической связи скважины с деформируемым объемом горных пород, может быть наличие в разрезе нескольких водоносных горизонтов. В этом случае, возникающее в одном из них избыточное давление жидкости может компенсироваться ее перетоком в другой горизонт, и уровень столба жидкости может не измениться. Для расширения возможностей гидрогеодинамического способа прогноза процесса подготовки землетрясений в ИГФ УрО РАН разработана методика измерения движения жидкости по стволу скважины с помощью стационарно установленного скважинного термометра.

Цель данной работы заключалась в поиске закономерных связей наблюдаемых вариаций почвенного радона и температуры в скважинах с процессом подготовки произошедших сейсмических событий.

Район исследования — острова Южной группы Большой Курильской гряды. На Южно-Курильском геофизическом стационаре Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (о. Кунашир) был организован мониторинг объемной активности почвенного радона (ОАР) и температурные измерения в скважине Кun-1. Анализировались результаты мониторинговых наблюдений за 2011—2018 гг.

Большой объем исследований по изучению прогностических возможностей измерения уровня столба жидкости по скважинам был выполнен в Южно-Курильском регионе [8]. Если для уровня столба жидкости и температуры по скважинам рядом авторов [4, 7] были исследованы закономерности их изменения в зависимости от расстояния и магнитуды события, то для радона сравнительно мало работ, в которых детально исследовалось его поведение. К настоящему времени нет определенной ясности относительно времени возникновения аномалии ОАР перед тектоническим событием. Имеющиеся опубликованные данные по времени проявления аномалии радона перед событием и продолжительности аномалии довольно противоречивы и не дают ответа на вопрос — к какой категории предвестников относятся аномалии радона?

Булашевич и др. в 1990—1993 гг. проводили исследования на Северо-Уральском бокситовом руднике (рис. 1) [1]. Удалось установить, что перед горными ударами в наблюдательных скважинах происходили изменения концентрации радона, связанные с изменением напряженного состояния горных пород. При этом существуют различия в изменениях ОАР в ближней и дальней (в масштабах размеров блоков, вовлеченных в подготовку горного удара) зонах (см. рис. 1). Событие дальней зоны возникает на экстремуме или на спаде аномалии. События ближней зоны происходят после окончания аномалии, на фоновых значениях кривой ОАР. Анализ полученных результатов позволил авторам высказать предположение о накоплении упругой энергии за счет деформации изгиба (или кручения) массива горных пород [1]. При изгибных деформациях возникают зоны сжатия, растяжения и переходная зона, в которой отсутствуют деформации сжатия и растяжения. Следствием наличия зон сжатия и растяжения является изменение объема порового пространства и проницаемости горных пород. Наличие таких зон объясняет различную форму аномалий ОАР, в том числе и отсутствие в ряде случаев каких-либо изменений перед тектоническими событиями [12]. Возникновение радоновых аномалий перед землетрясением происходит в большом временном диапазоне, начиная от первых суток до нескольких месяцев [13, 15]. В литературе практически не встречаются примеры длительного мониторинга ОАР в сейсмически активном районе. Семилетний Калифорнийский эксперимент [14] не полностью выполнил свою задачу по ряду причин.

Для установления вероятных закономерностей отражения подготовки сейсмических событий в кривых ОАР был выполнен анализ результатов длительных мониторинговых наблюдений, полученных нами в 2011–2018 гг. на о. Кунашир. Измерения объемной активности радона проводились в адвективном режиме (почвенный воздух с глубины 70 см принудительно доставлялся к детектору с помощью насоса). Для анализа брались сейсмические события с магнитудой больше 4 в радиусе 500 км от станции мониторинга в Южно-Курильске. Радиус был выбран на основе расчетов И.П. Добровольского [5] с учетом того, что максимальная магнитуда землетрясений, произошедших за это время в исследуемом районе не превышала 7. Экспериментальное подтверждение соотношения, полученного И.П. Добровольским, приведено в работах по изучению: изменений уровня воды в скважинах Центральной Японии [15], радоновых вариаций в Индии [9], на Камчатке [10], в Курило-Камчатском регионе [11], вариаций температуры в скважине на о. Кунашир [4].

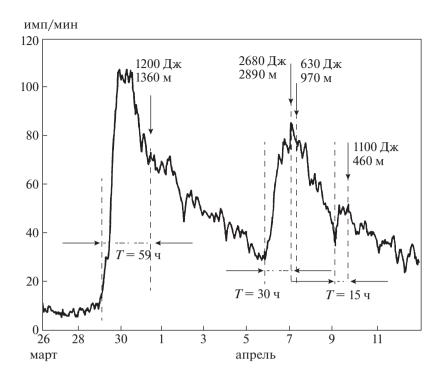


Рис. 1. Поведение объемной активности радона при подготовке горных ударов в шахте Северо-Уральского бокситового рудника [1]. Объемная активность радона приведена в относительных единицах имп/мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве аномалии на кривой ОАР рассматривался участок, на котором не менее трех значений ОАР (при измерениях каждые 4 ч) как минимум в два раза превышали фоновый уровень перед началом повышения объемной активности радона. Фоновый уровень ОАР определялся перед каждой выделяемой аномалией.

Главной проблемой при интерпретации кривых ОАР является определение аномалий, связанных с готовящимся тектоническим событием. Аномалии могут быть связаны с событиями малой магнитуды, не включенными в регистрационный каталог сейсмических событий. Кроме того, некоторые события, следующие друг за другом, также могут отражаться незначительными аномалиями [6]. Была разработана методика сопоставления радоновых аномалий и землетрясений. Было установлено, что для правильной интерпретации зафиксированных аномалий необходимо учитывать их положение относительно ближней и дальней зоны. Наиболее важным представляется выявление аномалий, связанных с событиями ближней зоны, представляющими наибольшую опасность. В случае появления аномалии ОАР и следующего за этой аномалией землетрясения, необходимо по сейсмологическим данным оценить расстояние до произошедшего землетрясения по отношению к ближней и дальней зонам. В случае отнесения произошедшего события к дальней зоне опасность, связанная с возникновением землетрясения в ближней зоне, уменьшается. Таким образом для правильной интерпретации аномалий ОАР необходимо учитывать сейсмологические данные.

Рассмотрим конкретный пример применения разработанной методики. На рис. 2 приведены две ярко выраженные радоновые аномалии и четыре последующих события.

Xарактеристики событий — $K = M/\lg R$ и R, где M — магнитуда землетрясения, R — расстояние от эпицентра до станции мониторинга в км. Для первого события K = 2.43, R = 353 км, для второго K = 2.31, R = 109, для третьего K = 2.28, R = 86, для четвертого K = 2.63, $\hat{R} = 80$. Первое из событий произошло гораздо дальше трех остальных относительно станции мониторинга. Значительное повышение ОАР наблюдалось 18.11.11, затем проявился экстремум аномалии 19.11.11, к фоновым значениям вернулась ОАР 22.11.11. Для данной аномалии характерен достаточно широкий "коридор" повышенных (относительно фоновых) значений ОАР. С 16.11.11 по 22.11.11 землетрясений с К ≥2 не происходило. Позже наблюдалась еще одна аномалия почвенного радона с экстремальным значением 23.11.11 (см. рис. 2, выделена синим цветом), 24.11.11 зафиксировано далекое землетрясение. В последствие уже при фоновых значениях ОАР зафиксировано три ближних землетрясения, процесс подготовки которых отра-

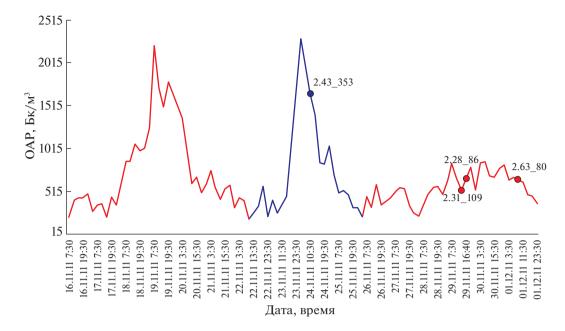


Рис. 2. Значения объемной активности радона (OAP) и землетрясения (показаны точками). Подписи точек: первое число — отношение магнитуды землетрясения к логарифму расстояния (в км) от эпицентра до станции мониторинга; второе число — расстояние от эпицентра до станции мониторинга.

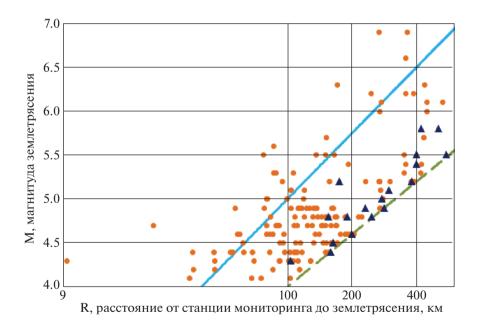


Рис. 3. Тектонические землетрясения в поле значений OAP. Точками обозначены события, отразившиеся в кривых аномалий OAP. Треугольниками обозначены события, которые не отразились изменениями OAP. Голубая прямая линия соответствует соотношению K = 2.5; зеленая пунктирная линия соотношения соотношения соотношения соотношения соотношения соотношения соотношения соотно

зился на предыдущей продолжительной аномалии (см. рис. 2, выделена красным цветом). Так проводилось выделение аномалий объемной активности радона и их сопоставление с зафиксированными землетрясениями на всем исследуемом временном интервале. При использовании

 $K \ge 2.5$ не учитывается большое количество произошедших сейсмических событий, хотя им предшествуют аномалии ОАР. Количество событий с $K \ge 2.5$ составило только 36. Исходя из этого были рассмотрены события с соотношением $K \ge 2$ (рис. 3).

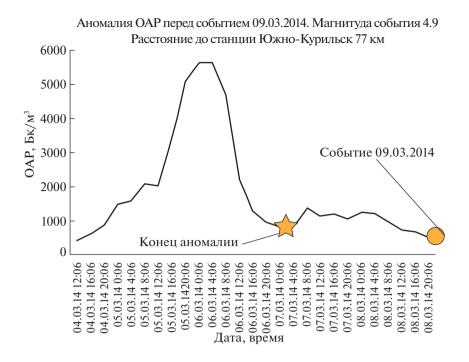


Рис. 4. Характерные точки для разделения событий на зоны проявления: ближнюю и дальнюю.

Общее количество землетрясений за рассмотренный период с К ≥ 2 составило 166, при этом радоновые аномалии Rn (89%) предшествовали 148-ми из них. Для получения статистически более обоснованных результатов во внимание брались все наблюдаемые аномалии ОАР, связанные со всеми проанализированными землетрясениями с $K \ge 2$. Удалось определить положение землетрясений относительно экстремума предшествующих аномальных значений ОАЗ на временном интервале. Каждое землетрясение из рассмотренных с $K \ge 2$, которому предшествовала радоновая аномалия, произошло уже после экстремума аномалии, либо совпало с ним по времени, т.е. регистрацию аномалий ОАР можно рассматривать в качестве краткосрочного прогностического критерия проявления тектонических землетрясений после прохождения ее экстремума.

Исходя из того, что угрозу несут в основном землетрясения ближней зоны, одной из приоритетных задач является разделение тектонических событий по зонам возникновения. Для решения данной задачи необходимо рассматривать два параметра: время проявления землетрясения и время окончания предшествующей радоновой аномалии (рис. 4).

На рис. 5 приведено распределение землетрясений от времени окончания аномалии. За точку начала отсчета по оси абсцисс взят момент окончания аномалии.

Отрицательные значения соответствуют землетрясению, произошедшему во временном ин-

тервале между экстремумом и окончанием аномалии. Положительные значения соответствуют событию во временном интервале после окончания аномалии и выходу на фоновые значения. Для событий, проявившихся после окончания аномалии, расстояние до станции мониторинга в пределах 130 км. А для землетрясений, проявившихся в интервале между экстремумом и окончанием аномалии ОАР, расстояние превышает 180 км.

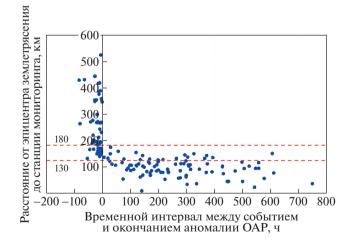


Рис. 5. Зависимость расстояния между станцией мониторинга и событием от времени между окончанием аномалии радона и землетрясением для $M/lgR \ge 2$.

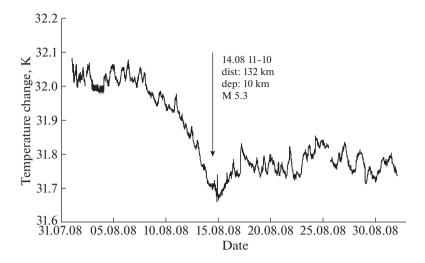


Рис. 6. Вариации температуры на глубине 240 м в скважине Кun-1 [2].

Таким образом, можно считать, что радиус ближней зоны находится в пределах 130 км для геодинамических условий Южно-Курильского региона. Интервал 130—180 км относится к промежуточной зоне, т.е. зоне между сжатием и растяжением, по аналогии с горными ударами [11]. Дальняя зона начинается с расстояний более 180 км.

Исходя из статистического анализа зарегистрированных событий, время задержки события ближней зоны относительно экстремума зафиксированной аномалии ОАР не превышает 28 сут. Указанная задержка времени реализации события после экстремума кривой ОАР может объясняться разным временем накопления упругих напряжений.

Изменение объема порового пространства при вариациях напряженно-деформированного состояния также инициирует движения жидкости по стволу скважины или межпластовые перетоки в заколонном пространстве. В условиях положительного вертикального температурного градиента такие движения отражаются изменениями температуры на заданной глубине [4].

На рис. 6 приведен пример приблизительно недельного снижения температуры на глубине 240 м перед землетрясением с M=5.3, произошедшим в 132 км (K=2.5) от станции мониторинга (скважина Kun-1, о. Кунашир) [2].

Снижение температуры свидетельствует о нисходящем потоке жидкости по заколонному пространству и деформации растяжения. Реализация землетрясения привела к смене растяжения на сжатие и частичному восстановлению температур. В других случаях происходило полное восстановление. Так, при подготовке катастрофического землетрясения Тохоку (11.03.2011, М = 9.0,

R = 700 км, K = 3.2) снижение температуры в скважине Kun-1 происходило минимум полгода, а восстановление — в течение двух суток [2, 3]. Анализ большой выборки данных температурного мониторинга подтвердил устойчивую косейсмическую температурную реакцию в скважине Kun-1 на события с $K \ge 2.5$. Однако далеко не всегда они предварялись закономерными предсейсмическими изменениями [2].

Рассмотрим подробно отражение процесса подготовки событий в вариациях ОАР (рис. 7а) и температуры (рис. 7б) с 16 января по 24 февраля 2013 г. На рис. 7а показаны 4 аномалии ОАР, выделенные по разработанной методике. Аномалия № 1 связана с подготовкой события 23.01.2013 г. На это указывают K = 2.62 и R = 106 км (ближняя зона). В температурных изменениях подготовка данного землетрясения не отразилась. Аномалия № 2 связана с землетрясением 29.01.2013 г. с К = = 2.05 и R = 219 км (дальняя зона). В температурных вариациях она также не отразилась. Аномалия ОАР № 3 соответствует событию 02.02.2013 г. с K = 2.85 и R = 264 км, отразившемуся на спаде аномалии ОАР, что характерно для дальней зоны. В вариациях температуры данное событие отразилось снижением температуры на двух горизонтах. Это соответствует полученной закономерности отражения событий с К ≥ 2.5 в температурных кривых. Следующая аномалия № 4 связана с событием 16.02.2013 г. с K = 2.74 и R = 86 км. Оно отразилось после выхода аномалии ОАР на фоновые значения (ближняя зона). Повышение величины ОАР 14.02.2013 г. и 20.02.2013 г. не попадают под критерий выделения аномалий и не рассматриваются.

Таким образом проведенный сопоставительный анализ отражения процесса подготовки землетрясений в кривых OAP и температурных ва-

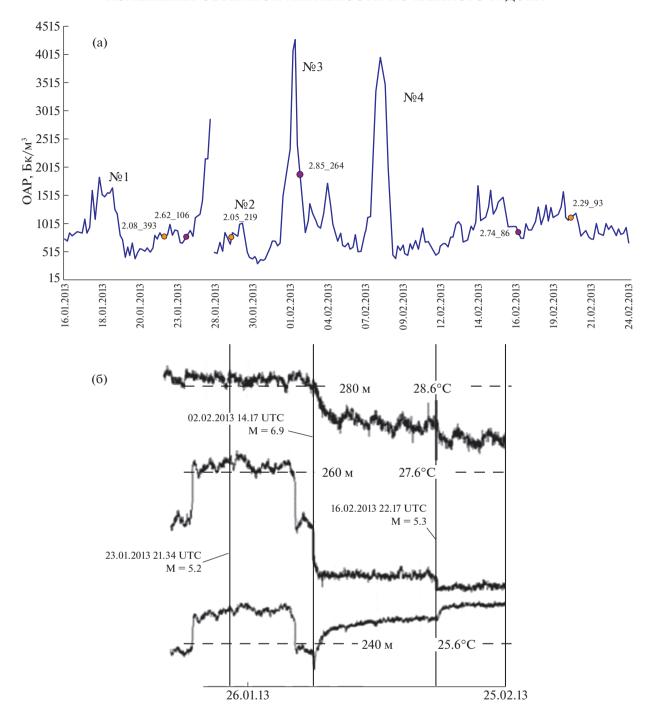


Рис. 7. Наблюдаемые значения объемной активности радона (OAP) и произошедшие землетрясения (показаны точками с величиной критерия (K) и расстояния (R)) (a). Вариации температуры на глубине 240 м в скважине Kun-1, январь-февраль 2013 г. [3] (б).

риациях показал, что изменения этих величины могут быть связаны с изменением напряженнодеформированного состояния горных пород. В вариациях ОАР отражаются события с меньшим K ($K \ge 2$) по сравнению с температурными изменениями, которые вызываются событиями с $K \ge 2.5$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение аномалий почвенного радона и вариаций температуры как вероятных предвестников землетрясений, представляет особый интерес, так как они, как показали результаты мониторинговых наблюдений, вызываются изменением напряженно-деформированного состояния горных

пород. Применение разработанных методик наблюдения и интерпретации радоновых и температурных аномалий в перспективе позволит повысить вероятность успешного прогноза землетрясений в комплексе с другими методами.

В ходе исследования установлено, что тектонические землетрясения, зафиксированные в радиусе 500 км от станции мониторинга ОАР в Южно-Курильске за период 2011—2018 гг., которым соответствует отношение магнитуды к логарифму расстояния до эпицентра больше или равно 2, отмечаются в аномалиях ОАР. Время возникновения аномалий объемной активности радона перед землетрясениями не превышает 28 сут для ближних событий и 8 сут для дальних. Установленные закономерности проявления землетрясений в кривых ОАР дают основание отнести вариации ОАР к краткосрочным предвестникам, при применении адвективного режима доставки почвенного радона к детектору.

Разработанная методика сопоставления радоновых аномалий с произошедшими тектоническими землетрясениями обеспечивает высокий процент их отражения при выполнении ретроспективного анализа. Отражение близких и далеких тектонических землетрясений на различных участках кривой ОАР позволяют ориентировочно, с учетом сейсмологической обстановки, оценивать расстояние до эпицентра будущего события и рекомендовать принятие необходимых мер по уменьшению негативных последствий от землетрясений. Вариации температурного поля перед землетрясением также можно отнести к краткосрочным предвестникам процесса подготовки землетрясений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Булашевич Ю.П., Уткин В.И., Юрков А.К., Николаев В.Н.* Изменение концентрации радона в связи с горными ударами в глубоких шахтах // Доклады РАН. 1996. Т. 345. № 2. С. 245—248.
- 2. Демежко Д.Ю., Юрков А.К, Уткин В.И., Климшин А.В. О природе температурных вариаций в скважине Kun-1 (о. Кунашир) // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 3. С. 406—414.
- 3. Демежко Д.Ю., Юрков А.К. О причинах квазипериодических температурных колебаний в скважине Kun-1 (о. Кунашир) // Геофизические процессы и биосфера. 2017. Т. 16. № 1. С. 75–86.
- 4. Демежко Д.Ю., Юрков А.К., Уткин В.И., Щапов В.А. Температурные изменения в скважине KUN-1 (о. Кунашир), вызванные землетрясением Тохоку (11.03.2011 г., M = 9.0) // Доклады Академии наук. 2012. Т. 445. № 2. С. 883–887.
- Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ОИФЗ АН СССР, 1991. 217 с.

- Козлова И.А., Юрков А.К. Отражение последовательных сейсмических событий в поле объемной активности радона // Уральский геофизический вестник, 2016. № 1. С. 35—39.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке: 1977—2017 гг. // Вулканология и сейсмология. 2019. № 2. С. 3—20. https://doi.org/10.31857/S0203-0306201923-20
- 8. *Садовский М.А.*, *Монахов Ф.И.*, *Семенов А.Н.* Гидрогеодинамические предвестники Южно-Курильских землетрясений // Докл. АН СССР. 1977. № 236. С. 50–53.
- 9. Пулинец С.А., Давиденко Д.В., Линьков А.Д., Тарасенко Т.Е. Проблема многопараметрического анализа данных прогнозного сейсмомониторинга и пути ее решения. Спутниковым технологиям нет альтернативы // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2012. Т. 12. № 7. С. 57—65.
- 10. *Руленко О.П., Кузьмин Ю.Д.* Увеличение радона и торона в районе Верхне-Паратунской гидротермальной системы Южной Камчатки перед катастрофическим землетрясением в Японии 11 марта 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2015. № 5. С. 36—42.
- 11. Уткин В.И., Юрков А.К. Динамика выделения радона из массива горных пород как краткосрочный предвестник землетрясения // Доклады Академии наук. 1998. Т. 358. № 5. С. 675—680.
- 12. Уткин В.И., Юрков А.К. Прогноз землетрясений. Есть ли выход из тупика? // Пятые научные чтения Ю.П. Булашевича. "Геодинамика. Глубинное строение. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей". Екатеринбург: Ин-т геофизики УрО РАН, 2009. С. 492—499.
- 13. Giuliani G.G., Giuliani R., Totani G., Eusani G., Totani F. Radon observations by gamma detectors PM-4 and PM-2 during the seismic period (January-April 2009) in L'Aquila Basin // Abstr. AGU Fall Meeting, December 14–18, 2009. San-Francisco, 2009. V. 1. P. 3.
- 14. *King C. Y. King B. S., Evans W. S., Zhang W.* Spatial radon anomalies on active faults in California // Applied Geochemistry. 1996. V. 11. P. 497–510.
- King C.Y., Azuma S., Igarashi G., Ohno M., Saito H., Wakita H. Earthquake-related water-level changes at 16 closely clustered wells in Tono, central Japan // Journal of Geophysical Research. 1999. V. 104. B6. P. 13073–13082.
- 16. *Oh Y., Kim G.* A radon-thoron isotope pair as a reliable earthquake precursor // Sci. Rep. 2015. № 5. 13084. https://doi.org/10.1038/srep13084

VOLUME RADON ACTIVITY CHANGES AND THERMAL VARIATIONS IN THE WELL DURING EARTHQUAKE PREPARATION

I. A. Kozlova^{a,#}, S. V. Biryulin^{a,##}, A. K. Yurkov^{a,###}, and D. Yu. Demezhko^{a,####}

^a Institute of Geophysics, Ural Branch of RAS, ul. Amundsena 100, Yekaterinburg, 620016 Russia [#]E-mail: ikozlova75@mail.ru

##E-mail: serrega2009@gmail.com ###E-mail: akyurkov@mail.ru ###E-mail: ddem54@inbox.ru

Earthquakes are the phenomena that pose a danger to humans, engineering structures and infrastructure. The possibility of predicting earthquakes is doubted, but this does not stop the research conducted in this direction. The most physically justified probable precursors of earthquakes include changes in the volume radon activity and in temperature in well liquid caused by changes in the stress-strain state of rocks. From 2011 to 2018, the monitoring of radon volume activity (VRA) and temperature measurements in the Kun-1 well were carried out at the Yuzhno-Kurilsk (Kunashir Island) geophysical station of the IMGG FEB RAS. To find regularities, the data obtained were analyzed and compared with the earthquakes that occurred during the corresponding period. The Dobrovolsky model is taken as a basis, which allows us to estimate the radius of phenomena precursor manifestation. According to the model, the precursor appears before an earthquake with a ratio of magnitude to the logarithm of the distance from the event — K to the monitoring station greater than or equal to 2.5. The paper shows the successful application of the developed methods for observing and interpreting radon and temperature anomalies, which in combination with other methods will increase the probability of successful earthquake prediction in the future. It is shown that VRA anomalies can be caused by earthquakes with $K \ge 2$.

Keywords: earthquake, short-term forecast, soil radon, radon monitoring, temperature, temperature monitoring, magnitude, Kuril Islands

REFERENCES

- 1. Bulashevich, Yu.P. Utkin, V.I., Yurkov, A.K., Nikolaev, V.N. *Izmenenie kontsentratsii radona v svyazi s gornymi udarami v glubokikh shakhtakh* [Radon concentration changes and mining impacts in deep mines]. *Doklady RAN*, 1996, vol. 345, no. 2, pp. 245–248. (in Russian)
- 2. Demezhko, D.Yu., Yurkov, A.K., Utkin, V.I., Klimshin, A.V. *O prirode temperaturnykh variatsii v skvazhine Kun-1 (o. Kunashir)* [On the nature of temperature variations in Kun-1 borehole (Kunashir Island)]. *Russian Geology and Geophysics*, 2012, vol. 53, issue 3, pp. 406–414. DOI: 10.1016/j.rgg.2012.02.008. (in Russian)
- 3. Demezhko, D.Yu., Yurkov, A.K. On the origin of quasi-periodic temperature variations in Kun-1 well (Kunashir Island). *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2017, vol. 53, no. 8, pp. 804–812.
- 4. Demezhko, D.Yu., Yurkov, A.K., Utkin, V.I., Shchapov, V.A. *Temperaturnye izmeneniya v skvazhine KUN-1 (o. Kunashir), vyzvannye zemletryaseniem Tohoku (11.03.2011 g., M = 9.0)* [Temperature changes in the KUN-1 borehole, Kunashir island, induced by the Tohoku earthquake (March 11, 2011, m = 9.0)] *Doklady Akademii Nauk*, 2012, vol. 445, no. 2, pp. 883–887. (in Russian)
- 5. Dobrovol'skii, I.P. *Teoriya podgotovki tektonicheskogo zemletryaseniya* [Theory of tectonic earthquake prepa-

- ration]. Moscow, OIFZ AN SSSR, 1991, 217 p. (in Russian)
- 6. Kozlova, I.A., Yurkov, A.K. *Otrazhenie posledovatel'nykh seismicheskikh sobytii v pole ob'emnoi aktivnosti radona* [Reflection consecutive seismic events in the field of radon volume activity]. *Ural'skii geofizicheskii vestnik*, 2016, no. 1, pp. 35–39. (in Russian)
- 7. Kopylova, G.N., Boldina, S.V. *Gidrogeoseismologicheskie issledovaniya na Kamchatke: 1977—2017 gg.* [Hydrogeoseismological research on Kamchatka in 1977—2017 year: history and results]. *Vulkanologiya i seismologiya*, 2019, no. 2, pp. 3—20. https://doi.org/10.31857/S0203-0306201923-20. (in Russian)
- 8. Sadovskii, M.A., Monakhov, F.I., Semenov, A.N. *Gidrogeodinamicheskie predvestniki Yuzhno-Kuril'skikh zemletryasenii* [Hydrogeodynamic precursors of the South Kuril earthquakes]. *Dokl. AN SSSR*, 1977, no. 236, pp. 50–53. (in Russian)
- 9. Pulinec, S.A., Davidenko, D.V., Lin'kov, A.D., Tarasenko, T.E. *Problema mnogoparametricheskogo analiza dannykh prognoznogo seismomonitoringa i puti ee resheniya. Sputnikovym tekhnologiyam net al'ternativy* [The multiparametric analysis problem of predictive seismic monitoring data and ways to solve it. There is no alternative to satellite technologies]. *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya*, 2012, pp. 57–65. (in Russian)

- Rulenko, O.P., Kuz'min, Yu.D. Uvelichenie radona i torona v raione Verkhne-Paratunskoi gidrotermal'noi sistemy Yuzhnoi Kamchatki pered katastroficheskim zemletryaseniem v Yaponii 11 marta 2011 g. [Increased radon
 and thoron in the Verkhne-Paratunka hydrothermal
 system, southern Kamchatka prior to the catastrophic
 Japanese earthquake of March 11, 2011]. Vulkanologiya
 i seismologiya, 2015, no. 5, pp. 36–42.
- 11. Utkin, V.I., Yurkov, A.K. *Dinamika vydeleniya radona iz massiva gornykh porod kak kratkosrochnyi predvestnik zemletryaseniya* [Dynamics of radon release from rock mass as a short-term earthquake precursor]. *Doklady RAN*, 1998, vol. 358, no. 5, pp. 675–680. (in Russian)
- 12. Utkin, V.I., Yurkov A.K. *Prognoz zemletryasenii. Est' li vykhod iz tupika?* [Earthquake forecast. Is there a way out of the impasse?]. *Pyatye nauchnye chteniya Yu.P. Bulashevicha. Geodinamika. Glubinnoe stroenie. Teplovoe pole Zemli. Interpretatsiya geofizicheskikh polei* [The 5th Sci. Conf. named after Yu.P. Bulashevich. Geodynamics, deep structure, thermal field of the Earth. Interpre-

- tation of geophysical fields]. 2009, pp. 492–499. (in Russian)
- 13. Giuliani, G.G., Giuliani, R., Totani, G., Eusani, G., Totani, F. Radon observations by gamma detectors PM-4 and PM-2 during the seismic period (January-April 2009) in L'Aquila Basin. Abstr. AGU Fall Meeting, December 14–18, 2009. San Francisco, 2009. Vol. 1. P. 3.
- 14. King, C. Y. King, B. S., Evans, W. S., Zhang, W. Spatial radon anomalies on active faults in California. *Applied Geochemistry*, 1996, vol. 11, pp. 497–510.
- King, C.Y., Azuma, S., Igarashi, G., Ohno, M., Saito, H., Wakita, H. Earthquake-related water-level changes at 16 closely clustered wells in Tono, Central Japan. *Journal of Geophysical Research*, 1999, vol. 104, B6, pp. 13073–13082.
- Oh, Y., Kim, G. A radon-thoron isotope pair as a reliable earthquake precursor. *Sci. Rep.*, 2015, no. 5, 13084. https://doi.org/10.1038/srep13084.

ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

УЛК 624.131.4

ВЛИЯНИЕ КАПИЛЛЯРНЫХ СИЛ НА ПРОЧНОСТЬ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

© 2021 г. Ф. С. Карпенко^{1,*}, В. Н. Кутергин¹, С. И. Фролов¹, О. В. Сереброва¹

¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер., д. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия *E-mail: kafs08@bk.ru

Поступила в редакцию 07.06.2021 г. После доработки 09.08.2021 г. Принята к публикации 31.08.2021 г.

Капиллярные силы действуют в не полностью водонасыщенных глинистых грунтах и влияют на их прочностные свойства. В работе рассматриваются результаты практических исследований изменения величины капиллярных сжимающих сил в различных разновидностях глинистых грунтов в зависимости от их степени водонасыщения. Проведенные исследования базируются на положениях физико-химической теории прочности. Показано, что величина капиллярных сжимающих сил в глинистых грунтах зависит от их структурного строения, преобладающего типа структурных контактов, количества глинистых частиц и контактов между ними, и закономерно меняется при изменении степени водонасыщения грунта.

Ключевые слова: глинистые грунты, структурные контакты, общие эффективные напряжения, реальные эффективные напряжения, капиллярные мениски, капиллярные сжимающие силы

DOI: 10.31857/S0869780921060023

ВВЕДЕНИЕ

С позиций современной физико-химической теории прочности, глинистые грунты рассматриваются как дисперсные системы. Образование дисперсных глинистых систем происходит в результате взаимодействия частиц глинистых минералов и гидратных пленок вокруг них и формирования контактов между частицами, на которых концентрируются внешние нагрузки, передаваемые на грунт. Силы взаимодействия между частицами, расклинивающее давление гидратных пленок и сжимающие капиллярные силы, проявляющиеся в неводонасыщенных грунтах, суммарно определяют общую эффективную прочность глинистого грунта — напряжение, при достижении которого на контактах происходит разрушение структурных связей между ними.

Силы взаимодействия между минеральными частицами глинистых грунтов и закономерности изменения давления гидратных пленок уже были рассмотрены авторами ранее [2, 4].

Цель настоящей работы — исследование действия капиллярных сил и закономерностей изменения их величины в зависимости от строения и состояния неводонасыщенных глинистых грунтов для общей оценки их прочностных свойств.

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕЙСТВИЯ КАПИЛЛЯРНЫХ СИЛ В СВЯЗНЫХ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТАХ

Современные представления о действии капиллярных сил в грунтах в значительной степени базируются на положениях теории капиллярности П. Лапласа (Pierre-Simon de Laplace) и сформулированном им же законе капиллярного давления. Значительный вклад в развитие представлений о действии капиллярных сил в дисперсных системах внесли исследования А.Н. Фрумкина, П.А. Ребиндера, Б.В. Дерягина и других ученых.

Капиллярные силы действуют в трехфазных системах, в строении которых, наряду с минеральными частицами и водой, участвует воздух. В основе действия капиллярных сил лежит явление смачивания, сущность которого заключается в образовании капиллярных менисков в результате искривления поверхности жидкости и соответствующего изменения ее поверхностного натяжения. При влажности грунтов, близкой к максимальной гигроскопической, мениски формируются на контактах слагающих их частиц, это так называемые мениски углов пор. Увеличение содержания воды в грунтах приводит к ее постепенному подъему по системе капиллярных пор и их заполнению, в результате чего мениски углов пор исчезают, и образование менисков происходит на контакте воды с воздухом по всей площади

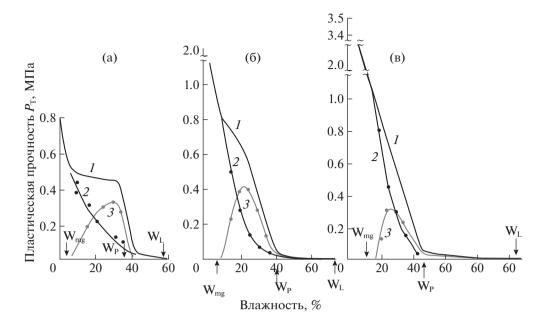


Рис. 1. Зависимость пластической прочности от влажности для каолинита (а), гидрослюды (б) и монтмориллонита (в). Кривые: I – экспериментальная; 2 – расчетная; 3 – изменения капиллярных сил от влажности [6].

капиллярных пор. Действие менисков капиллярных пор передается на минеральный скелет грунта, увеличивая величину напряжений в нем, поэтому оно получило название капиллярных стягивающих сил.

Несмотря на то что, как уже было отмечено выше, капиллярные силы действуют во всех не полностью водонасыщенных грунтах, в практических грунтоведческих исследованиях глинистые грунты со степенью водонасыщения (Sr), превышающей 0.8, обычно рассматриваются как полностью водонасыщенные, считается, что действие капиллярных сил в них отсутствует или незначительно и не оказывает существенного влияния на свойства самих грунтов.

Наиболее полные исслелования влияния капиллярных стягивающих сил на прочность структурных связей глин были проведены В.Н. Соколовым и В.И. Осиповым [8, 9]. Проведенные ими экспериментальные исследования, результаты которых представлены на рис. 1, позволили установить зависимость пластической прочности глин различного состава (Р) от их влажности (кривая 1), охарактеризовать величину капиллярных стягивающих сил (кривая 3), определяемую как разницу экспериментальных значений и расчетных значений ее величины при условии отсутствия капиллярных сил (кривая 2), и таким образом оценить влияние капиллярных сил на пластическую прочность глин. Эти исследования дают общую характеристику действия капиллярных сил в глинах и определить закономерности изменения силы их действия в зависимости от содержания влаги в интервалах влажности от максимальной гигроскопической до значений, превышающих предел пластичности. Полученные ими результаты подтверждают, что капиллярные силы оказывают существенное влияние на пластическую прочность глин, а их величина может достигать значений в 0.29—0.42 МПа.

Приведенные данные позволяют говорить, что действие капиллярных сил вносит свой вклад в общее напряженное состояние глинистых грунтов, следовательно, должно учитываться при определении их прочностных свойств. Характер, величина и закономерности этого действия требуют специального изучения, и в наибольшей степени это относится к не полностью водонасыщенным глинистым грунтам, степень заполнения пор водой в которых превышает 70%. Именно грунты с такими характеристиками внутреннего строения наиболее часто становятся объектом изучения при проведении инженерно-геологических изысканий, и для них эти данные имеют наибольшее практическое значение. Исследования указанных вопросов проводились с позиций физико-химической теории прочности дисперсных грунтов.

СОВРЕМЕННЫЕ НАУЧНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТРОЕНИИ И СВОЙСТВАХ СВЯЗНЫХ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ

В основе современных научных представлений о строении глин лежит рассмотрение их как дисперсных систем, сложенных минеральными

частицами глинистых минералов дисперсной фазы и водой — дисперсионной средой. Эти суждения базируются на фундаментальных положениях теории ДЛФО, двойного электрического слоя (ДЭС), теории контактных взаимодействий П.А. Ребиндера, теории расклинивающего действия гидратных пленок Б.В. Дерягина и обобщающей их физико-химической теории эффективных напряжений в грунтах, разработанной В.И. Осиповым [5], В.И. Осиповым и В.Н. Соколовым [6] применительно к глинистым породам. Генезис глин и формирование их микроструктуры происходят в результате образования структурных связей за счет действия сил притяжения и отталкивания между частицами и взаимодействия с водой в ходе литогенеза.

Прочность структурных элементов глинистых грунтов рассматривалась М.М. Филатовым [10], Е.М. Сергеевым [7], В.Д. Ломтадзе [1]. Проведенные ими опытные исследования показали, что прочность частиц глинистых минералов чрезвычайно высока, и они практически не разрушаются даже под действием огромного давления, превышающего возможные нагрузки от инженерных сооружений, т.е. прочность глинистых систем определяется именно прочностью структурных связей. По природе действующих сил они могут быть физическими, физико-химическими и химическими.

Основную роль в строении и свойствах связных дисперсных грунтов играют физико-химические структурные связи, формирующиеся в результате действия молекулярных, ионно-электростатических сил, расклинивающего действия гидратных пленок и капиллярных сил. В процессе коагуляции и седиментации высокодисперсных систем, таких как слабосцементированные глины и илы, на их формирование оказывают значительное влияние молекулярные силы (называемые также Ван-дер-Ваальсовы). Ионноэлектростатические силы действуют при электростатическом притяжении отрицательно заряженных частиц и расположенных между ними катионов. При сближении минеральных частиц, окруженных ДЭС, происходит перекрытие их диффузных слоев, и возникает электростатическое взаимодействие одноименно заряженных ионов адсорбционных и диффузных слоев.

Действие структурных сил гидратных пленок также проявляется при сближении частиц и перекрытии их ДЭС. При этом происходит поджатие пленок, в результате чего часть воды теряет связь с частицами в зоне их контакта и переходит в свободную фазу. Особая структура воды в зоне перекрытия разрушается, что сопровождается изменением ее энергетического состояния и возникновением отталкивающих сил между частицами. Это явление было открыто и изучалось Б.В. Деря-

гиным и представителями его научной школы, и получило название расклинивающего действия гидратных пленок. Расклинивающее давление возникает в результате суммарного действия сил притяжения и отталкивания между частицами. Его величина зависит от степени перекрытия гидратных пленок взаимодействующих частиц и может быть как положительной, так и отрицательной.

В результате взаимодействия частиц и их гидратных пленок происходит образование структурных контактов между минеральными частицами. Площадки контактов являются зонами, на которых концентрируются напряжения, передаваемые на грунт. В дисперсных глинистых грунтах различаются три типа контактов — дальний коагуляционный, ближний коагуляционный и переходный точечный, которые формируются на определенной стадии литогенеза. Каждый из типов контактов имеет свою предельную прочность, определяемую силой взаимодействия между частицами, реальной эффективной прочностью σ", и расклинивающим действием гидратных пленок $\Pi_{(h)}$. Преобладание того или иного типа контактов в структуре глинистых пород определяет их физико-химическое состояние (соответственно, текучее, пластичное или твердое), строение и свойства.

Величина σ " зависит от общего эффективного напряжения в грунте σ ', представляющего собой разницу общего внешнего напряжения на грунт и величины порового давления в нем, количества и площади контактов, расклинивающего действия гидратных пленок и действия капиллярных сжимающих сил [5, 6]:

$$\sigma'' = (\sigma - U) - \chi \Pi_{(h)} a_c - F,$$

где σ — общее внешнее напряжение; U — поровое давление; χ — число контактов в единице площади; $\Pi_{(h)}$ — расклинивающее давление гидратных пленок; a_c — площадь единичного контакта; F — величина капиллярных сжимающих сил.

Реальная эффективная прочность глинистого грунта (действие молекулярных и ионно-электростатических сил взаимодействия между минеральными частицами) является постоянной величиной, характерной для каждого грунта. Она определяется типом контакта и минеральным составом частиц и остается неизмененной вне зависимости от условий, в которых находится грунт. Величина расклинивающего давления гидратных пленок также зависит от типа контакта и минерального состава частиц, но при этом изменяется в зависимости от температурных условий и напряженного состояния, в которых находится глинистых грунт. Эти данные послужили основой для практического исследования закономерностей действия капиллярных сил в грунтах.

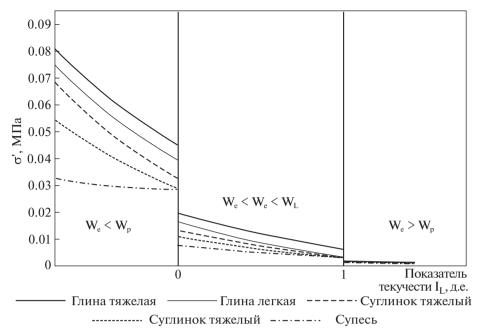


Рис. 2. Зависимость общей эффективной прочности σ' глинистых грунтов от содержания в них влаги [3].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

При исследовании действия капиллярных сил авторами применялась методика определения общих и реальных эффективных напряжений, разработанная и успешно апробированная ранее при выполнении предыдущих работ. Подробно методика и результаты определения на ее основе общих и реальных эффективных напряжений для разновидностей глинистых грунтов описаны авторами в работах [3, 4]. Сущность этой методики заключается в том, что испытания грунтов проводятся в условиях, при которых воздействие внешних нагрузок производится только на сами контакты, и дополнительного расхода энергии на изменение объема испытываемого грунта, его уплотнение, разрушение, разрыв сплошности и т.п. не происходит, а все нагрузки, возникающие в грунте при испытании, равномерно распределяются во всей зоне их действия.

Таким условиям наилучшим образом соответствуют условия испытаний по методу чистого сдвига (скашивания), позволяющего определять величину сдвигающей нагрузки при отсутствии изменения объема грунта. В этом случае не происходит нарушения сплошности грунта и перемещения одной его части относительно другой, а деформация происходит только за счет перемещения частиц дисперсной фазы относительно друг друга при изменении формы образца. Образец грунта естественного сложения или модельного грунта помещается в прибор скашивания; после чего проводится испытание в недренированных условиях с постоянной скоростью деформирования при заданной нормальной нагрузке.

На основе полученных данных расчетным путем определяют общее предельное эффективное напряжение σ' , равное сумме касательного (τ) и нормального (σ_1) напряжений в момент разрушения структурных связей в образце за вычетом порового давления (U). По результатам испытаний рассчитывается реальная эффективная прочность σ'' каждой исследованной разновидности грунта.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Общая эффективная прочность σ' глинистого грунта складывается из суммарной прочности индивидуальных контактов, их реальной эффективной прочности σ'' , величины расклинивающего действия гидратных пленок $\Pi_{(h)}$ и капиллярных стягивающих сил F. Характеристика величины σ' , полученная авторами ранее [3] для полностью водонасыщенных грунтов, в которых капиллярные силы не действуют, показана на рис. 2.

Для оценки действия капиллярных сил F и определения закономерностей его изменений были проведены экспериментальные исследования общей эффективной прочности не полностью водонасыщенных грунтов со степенью водонасыщения Sr > 0.75. Исследования проводились на модельных образцах глинистых грунтов мономинеральных глин сапонитового, монтмориллонитового, каолинитового состава и разновидностей глинистых моренных грунтов Московского региона (gIlms) преимущественно иллитового и, в меньшей степени, каолинитового состава раз-

Таблица 1. Величина сжимающих капиллярных сил в разновидностях глинистых грунтов

Твердые грунты с преобладающим точечным переходным типом контактов ($I_{\rm L} < 0$)
The paper in the content of the month in the perioding in the intention (if (i))

D.		ина сжиг	Среднее реальное эффективное					
Разновидность грунта	0.75	0.80	0.83	0.86	0.90	0.95	0.98	напряжение в единичном объеме грунта, [H]
глина сапонитовая (Sp)	1.176	1.172	1.155	1.120	0.990	0.564	0.260	1.689
глина монтмориллонитовая (Mnt)	1.010	0.985	0.941	0.850	0.639	0.354	0.195	1.504
глина каолиновая (Kl)	0.946	0.928	0.865	0.780	0.583	0.280	0.147	1.273
глина легкая (gIIms)	0.917	0.880	0.820	0.730	0.469		0.077	1.146
суглинок тяжелый (gIIms)	0.841	0.800	0.740	0.640	0.432		0.040	1.022
суглинок легкий (gIIms)	0.693	0.650	0.600	0.520	0.308	0.200	0.034	0.906

Пластичные грунты с преобладающим ближним коагуляционным типом контактов (0< I_L <1)

	Величина сжимающих капиллярных сил в единичном объеме грунта [H], при степени водонасыщения (Sr)							Среднее реальное эффективное	
Разновидность грунта	0.75	0.80	0.83	0.86	0.90	0.95	0.98	напряжение в единичном объеме грунта, [H]	
глина сапонитовая (Sp)	0.256	0.250	0.245	0.232	0.200	0.130	0.060	0.418	
глина монтмориллонитовая (Mnt)	0.230	0.230	0.215	0.200	0.170	0.100	0.050	0.386	
глина каолиновая (Kl)	0.200	0.190	0.180	0.170	0.130	0.080	0.035	0.344	
глина легкая (gIIms)	0.180	0.170	0.158	0.145	0.120	0.070	0.030	0.283	
суглинок тяжелый (gIIms)	0.150	0.140	0.130	0.120	0.100	0.060	0.025	0.221	
суглинок легкий ($g\Pi ms$)	0.120	0.120	0.110	0.100	0.090	0.050	0.020	0.185	

Текучие грунты с преобладающим дальним коагуляционным типом контактов ($I_L > 1$)

		ина сжим	Среднее реальное эффективное					
Разновидность грунта	0.75	0.80	0.83	0.86	0.90	0.95	0.98	напряжение в единичном объеме грунта, [H]
глина сапонитовая (Sp)	0.026	0.026	0.025	0.024	0.018	0.010	0.005	0.088
глина монтмориллонитовая (Mnt)	0.019	0.018	0.017	0.016	0.014	0.008	0.004	0.070
глина каолиновая (Kl)	0.012	0.012	0.011	0.010	0.009	0.007	0.004	0.048
глина легкая (gIIms)	0.010	0.010	0.010	0.009	0.008	0.006	0.003	0.031
суглинок тяжелый (gIIms)	0.009	0.009	0.008	0.008	0.007	0.005	0.003	0.029
суглинок легкий (gIIms)	0.007	0.007	0.006	0.006	0.005	0.004	0.002	0.027

личной консистенции (I_L) и степени водонасыщения, изменявшейся от 75 до 98% в условиях, при которых глинистый грунт в общей практике грунтоведческих исследований рассматривается, как полностью водонасыщенный. Результаты проведенных исследований приведены в табл. 1 и показаны на рис. 3 и 4.

Полученные данные показывают, что капиллярные сжимающие силы действуют во всех не полностью водонасыщенных глинистых грунтах.

Сила их действия зависит не только от степени заполнения порового пространства грунта водой, но также и от преобладающего типа контактов между минеральными частицами грунта и их количества.

Независимо от разновидности, величина капиллярных сжимающих сил в глинистых грунтах зависит от степени заполнения пор водой, т.е. от количества капиллярных менисков (см. рис. 3). Наибольшие значения она имеет при степени водонасыщения грунта Sr=0.75-0.85, по мере уве-

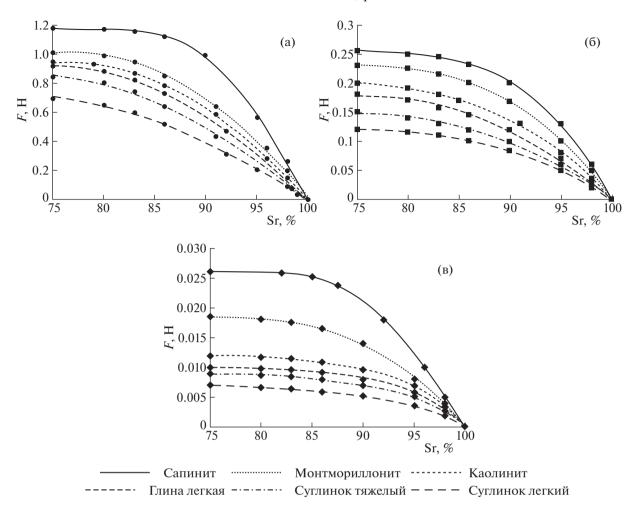


Рис. 3. Зависимость величины капиллярных сжимающих сил F в единичном объеме грунта от степени водонасыщения Sr грунтов: a — твердые грунты; b — пластичные грунты; b — текучие грунты.

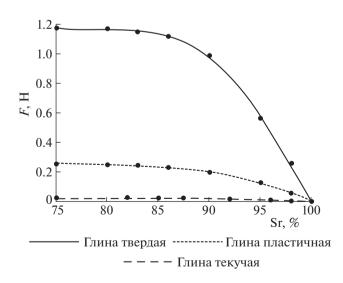


Рис. 4. Зависимость величины капиллярных сжимающих сил F в единичном объеме грунта от физико-химического состояния и степени водонасыщения Sr грунтов.

личения влажности и уменьшения содержания воздуха в порах грунта (Sr = 0.90-0.95) происходит ее снижение, и при полном водонасыщении грунта действие капиллярных сил прекращается.

Величина капиллярных сжимающих сил увеличивается в ряду легкий суглинок — тяжелый суглинок — легкая глина — тяжелая глина, т.е. соответственно увеличению числа глинистых частиц в грунтах и контактов между ними (см. рис. 3). Это показывает, что действие капиллярных сил, как и других нагрузок, передается непосредственно на контакты частиц глинистых грунтов, тем самым оказывая влияние на их общую эффективную прочность.

Преобладающий тип контактов в глинистых грунтах определяет их структурное строение и физико-химическое состояние, характеризуемое показателем текучести I_L [3]. Каждый тип контактов имеет свою прочность, резко уменьшающуюся при переходе от точечных переходных (твердые грунты) к ближним (пластичные грунты) и

дальним коагуляционным (текучие грунты) контактам. Аналогичным образом происходит и изменение величины капиллярных сжимающих сил, резко снижающейся при переходе от преобладающего точечного переходного типа контактов к ближнему и дальнему коагуляционному (см. рис. 4).

Оценку степени влияния капиллярных сжимающих сил на прочностные свойства глинистых грунтов может дать сравнительный анализ полученных данных и сил взаимодействия между частицами этих грунтов, основной составляющей их общей эффективной прочности, исследование которых было проведено авторами ранее [4]. Результаты определения силы взаимодействия между частицами грунтов на контактах, называемой реальным эффективным напряжением, выполненные для тех же грунтов, что и в данной работе, приведены в табл. 1. Анализ представленных данных показывает, что действие капиллярных сжимающих сил может оказывать существенное влияние на общую эффективную прочность глинистых грунтов, их величина при степени водонасыщения грунтов Sr = 0.75 - 0.80 достигает значений, сопоставимых с величиной реальных эффективных напряжений для всех разновидностей грунтов, независимо от их физико-химического состояния.

В целом, действие капиллярных сжимающих сил в глинистых грунтах повышает их общую эффективную прочность, что, как было показано авторами ранее [4], приводит к изменению показателей их прочностных свойств, определенных по закону Мора—Кулона, а именно увеличению значений сцепления.

выводы

Капиллярные силы в той или иной степени действуют в грунтах, в составе которых, наряду с минеральными частицами и водой, присутствует газовая составляющая, воздух, за счет образования капиллярных менисков воды в поровом пространстве на ее границе с газом в результате искривления поверхности жидкости и изменения ее поверхностного натяжения. Величина капиллярных сжимающих сил не постоянна и изменяется в зависимости от строения грунта. Для глинистых грунтов закономерности изменения этой величины имеют двойственную природу.

С одной стороны, величина капиллярных сил, в соответствии с положениями теории капиллярности, определяется количеством капиллярных менисков в порах грунта, зависящем от степени заполнения водой последних, которая характеризуется показателем степени водонасыщения грунта.

В то же время, глинистые грунты по своему строению являются дисперсными системами. Соответственно, характер действия капиллярных сил, являющихся одной из составляющих суммарных внутренних напряжений в глинах, зависит от физико-химических параметров, определяющих строение и свойства дисперсных систем — преобладающим типом контактов между минеральными частицами грунта и их количеством.

Действие капиллярных сжимающих сил в глинистых грунтах повышает их общую эффективную прочность, что, соответственно, приводит к увеличению показателей прочностных свойств (сцепления). Влияние капиллярных сил на прочностные свойства глинистых грунтов может быть существенным, сила их действия обратно пропорциональна объему заполнения пор грунта водой и при степени водонасыщения 0.75—0.8 достигает значений, сопоставимых с силой взаимодействия между частицами на контактах.

Капиллярные сжимающие силы оказывают влияние на прочностные свойства глинистых грунтов и степень этого влияния может меняться при изменении их структурного строения в различных условиях нагрузок и деформаций — уплотнения, водонасыщения или других процессов и воздействий.

Действие капиллярных сил необходимо рассматривать при проведении практических исследований для объективной оценки прочностных свойств глинистых грунтов и достоверного прогноза возможности их изменения в результате различных природных и техногенных воздействий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Ломпадзе В.Д.* Изменение состава, структуры, плотности и связности глин при уплотнении их большими нагрузками // Тр. лаборатории гидрогеологических проблем АН СССР. 1955. Т. 12.
- 2. *Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Кальбергенов Р.Г.* Влияние расклинивающего действия гидратных пленок на прочностные свойства глинистых грунтов // Геоэкология. 2018. № 4. С. 91—97.
- Карпенко Ф.С. Физико-химическая природа пределов пластичности глинистых грунтов // Геоэкология. 2018. № 5. С. 66–72.
- Карпенко Ф.С. Физико-химическая природа прочности глинистых грунтов // Геоэкология. 2019. № 5. С. 48–60.
- 5. *Осипов В.И.* Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах. М.: ИГЭ РАН, 2012. 74 с.
- 6. *Осипов В.И.*, *Соколов В.Н.* Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС, 2013. 576 с.
- 7. *Сергеев Е.М.* К вопросу о механической прочности дисперсных грунтов // Уч. зап. МГУ. 1949. № 10.

- 8. *Соколов В.Н.* Влияние влажности на прочность структурных связей глинистых частиц // Вестн. МГУ. Сер. геол. 1973. № 6. С. 100—104.
- 9. Соколов В.Н., Осипов В.И. Влияние различных категорий связанной воды на прочность глин // Свя-
- занная вода в дисперсных системах. Вып. 4. М.: $M\Gamma Y$, 1977. С. 4—15.
- Филатов М.М. О микроструктуре грунтов в связи с деформациями их под влиянием нагрузки // Физика почв СССР. Тр. Сов. секции Международной ассоциации почвовелов. Т. 5, 1936.

THE INFLUENCE OF CAPILLARY FORCES ON THE STRENGTH OF CLAY SOILS

F. S. Karpenko^{a,#}, V. N. Kutergin^a, S. I. Frolov^a, and O. V. Serebrova^a

^a Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Science, Ulanskii per., 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia
*E-mail: kafs08@bk.ru

Capillary forces operating in incompletely water-saturated clay soils appear to be an important agent affecting their strength properties. The paper considers the results of practical studies in the changing value of capillary compressive forces in clay soil varieties depending on their water saturation degree. Investigations are based on the physicochemical strength theory. It is shown that the value of capillary compressive forces in clays depends on their structure, the prevailing type of structural contacts, the number of clay particles and contacts between them. This value is proved to be dependent on the degree of water saturation in soil, changing regularly with the variation of the latter.

Keywords: clay soils, structural contacts, general effective stresses, actual effective stresses, capillary meniscus, capillary compressive forces

REFERENCES

- 1. Lomtadze, V.D. *Izmemenie sostava, struktury, plotnosti i svyaznosti glin pri uplotnenii ikh bol'shimi nagruzkami* [Changes in the composition, structure, density and cohesion of clays compacted under heavy load]. *Trudy laboratorii gidrogeologicheskikh problem AN SSSR*. 1955, vol. 12. (in Russian)
- Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Kalbergenov, R.G. Vliyanie rasklinivayushchego deistviya gidratnykh plenok na prochnostnye svoistva glinistykh gruntov [Influence of the disjoining effect of hydrate films on the strength properties of clay soils]. Geoekologiya, 2018, no. 4, pp. 91–97. (in Russian)
- 3. Karpenko, F.S. *Fiziko-khimicheskaya priroda predelov plastichnosti glinistykh gruntov* [Physicochemical nature of clayey soil plasticity limits]. *Geoekologiya*, 2018, no. 5, pp. 66–72. (in Russian)
- 4. Karpenko, F.S. *Fiziko-khimicheskaya priroda prochnosti glinistykh gruntov* [Physicochemical nature of clayey soil strength]. *Geoekologiya*, 2019, no. 5, pp. 48–60. (in Russian)
- 5. Osipov, V.I. *Fiziko-khimicheskaya teoriya effektivnykh napryazhenii v gruntakh* [Physicochemical theory of effective stresses in soils]. Moscow, IFZ RAN. 2012, 74 p. (in Russian).

- 6. Osipov, V.I., Sokolov, V.N. *Gliny i ikh svoystva. Sostav, stroyeniye i formirovanie svoystv* [Clays and their properties. Composition, structure and formation of properties]. Moscow, GEOS Publ. 2013. 576 p. (in Russian)
- Sergeev, E.M. K voprosy o mekhanicheskoi prochnosti dispersnykh gruntov [On the issue of mechanical strength of fine soils]. Uch. zapiski MGU, 1949, no. 10.
- 8. Sokolov, V.N. *Vliyanie vlazhnosti na prochnost' strukturnykh svyazei glinistykh chastits* [Moisture effect on the strength of structural bonds between clay particles]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Ser. 4. Geolog.* 1973, no. 6, pp. 100–104. (in Russian)
- 9. Sokolov V.N., Osipov V.I. *Vliyanie razlichnykh kategorii svyazannoi vody na prochnost' glin* [Influence of different categories of bound water on clay strength]. *Svyazannaya voda v dispersnykh sistemakh* [Bound water in disperse systems], Moscow, MGU Publ., 1977, iss. 4, pp. 4–15. (in Russian)
- 10. Filatov, M.M. O mikrostrukture gruntov v svyazi s deformatsiyami ikh pod vliyaniem nagruzki [On the microstructure of soils in connection with their deformations under load]. Fizika pochv SSSR. Trudy Sov. sektsii Mezhdunarodnoi assotsiatsii pochvovedov. 1936, vol. 5. (in Russian)

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 550.461:550.424

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ В ВОДАХ РАЙОНА ШАХТЫ "ЛЮПИККО-I" (ПИТКЯРАНТСКИЙ РУДНЫЙ РАЙОН, КАРЕЛИЯ)

© 2021 г. А. А. Конышев^{1,*}, Е. С. Сидкина^{1,**}, Е. А. Солдатова¹, Е. В. Черкасова¹, И. А. Бугаев¹, А. С. Торопов², Д. Н. Догадкин¹, И. Н. Громяк¹, И. Ю. Николаева²

Цель исследования природных вод района рудного поля Люпикко – изучение поведения химических элементов, в частности рудной специализации, форм их нахождения и осаждения. Предпринята попытка проследить влияние горных выработок на состояние природных водных объектов. поскольку локальный сток играет важную роль в формировании речного стока. Для этого были отобраны пробы воды из шахты "Люпикко-1" с разных глубин, закопушки в пределах шахтных отвалов, подотвального пруда и р. Ристиоя, а также две пробы отложений из закопушки и подотвального пруда. Результаты показывают повышенные содержания Fe, Zn, Ni, Co, Sr, Cd, U в водах района шахты "Люпикко-I" относительно значений геохимического фона. Пик концентраций этих металлов приходится на пробы воды, отобранные из закопушки, в то время как наиболее высокие их содержания определены в донных отложениях подотвального пруда. В речных водах концентрация металлов значительно ниже. Исследования показывают, что после активного растворения атмосферными осалками минералов отвалов в присутствии кислорола возлуха происхолит сток в прул с застойной водой, где происходит осаждение металлов в виде собственных минералов или вследствие сорбционных процессов. Можно сделать вывод, что пруд в данной системе выполняет роль приемника не только физического стока подотвальных вод, но и места протекания химических процессов самоочищения воды. Установлено, что органическое вещество гуминовой природы является доминирующим фактором накопления железа в изученных водах. Меньшая степень сродства с гумусовыми веществами отмечена для Са, Мg, а также большинства рассмотренных микрокомпонентов.

Ключевые слова: поверхностные воды, подотвальная вода, загрязнение, термодинамическое моделирование, шахта, фульвокислоты, гуминовые кислоты, органоминеральные комплексы, вторичное минералообразование

DOI: 10.31857/S0869780921060035

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучаемые объекты — шахты Люпикко, расположены в Питкярантском рудном районе на северо-восточной оконечности Ладожского озера и относятся к одноименному административному району Республики Карелия (рис. 1). Толчком к открытию железорудного месторождения Люпикко послужило обнаружение халькопирита крестьянином Я. Павловым в 1856 г. Помимо упомянутого, в Питкярантском рудном районе находятся и другие скарновые и апоскарновые грейзеновые месторождения и рудопроявления с

комплексным железо-полиметаллическим-оловянным и редкометальным оруденением. Район исследований характеризуется развитой гидрографической сетью, представленной преимущественно небольшими реками и протоками, которые соединяют небольшие озера, образуя озерноречные системы. Основную долю в поверхностном стоке составляет местный сток, формирующийся непосредственно на территории Карелии. В связи с особенностями водного режима, реки района представляют ценность для рыбного хозяйства [8, 9]. Также поверхностные воды здесь

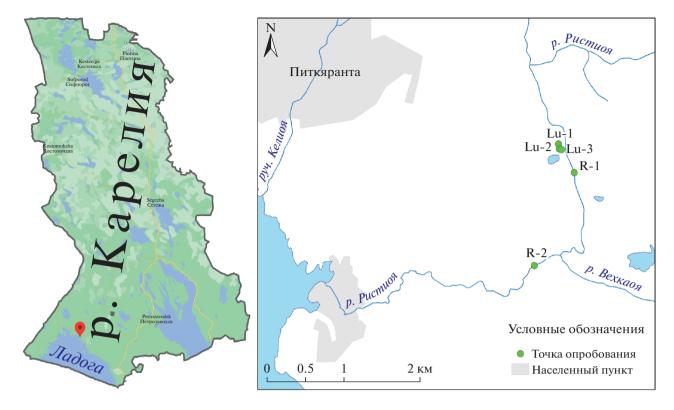


Рис. 1. Расположение района исследований и точек опробования: Lu-1 — шахта "Люпикко-I", Lu-2 — закопушка, Lu-3 — пруд, R-1 — р. Ристиоя у отвалов, в 400 м от шахты, R-2 — р. Ристиоя в 1.8 км ниже по течению от R-1, после впадения р. Вехкаоя.

широко используются для целей питьевого водоснабжения [8]. Эти факторы определяют важность исследования поведения химических элементов в поверхностных водных объектах, в особенности форм их миграции и осаждения, а также взаимосвязи природных водных объектов с горными выработками, широко распространенными на территории района, для оценки их геоэкологического статуса и прогноза состояния гидроэкосистем.

Следует отметить, что добыча медных руд месторождения Люпикко не оправдала ожиданий, но при геологоразведочных работах было открыто месторождение магнетита. Под этот объект в 1866 г. была построена доменная печь. Однако уже с 1867 г. на предприятии стали плавить в основном руды, добытые на других объектах района, поскольку руды месторождения Люпикко оказались проблемными для плавки из-за значительного содержания сфалерита. С 1873 г. рудники заброшены по причине нецелесообразности производств [24].

В настоящее время шахты Люпикко затоплены. Породы отвалов доступны для воздействия атмосферного воздуха и осадков. Отвалы частично затоплены и выстилают дно пруда, который вероятно служил резервуаром для стока атмосферных осадков с отвалов. Для пород отвалов

установлено широкое минеральное разнообразие, в том числе три десятка собственных минералов редких элементов и благородных металлов. Породы содержат в себе широкий спектр химических элементов, которые могут поступать и накапливаться в водах при их длительном взаимодействии. С целью детального изучения химического состава и оценки форм нахождения металлов в природных водах в 2020 г. на объекте был проведен пробоотбор природных вод из шахты, пруда и протекающей по району исследования р. Ристиоя (см. рис. 1).

1.1. Геологический очерк

Рудные объекты Питкярантского района приурочены к метакарбонатным горизонтам сортавальской серии, опоясывающих гнейсогранитные купола (AR_2 – PR_2). Рудообразование связывается, главным образом, с внедрением гранитов Салминского батолита в мезопротерозое [7], которые залегают под рудными объектами, как правило, на глубине до первых сотен метров [5]. На восточной оконечности рудного поля Хопунваара расположены и прямые контакты метакарбонатов сортавальской серии с гранитными породами.

Рассматриваемый в данной работе объект приурочен к рудному полю Люпикко, развитому в

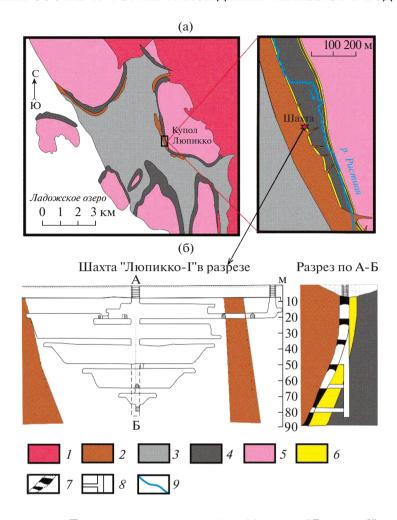


Рис. 2. Геологическая схема части Питкярантского рудного района (а) и шахта "Люпикко-I" в разрезе (б) по [19, 24] с упрощениями и дополнениями. Условные обозначения: 1 — гранитные породы Салминского батолита; 2 — Свекофеннские керамические пегматиты; 3 — богатые алюминием слюдистые сланцы Ладожской серии; 4 — Сортавальская серия: амфиболиты и амфиболовые сланцы с карбонатными горизонтами; 5 — гранито-гнейсы куполов; 6 — метакарбонатные горизонты сортавальской серии; 7 — контур рудного тела; 8 — ствол шахты и штреки; 9 — р. Ристиоя и направление ее течения.

юго-западном обрамлении одноименного гнейсогранитного купола (рис. 2). Через территорию рудного поля протекает р. Ристиоя так, что 4 шахты оказываются с западной стороны от реки, а одна к востоку. Рудное поле Люпикко имеет магнетитовую специфику. Так, в 1894 г. при помощи магниторазведки были обнаружены две параллельные магнитные аномалии аналогичные таковым на рудном поле Хопунваара. Аномалии связаны с наличием двух метакарбонатных горизонтов в обрамлении гнейсогранитных куполов -"верхним" и "нижним", и развивающимися магнетитсодержащими скарнами по ним. В состав пород сортавальской серии, кроме метакарбонатов также входят амфиболитовые сланцы. Из силикатных пород, обрамляющих гнейсогранитные купола, в рассматриваемом районе также развиты пегматитовые тела, образованные до внедрения кислых пород Салминского батолита. Силикатные породы, приуроченные к Салминскому батолиту и вскрываемые горными выработками на рудном поле Люпикко, представлены дайковой серией высокодифференцированных Li-сидерофиллитовых гранитов.

Общее падение рудных тел Люпикко составляет около 75° к западу. При этом у поверхности падение более крутое и доходит до 85°, с глубиной выполаживается и на глубине более 45 м падает до 45° [24]. В породах Сортавальской серии вблизи границы с куполом гнейсогранитов проявлены сдвиговые деформации, к которым приурочены тела пегматитов. Вероятно, по имеющимся ослабленным зонам происходила также и фильтрация флюида, что привело к более масштабным образованиям рудной минерализации в висячем блоке. Рудные магнетитовые тела не выдержаны по мощности и простиранию.

Основной рудный минерал на рудном поле Люпикко — магнетит. Вместе с магнетитом в руде в значимых количествах развиты сфалерит, флюорит, халькопирит, пирит, касситерит и галенит, встречаются реликты скарнированных мраморов. В рудах также встречаются пирротин, кубанит, As-содержащие минералы (арсенопирит, леллингит), молибденит, повеллит, шеелит, Ві-содержащие минералы (хедлейит, самородный Ві), стокезит, Ве-содержащая минерализация (хризоберилл, берборит, бертрандит, бромеллит, даналит), флюоборит, апатит, кальцит. Развиты силикаты: минералы группы серпентина и гумита, клинопироксен, хлорит, тальк, флогопит, эпидот (пьемонтит), гельвин, типичные для скарнов — везувиан, гранат (андратит-гроссулярового ряда). Минеральный состав представлен по материалам [2, 4, 11], а также на основе наблюдений авторов.

2. МЕТОЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Пробоотбор и аналитические методы исследования проб воды

В ходе полевых работ в районе шахты "Люпик-ко-I" было отобрано 6 проб воды: Lu-1a и Lu-1b — из шахты с поверхности и с глубины 2 м, соответственно; Lu-2 — из закопушки; Lu-3 — из подотвального пруда; R-1 — вода протекающей по скарнированным породам р. Ристиоя, в 400 м от шахты Люпикко; R-2 — вода р. Ристиоя, в 1.8 км ниже по течению от R-1, после впадения р. Вехкаоя.

При пробоотборе анализировались показатели рН (РН200, НМ Digital, Южная Корея) и Еһ (ЭКОТЕСТ 2000, ЭКОНИКС, Россия). Пробы для элементного анализа на точке опробования фильтровали через ацетат-целлюлозные мембраны с размером пор 0.45 мкм в стерильные пробирки объемом 15 мл с добавлением 0.45 мл НNО $_3$ ос.ч. Для анализа компонентов карбонатной системы, хлорид-иона и $C_{\rm opr}$ пробы отобраны в бутылки объемом 300 мл, предварительно трижды промытые исследуемой водой.

Элементный анализ воды был выполнен в ГЕОХИ РАН. Содержания Са, Mg, Na, K, Fe, Al, S определяли методом ICP-AES с помощью плазменного спектрометра iCAP 6500 DUO (Thermo Scientific), содержания Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Pb, Cd, U и других микроэлементов определены методом ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре X-series 2 (Thermo Scientific).

Компоненты карбонатного равновесия (CO_2 , HCO_3^- , $\mathrm{CO}_3^{2^-}$) определялись методом потенциометрического титрования с использованием высокоточного анализатора Эксперт-001 (OOO Эконикс-Эксперт). Количество Cl^- и $\mathrm{SO}_4^{2^-}$ определено методом ионной хроматографии на приборах ICS-3000 и ICS-2000 (Thermo Scientific); со-

держание $C_{\rm opr}$ — методом высокотемпературного каталитического окисления (Vario TOC cube, Elementar). Соотношение содержаний фульво- и гуминовых кислот проанализировано оксидиметрически с $K_2Cr_2O_7$ на приборе Shimadzu UV-1800 с преконцентрированием на смоле XAD-8 и разделением элюата при рН 2. Исследования выполнены в МГУ им. М.В. Ломоносова.

Также в ходе полевых работ были отобраны 2 пробы породы: в точке Lu-2 — отложения со дна закопушки; в точке Lu-3 – донные отложения подотвального пруда с глубины 80 см. Отбор проб отложений был произведен в герметичные полиэтиленовые пакеты. В лаборатории пробы высушены, истерты и просеяны через сито с размером ячеек 1 мм. Зольность отложений в течение 2 ч при температуре 800°C определялась в двух параллельных пробах. После этого пробы охлаждали на воздухе в течение 5 мин, а затем в эксикаторе до комнатной температуры и взвешивали. Для контроля тигли с зольным остатком прокаливали в течение 30 мин при температуре 800°C, охлаждали, взвешивали и определяли изменение массы. Изменение массы не должно было превышать 0.001 г. Также в пробах отложений были проанасодержания микрокомпонентов лизированы (Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Pb, Cd, U и др.) методом ICP-MS. Образцы для анализа готовили спеканием с карбонатом натрия [3]. Для этого 0.1 г образца смешивали с 0.3 г безводного карбоната натрия (Merck, Suprapur) в агатовой ступке и переносили в корундовый тигель. Спекание проводили при 800°С в течение часа в муфельной печи. Полученные таблетки из спеченного материала обрабатывали 5 мл смеси HNO₃:HCl:HF в пропорции 10:2:1 и после растворения разбавляли до 50 мл деионизированной водой (EasyPure). Для измерения раствор разбавляли 3% азотной кислотой. Измерения проводились на масс-спектрометре Element-2 (Thermo Scientific) в лаборатории экспериментальной геохимии МГУ им. М.В. Ломоносова.

В качестве геохимического фона приняты средние геометрические значения содержания элементов в поверхностных водах по данным [12], полученные для северо-западных территорий России, сходных с районом исследований по ландшафтно-климатическим условиям.

2.2. Методика термодинамических расчетов

Термодинамические расчеты проведены с помощью программного комплекса HydroGeo [1]. Система состояла из 20 химических элементов (O, H, C, S, Cl, Ca, Mg, Na, K, Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Ni, Co, Sr, Cd, Pb, U), а также Fu (фульвокислота) и Hu (гуминовая кислота).

Таблица 1. Ионы и комплексные частицы, добавленные в модель

	Taowing 1. Trouble it contribute the radio of the state o										
H^+	Mg ²⁺	MnHCO ₃ ⁺	CuCl ⁺	$CoSO_4^0$	UO ₂ HCO ₃ ⁺						
OH-	MgHCO ₃ ⁺	$MnSO^0_4$	Cu ⁺	Co ²⁺	$UO_2(HCO_3)_2^0$						
H_2O	$MgSO^0_4$	Mn ²⁺	CuFu ⁰	CoFu ⁰	$UO_2CO_3^0$						
HCO_3^-	$MgFu^0$	MnFu ⁰	Cu(OH) ₂ Fu ²⁻	CoHu ₂ ⁰	$UO_2(CO_3)_2^{2-}$						
CO_3^{2-}	MgHu ⁺	MnHu ⁺	CuHu ₂ ⁰	Sr ²⁺	$UO_2(CO_3)_3^{4-}$						
CO_2^0	Ca ²⁺	Al ³⁺	CuHu ⁺	SrHCO ₃ ⁺	$UO_2(CO_3)_3^{5-}$						
SO_4^{2-}	CaHCO ₃ ⁺	$Al_2(CO_3)_3^0$	Zn ²⁺	$SrSO_4^0$	$UO_2SO_4^0$						
Fu ²⁻	CaCO ₃	AlSO ₄ ⁺	ZnHCO ₃ ⁺	SrFu ⁰	UO_3^0						
HFu ⁻	CaSO ₄ ⁰	AlFu ⁺	Z nS O_4^0	$SrHu_2^0$	UO ₂ OH ⁺						
H_2Fu^0	CaFu ⁰	$Al(OH)_3^0$	ZnFu ⁰	SrHu ⁺	$UO_2(OH)_2^0$						
Hu ⁻	CaHu ⁺	Al(OH) ₂ ⁺	ZnHu ⁺	Pb ²⁺	UO ₂ Fu ⁰						
$\mathrm{HHu^0}$	Fe ³⁺	Ni ²⁺	Cd ²⁺	PbHCO ₃ ⁺	$UO_2Fu_2^{2-}$						
Cl ⁻	(FeHCO ₃) ⁺	NiHCO ₃ ⁺	CdHCO ₃ ⁺	PbCO ₃ ⁰	UO ₂ Hu ⁺						
Na ⁺	(Fe(OH) ₂ Fu) ⁻	NiFu ⁰	$CdSO_4^0$	$PbSO_4^0$	$\mathrm{UO_{2}Hu_{2}^{0}}$						
$NaHCO_3^0$	FeOHFu ⁰	NiOH ⁺	CdFu ⁰	$PbOH^+$	UO_2^+						
$NaSO_4^-$	FeHu ₃ ⁰	$Ni(OH)_2^0$	CdHu ⁺	PbFu ⁰	UO_2^0						
K ⁺	Fe(OH) ₃ ⁰	Cu ²⁺	$CdHu_2^0$	PbHu ⁺	U(OH) ₃ ⁺						
$KHCO_3^0$	Fe ²⁺	CuHCO ₃ ⁺	Co ³⁺	$PbHu_2^0$							
KSO ₄	Mn ³⁺	CuSO ₄ ⁰	CoHCO ₃ ⁺	UO_2^{2+}							

Для расчета свободных энергий образования комплексов с фульвовыми и гуминовыми кислотами были использованы эффективные константы устойчивости, приведенные в [18, 23]. Фульвокислота (Fu) и гуминовая кислота (Hu) введены в базу данных как новые независимые элементы. Свободные энергии Fu²⁻ и Hu⁻ приняты равными нулю. Содержания фульво- и гуминовых кислот были рассчитаны из концентрации С_{орг} согласно [10]. В расчете использовано соотношение фульво- и гуминовых кислот, экспериментально определенное по методу, описанному в п. 2.1. Более подробно о подходе к расчету содержания фульво- и гуминовых кислот изложено в [10].

В качестве потенциально возможных твердых фаз были приняты: магнезит, кальцит, сидерит, $Fe(OH)_3$, (аморфный) гетит, тенорит, смитсонит, цинкит, ангидрит, гипс, родохрозит, пирит, сфалерит, брусит, гиббсит. Список компонентов водного раствора, рассматриваемый в модели, приведен в табл. 1.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Химический состав изучаемых природных вод

Изучаемые природные воды являются весьма пресными (табл. 2) по классификации ОСТ 41-05- $263-86^{1}$.

Величина общей минерализации изменяется от 18.5 мг/л (р. Ристиоя) до 305 мг/л (шахта "Люпикко-I"). По величине рН все воды нейтральные (6.04—7.95) за исключением точки R-1, где вода умеренно кислая (рН 5.38). При пробоотборе была измерена температура воды. Вода во всех точках холодная: от 11°С в шахте до 15.6°С в р. Ристиоя.

Химический состав воды разнообразный. Вода из шахты (пробы Lu-1a и Lu-1b) — гидрокарбонатная кальциево-магниево-натриевая. Сравнение аналитически определенных концентраций в этой точке со значениями геохимического фона

¹ ОСТ 41-05-263-86. Воды подземные. Классификация по химическому составу и температуре. М.: ВСЕГИНГЕО, 1986. 9 с. URL: http://waterservice-dmitrov.ru/data/documents/OST-41-05-263-86.pdf

Таблица 2. Химический состав изучаемых природных вод

Компоненты и	Единица	Фоновые	Точка пробоотбора							
показатели	измерения	значения [12]	Lu-1a	Lu-1b	Lu-2	Lu-3	R-1	R-2		
pН	ед. рН	н/д	7.95	7.59	6.04	7.04	5.38	7.05		
Eh	мВ	н/д	122.8	80.2	190.6	194.2	202.03	175.5		
M	мг/л	н/д	305	301	163	158	18.5	42.2		
C_{opr}		н/д	14.5	8.8	17.4	9.8	25.3	19.6		
CO_2		н/д	7.04	11.62	10.56	14.08	21.12	8.80		
HCO_3^-		н/д	220	215	102	83.0	5.4	19.5		
SO_4^{2-}		2.23	1.6	1.2	17.4	33.4	3.1	8.5		
Cl ⁻		0.857	9.7	10.6	3.0	2.5	4.0	1.8		
Ca		2.32	32.4	32.6	28.2	28.9	3.34	6.78		
Mg		0.766	15.3	15.2	7.08	6.89	0.76	1.81		
Na		1.04	24.1	24.2	3.78	1.82	1.77	3.10		
K		0.344	2.32	2.81	1.02	1.27	0.12	0.66		
Fe		0.072	0.23	0.85	1.61	0.63	1.34	1.48		
Al		0.034	< 0.008	< 0.008	0.12	0.03	0.33	0.27		
Mn		н/д	0.588	0.640	1.430	0.221	0.055	0.074		
Zn	мкг/л	0.964	15.8	8.6	2977	553	10.8	9.96		
Cu		0.525	< 0.5	0.10	46.6	9.88	< 0.5	0.20		
Ni		0.278	0.74	0.50	3.78	2.21	0.69	1.08		
Co		0.025	0.13	0.10	6.77	0.86	0.40	0.31		
Sr		14.7	146.7	146.9	34.02	42.39	14.80	25.12		
Cd		0.011	0.42	< 0.01	5.65	0.35	0.01	0.01		
Pb		0.079	< 0.12	< 0.12	2.66	2.65	0.46	0.50		
U		0.01	6.47	6.16	0.73	0.26	0.23	0.60		

Примечание: н/д – нет данных; М – минерализация; жирным шрифтом выделены значения, превышающие фоновые.

показало превышения по макрокомпонентам и целому ряду микрокомпонентов: Fe, Zn, Ni, Co, Sr, Cd и U. При этом содержание Sr и U в воде затопленной шахты наибольшее среди изученных проб.

Вода, отобранная из закопушки (точка Lu-2), гидрокарбонатная кальциево-магниевая со значительным содержанием SO_4^{2-} (17.4 мг/л). В этой пробе определены наивысшее содержание Fe, Zn, Cu, Ni, Co, Cd. Концентрации Al, Sr, U превышают значения геохимического фона.

Проба Lu-3 отобрана из подотвального пруда, частично покрывающего и сами отвалы. Вода в этой точке сульфатно-гидрокарбонатная кальциево-магниевая. Превышения геохимического фона в этой точке наблюдаются по тому же перечню химических элементов, что и в пробе Lu-2, но концентрации этих элементов несколько ниже.

В пробах, отобранных из р. Ристиоя, также отмечены превышения фоновых значений по Fe,

Al, Zn, Ni, Co, Sr, U, но их концентрации значительно (иногда на порядки) ниже, чем в воде затопленной шахты и прилегающих объектов.

3.2. Формы миграции и осаждения химических элементов

Основные катионогенные элементы в изученных водах находятся преимущественно в ионной форме. Характер распределения кальция и магния почти идентичен. Кроме ионной формы эти элементы мигрируют в форме гидрокарбонатного комплекса (не более 2.8 mol %). В пробах, отобранных из закопушки и пруда, наблюдаются максимальные значения сульфатных форм кальция и магния (1.2—3.0 mol %). Фульватные комплексы кальция и магния имеют резко подчиненное значение. Максимальные содержания фульватных комплексов рассчитаны для пробы Lu-la (0.13 и 0.17 mol % для кальция и магния соответственно). Кальцит выпадает во всех изученных

Минерал	Формула	Lu-1a	Lu-1b	Lu-2	Lu-3	R-1	R-2
Гётит	FeOOH	0	1.20×10^{-5}	8.50×10^{-7}	8.30×10^{-7}	8.50×10^{-7}	8.60×10^{-7}
Гиббсит	$Al(OH)_3$	0.023	0.023	0.35	0.085	0.94	0.79
Кальцит	CaCO ₃	8.1	6.2	9.80×10^{-7}	9.10×10^{-7}	0	0
Магнезит	$MgCO_3$	0	1.40×10^{-6}	7.80×10^{-7}	0	0	0
Родохрозит	$MnCO_3$	1.1	1.2	1.10×10^{-6}	1.10×10^{-6}	0	1.20×10^{-6}
Смитсонит	ZnCO ₃	0	0	1.20×10^{-6}	0	0	0
Тенорит	CuO	0	0	7.30×10^{-7}	7.70×10^{-7}	0	0
Уранинит	UO_2	2.80×10^{-6}	2.70×10^{-6}	0	0	0	0

Таблица 3. Рассчитанные массы минералов, осаждающихся из изучаемых вод (мг/л)

Таблица 4. Содержание некоторых химических элементов в изучаемых отложениях (мг/кг) и зольность

Проба	Cd	Pb	U	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Зольность, %
Lu-2	48.25	285	8.27	1903	18.93	10.73	1669	10225	19	98.14
Lu-3	325.7	978	35.27	214	63.37	31.88	1555	42297	31	92.86

пробах кроме речных (табл. 3). Результаты моделирования также показали возможность осаждения магнезита из воды в пробах Lu-1b и Lu-2. Натрий и калий преимущественно находятся в ионной форме (более 99 mol %). Распределение Sr по формам весьма похоже на распределение основных катионов. В речных водах резко доминирует ионная форма (более 99 mol %), в остальных пробах содержание стронция в ионной форме варьирует в пределах 96.0—97.7 mol %. Доля гидрокарбонатных комплексов Sr наиболее велика в пробах, отобранных из шахты (3.8—3.9 mol %). Доля фульватного комплекса SrFu⁰ незначительна, максимальное значение 0.10 mol % наблюдается в пробе Lu-1a.

Все железо связывается в комплекс $Fe(OH)_2Fu^-$. При исчерпании заданной в баланс фульвокислоты Fe выпадает в виде гётита (см. табл. 3). Такое поведение Fe было выявлено в водах других объектов Питкярантского рудного района [6, 18], а также в поверхностных и подземных водах других регионов [15, 20, 21]. Железо в виде гётита выпадает в пробах Lu-1b, Lu-2, Lu-3 и R-2.

Схожие характеры распределения имеют Мп, Ni, Zn и Cd (рис. 3). Они также преимущественно находятся в ионной форме, доля которой особенно значительна в речных водах. Второй по распространенности формой нахождения является гидрокарбонатная, доля которой наиболее высока в пробах, отобранных из шахты. Для Мп доля гидрокарбонатных комплексов составляет до 12.3 mol %, для Ni — до 33.0 mol %, для Zn — 5.7 mol %, для Cd — 26.0 mol %. В пробах, отобранных из шахты, отмечена высокая по сравнению с

другими пробами доля фульватных комплексов (MnFu 0 0.4 mol %, NiFu 0 1.9 mol %, ZnFu 0 1.9 mol %, CdFu 0 0.9 mol %).

В речных водах в небольшом количестве присутствуют гуминовые комплексы вышеперечисленных металлов. Максимальное содержание рассчитано для Zn (1.1 mol %). Наибольшее относительное содержание гуминового комплекса Мп (0.26 mol %) рассчитано в пробе речной воды R-1. Термодинамический расчет показал выпадение смитсонита в пробе Lu-2, в которой была зафиксирована максимальная концентрация Zn (2977 мкг/л). Мп выпадает в виде родохрозита во всех пробах, кроме R-1. Возможность выпадения этих минералов в природных условиях подтверждают высокие концентрации Zn и Mn в пробах донных отложений, что особенно характерно для подотвального пруда, куда направлен поток поверхностных вод, промывающих отвалы (табл. 4).

Содержание Ni и Cd в донных отложениях также достаточно высокое. Можно предположить, что для Zn и Mn основными процессом вывода из раствора является выпадение собственных минералов, а для Ni и Cd, вероятно, значительную роль будет играть сорбция. Однако мы не можем исключить механический снос частиц рудных минералов в пруд, который может быть причиной высоких концентраций, поэтому верифицировать результаты моделирования с необходимой надежностью по содержанию металлов в отложениях не представляется возможным. Зольность, определенная для проб донных отложений, говорит о невысоком содержании в них органического вещества, особенно для точки Lu-2. Вероятно,



Рис. 3. Формы нахождения химических элементов рудной специализации в изучаемых водах, то! %.

в представленных концентрациях органическое вещество не будет играть значительной роли в осаждении металлов в виде твердой фазы. Хотя возможность такого механизма иммобилизации металлов и обсуждается в [16, 22].

Поведение меди во многом схоже с рассмотренными выше металлами. Значительным отличием является более тесное сродство с органическими веществом. В пробе Lu-1a 94.0 mol % Cu

находится в виде фульватного комплекса (см. рис. 3). В речных водах значительно содержание гуминового комплекса меди — 2.6—10.8 mol %. В пробе Lu-2 и Lu-3 согласно данным моделирования возможно выпадение тенорита, что также хорошо согласуется с высоким содержанием Си в пробах донных отложений.

Формы нахождения свинца довольно разнообразны (см. рис. 3). Наибольшая доля формы Pb^{2+}

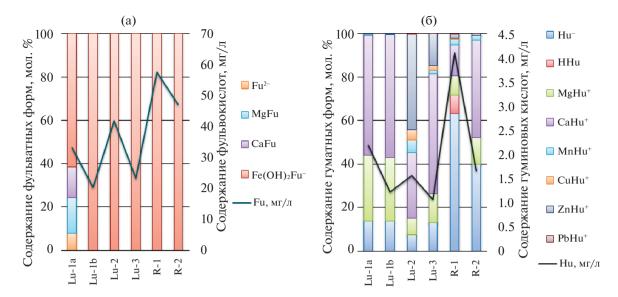


Рис. 4. Диаграммы распределения фульватных (а) и гуматных (б) форм в изучаемых водах.

рассчитана для речных вод в пробе R-1 (70.0 mol %). В этой же пробе отмечено наибольшее содержание формы $PbHu^+$ (21.5 mol %). Высокая степень сродства Pb с гуминовой кислотой показана в работе [17]. В других пробах значительное место занимает комплекс $PbOH^+$ (5.0—69.0 mol %). Также присутствуют гидрокарбонатная и карбонатная формы.

Преобладающая форма урана в пробах Lu-1a, Lu-1b, Lu-2, Lu-3 – $(UO_2(CO_3)_2)^{2-}$ (57.0–83.0 mol %). Доля комплекса $(UO_2(CO_3)_3)^{4-}$ значительно выше в пробах воды, отобранных из шахты (37.0-42.0 mol %). В остальных пробах доля этого комплекса составляет не более 4.5 mol %. В речных водах, где содержание гидрокарбонат-иона ниже, увеличивается доля комплексов $UO_2CO_3^0$ (13.0— $31.5 \,\mathrm{mol}\,\%$) и UO_3^0 (26.0–45.0 mol %). Для вод, отобранных из шахты, рассчитано насыщение уранинитом. Это значительно отличается от распределения форм урана в водах, связанных с карьером бутового камня (Питкярантский рудный район), которые были ранее рассмотрены авторами [6], где большую долю в миграции урана играют UO_{2}^{0} и $UO_{2}CO_{3}^{0}$ в связи с пониженными значениями Eh, а также гидроксокомплексы (при практически полном отсутствии в водах гидрокарбонат-иона). Известно, что формы миграции урана подвержены значительному влиянию геохимических условий среды [13].

Термодинамические расчеты показали возможность осаждения гиббсита во всех рассмотренных пробах (см. табл. 3). Формы миграции Al находятся в тесной связи с величиной рН [14]. При рН выше 7 (пробы Lu-1a, Lu-1a, Lu-3 R-2)

преобладает комплекс $Al(OH)_3^0$ (89.0—98.0 mol %). В пробе с наименьшей величиной pH основными формами нахождения являются Al^{3+} (58.0 mol %) и $Al(OH)_2^+$ (37.0 mol %).

Роль органического вещества в комплексообразовании металлов хорошо демонстрируют сводные диаграммы, представленные на рис. 4. Расчеты показали, что практически вся фульвокислота, заданная в баланс системы, связывается с железом в комплекс Fe(OH)₂Fu⁻. При израсходовании фульвокислоты железо выпадает в виде гётита. В пробе Lu-1а содержание железа недостаточное, чтобы связать всю фульвокислоту, и она находится в виде Fu²⁻ и связывает часть кальция и магния в комплексы CaFu⁰ и MgFu⁰. Другие металлы также образуют фульватные комплексы (например, медь (см. рис. 3)), но их количество незначительно в общем балансе фульвокислоты. В речных же водах, где наблюдаются повышенные концентрации Fe, этот элемент полностью связывается фульвокислотой, содержание которой также велико относительно других проб (см. рис. 4). Вероятно, накопление Fe в речных водах связано именно с повышенным содержанием органического вещества.

Картина распределения форм нахождения металлов с гуминовыми кислотами более разнообразная. В речных водах, содержащих низкие концентрации металлов и высокие концентрации органического вещества гумусовой природы, преобладающей формой нахождения является Hu^- . В пробах, отобранных из шахты, доминируют гуминовые формы кальция и магния. В пробе с высоким содержанием цинка (Lu-2) $ZnHu^+$ является преобладающей формой для гуминовой

кислоты. В пробах с наиболее высокими концентрациями меди (Lu-2, Lu-3) и марганца (Lu-2) отмечается увеличение доли форм CuHu⁺ и MnHu⁺. Следует также заметить, что гуминовые кислоты играют значительную роль в миграции Pb, однако в силу достаточно низких концентраций Pb в воде, комплекс PbHu⁺ имеет подчиненное значение в общем балансе гуматных форм.

4. ВЫВОДЫ

Приведенные в работе результаты показывают повышенные содержания Fe, Zn, Ni, Co, Sr, Cd, U в водах района шахты "Люпикко-І" относительно значений геохимического фона. Наибольшие концентрации для U и Sr определены в водах затопленной шахты Люпикко. Максимальные содержания большинства рассмотренных химических элементов рудной специализации (Fe. Zn. Си, Ni, Co, Cd, Pb) определены в пробах воды, отобранных из закопушки и подотвального пруда. При этом пик концентраций этих металлов в воде приходится на точку Lu-2 (закопушка), в то время как наиболее высокие их содержания в донных отложениях определены в точке Lu-3 (подотвальный пруд). Вероятно, это связано с активным растворением атмосферными осадками минералов отвалов в присутствии кислорода воздуха. Результат этих процессов демонстрирует химический состав проб воды и донных отложений, отобранных в точке Lu-2. Затем происходит сток в пруд (застойная вода), где более активно происходит иммобилизация металлов путем их осаждения в виде собственных минералов или в следствие сорбционных процессов.

Можно сделать вывод, что пруд в данной системе выполняет роль приемника не только физического стока подотвальных вод, но и места протекания химических процессов самоочищения воды.

В речных водах района концентрация металлов значительно ниже. Здесь наблюдается второй пик содержания железа, накопление которого в данном случае вероятно объясняется связыванием с органическим веществом. Кроме железа органическое вещество очевидно влияет и на накопление Ca, Mg, а также большинства рассмотренных микрокомпонентов (Mn, Zn, Cu, Cd, Ni, Pb).

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0137-2019-0016 лаборатории моделирования гидрогеохимических и гидротермальных процессов ГЕОХИ РАН. Определение анионного состава и органического вещества в пробах воды и расчет форм нахождения урана выполнены при финансовой поддержке $P\Phi\Phi U$ в рамках научного проекта № 19-33-60030.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Букаты М.Б. Разработка программного обеспечения для решения гидрогеологических задач // Известия Томского политехнического университета. 2002. Т. 305. Вып. 6: Геология, поиски и разведка полезных ископаемых Сибири. С. 348—365.
- 2. *Булах А.Г., Франк-Каменецкий В.А.* Геологическая экскурсия в окрестности Питкяранты. Петрозаводск: Госкарелиздат, 1961. 105 с.
- 3. Бычкова Я.В., Стародымова Д.П., Шайхутдинова К.В., Дягилева Д.Р. и др. Особенности химической подготовки проб донных отложений для мультиэлементного анализа методом ИСП-МС // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2020. № 4. С. 45—54.
- 4. Волошин А.В., Пахомовский Я.А. О стокезите из гранитных пегматитов Кольского п-ова и скарноидов Карелии (Питкяранта) // Тр. Минералогического музея. Вып. 35. Новые Данные о Минералах СССР. М.: Наука, 1988. С. 36—39.
- Духовский А.А., Артамонова Н.А., Иванова Э.И., Никифоров И.О. Объемная модель Салминского массива гранитов рапакиви и закономерности размещения оруденения // Отечественная геология. 1994. № 4. С. 24—32.
- 6. Конышев А.А., Сидкина Е.С., Солдатова Е.А., Догад-кин Д.Н., Громяк И.Н. Особенности поведения химических элементов в системе вода-порода района разрабатываемого карьера бутового камня в Пит-кярантском рудном районе (Карелия) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. № 332. С. 7—19. https://doi.org/10.18799/24131830/2021/3/3098
- 7. *Ларин А.М.* Граниты рапакиви и ассоциирующие породы. СПб.: Наука, 2011. 402 с.
- 8. Литвиненко А.В., Богданова М.С., Карпечко В.А., Литвинова И.А., Филатов Н.Н. Водные ресурсы Карелии: основные проблемы рационального использования и охраны // Тр. Карельского НЦ РАН. 2011. № 4. С. 12—20.
- 9. Литвиненко А.В., Филатов Н.Н., Лозовик П.А., Карпечко В.А. Региональная экология: эколого-экономические основы рационального использования водных ресурсов Карелии // Инженерная экология. 1998. № 6. С. 3—13.
- Методы геохимического моделирования и прогнозирования в гидрогеологии / [С.Р. Крайнов, Ю.В. Шваров, Д.В. Гричук и др.]; Под ред. С.Р. Крайнова. М.: Недра, 1988. 252 с.
- Нефедов Е.И. Берборит, новый минерал // Доклады АН СССР. Серия геологическая. 1967. № 174. С. 189–192.
- 12. Томилина О.В., Паламарчук С.Ф., Яхнин Э.Я., Егоров А.И. Комплект карт геохимической основы государственной геологической карты Российской Федерации // Геохимическое картирование севера европейской территории России в рамках международной программы "Экогеохимия Баренцева региона" и проведение опережающего этапа составления геохимических основ Госгеолкарты—1000 третьего поколения на листы Р-35, 36. Т. 2:

- Отчет о научно-исследовательской работе / отв. исп. В. А. Чекушин. СПб., 2004. 146 с.
- 13. Торопов А.С., Солдатова Е.А., Рихванов Л.П. Формы миграции радионуклидов (U и Th) в природных водах в различных геохимических условиях на основе расчетных и экспериментальных данных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. № 331. С. 7—21. https://doi.org/10.18799/24131830/2020/12/2935
- Courtijn E., Vandecasteele C., Dams R. Speciation of aluminium in surface water // Sci. Total Environ. 1990.
 V. 90. P. 191–202. https://doi.org/10.1016/0048-9697(90)90193-X
- Dinu M.I., Shkinev V.M. Complexation of metal ions with organic substances of humus nature: methods of study and structural features of ligands, and distribution of elements between species // Geochemistry Int. 2020. V. 58. P. 200–211. https://doi.org/10.1134/S0016702920020032
- 16. *Ephraim J.H.*, *Allard B.* Metal ion binding by humic substances / Grenthe I., Puigdomenech I. (eds.) // Modelling in Aquatic Chemistry. Paris, OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. P. 207–244.
- 17. Jordan R.N., Yonge D.R., Hathhorn W.E. Enhanced mobility of Pb in the presence of dissolved natural organic matter//J. Contam. Hydrol. 1997. V. 29. P. 59–80. https://doi.org/10.1016/S0169-7722(96)00087-3
- 18. Konyshev A.A., Sidkina E.S., Cherkasova E.V., Mironenko M.V., Gridasov A.G., Zhilkina A.V., Bugaev I.A. Migra-

- tion forms of heavy metals and chemical composition of surface waters in the "Arsenic" shaft area (Pitkäranta Ore District, South Karelia) // Geochemistry Int. 2020. V. 58. P. 1068–1074. https://doi.org/10.1134/S0016702920090050
- 19. *Larin A.M.* Ore mineralisation / Haapala I., Ramo O.T., Salonsaari P.T. (eds.) // Salmi Batholith and Pitkaranta Ore Field in Soviet Karelia. Espoo, Finland, University of Helsinki, 1991. P. 19–34.
- 20. *Lepokurova O.E., Ivanova I.S.* Geochemistry of iron in organogenic water of Western Siberia, Russia // Proc. Earth Planet. Sci. 2014. V. 10. P. 297–302. https://doi.org/10.1016/j.proeps.2014.08.068
- 21. *Rose A.L.*, *Waite T.D.* Kinetics of iron complexation by dissolved natural organic matter in coastal waters // Mar. Chem. 2003. V. 84. P. 85–103. https://doi.org/10.1016/S0304-4203(03)00113-0
- Savichev O., Soldatova E., Rudmin M., Mazurov A. Geochemical barriers in oligotrophic peat bog (Western Siberia) // Appl. Geochemistry. 2020. V. 113. 104519. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104519
- 23. Soldatova E., Sidkina E., Sun Z. Thermodynamic modeling of aqueous migration of chemical elements in irrigation water // E3S Web Conf. 2020. V. 222. 05022. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022205022
- 24. *Trüstedt O.* Die Erzlagerstätten von Pitkäranta am Ladoga-See // Bull. la Comm. Géologique Finlande 1907. V. 19. P. 243–244. (in German)

CHEMICAL COMPOSITION AND METAL SPECIATION IN WATER NEAR THE MINE "LUPIKKO-I" (PITKYARANTA MINING DISTRICT, KARELIA)

A. A. Konyshev^{a,#}, E. S. Sidkina^{a,##}, E. A. Soldatova^a, E. V. Cherkasova^a, I. A. Bugaev^a, A. S. Toropov^b, D. N. Dogadkin^a, I. N. Gromyak^a, and I. Yu. Nikolaeva^b

 ^a Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, ul. Kosygina, 19, Moscow, 119991 Russia
 ^b Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory, 1, Moscow, 119991 Russia
 [#]E-mail: icelopa@gmail.com
 ^{##}E-mail: sidkinaes@yandex.ru

The study aims to consider the behavior of chemical elements in waters exposed to the mine "Lupikko-I" (Pitkyaranta mining district, Karelia) focusing in particular on ore metal speciation and the forms of their immobilization. The mine "Lupikko-I" was exploited for iron ore extraction. The authors attempt to establish the relationship between the Ristioya River water and the waters that eroded the mine dumps since the local runoff seriously influences river runoff formation. For this purpose, the water samples were taken from the mine "Lupikko-I" (from the water surface and the depth of 2 m), a trial pit and pond within the mine dumps, and the Ristioya River. In addition to the water samples, two samples of sediments were taken from the trial pit and pond bottom. The water samples were analyzed using titration, high-temperature catalytic oxidation, ICP-MS, and ICP-AES. The sediment samples were analyzed by ICP-MS after acid digestion. The thermodynamic model of element speciation and secondary mineral formation was developed in the software package Hydrogeo guided by the principle of equilibrium modeling. The results show high contents of Fe, Zn, Ni, Co, Sr, Cd, and U in the waters connected with the mine "Lupikko-I" and its dumps relative to the values of the geochemical background. The maximum concentrations of these metals are found in the water sampled from the trial pit, while the highest concentrations in bottom sediments are determined for the pond. In the river waters, the concentrations of metals are much lower. The studies show that surface runoff enters a pond with stagnant water after the active mineral dissolution in the mine dumps by precipitation under atmospheric oxygen influence. Studied metals are immobilized in the pond bottom sediments due to the formation of secondary minerals or sorption. It can be concluded that the pond serves as a receiver of the surface runoff connected with the mine dumps and reservoir for chemical processes of water self-purification. The effect of organic matter on the metal speciation water is the most pronounced for the Fe accumulation in the waters of the Lupikko mining area. Calcium, magnesium, and most of the considered trace elements (Mn, Zn, Cu, Cd, Ni, and Pb) show a lower affinity with humic substances.

Keywords: surface water, mine water, pollution, thermodynamic modeling, mine, fulvic acids, humic acids, humic substances, organomineral complexes, secondary minerals

REFERENCES

- 1. Bukaty, M.B. *Razrabotka programmnogo obespecheniya dlya resheniya gidrogeologicheskikh zadach* [Development of software for solving hydrogeological problems]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2002, vol. 305, iss. 6, pp. 348–365. (in Russian)
- 2. Bulakh, A.G., Frank-Kamenetskii, V.A. *Geologicheskaya ekskursiya v okrestnosti Pitkyaranty* [Geological excursion in the vicinity of Pitkyaranta]. Petrozavodsk, Goskarelizdat Publ., 1961, 105 p. (in Russian)
- 3. Bychkova, Ya.V., Starodymova, D.P., Shaikhutdinova, K.V., Dyagileva, D.R., et al. *Osobennosti khimicheskoi podgotovki prob donnykh otlozhenii dlya mul'tielementnogo analiza metodom ISP-MS* [Peculiarities of chemical preparation of bottom sediment samples for multi-element ICP-MS analysis]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4. Geologiya.* 2020, vol. 4, pp. 45–54. (in Russian)
- Voloshin, A.V., Pakhomovskii, Ya.A. O stokezite iz granitnykh pegmatitov Kol'skogo p-ova i skarnoidov Karelii (Pitkranta) [About stokesite from granite pegmatites of the Kola Peninsula and skarnoids of Karelia (Pitkyaranta)]. In: Trudy Mineralogicheskogo Muzeya. Vypusk 35. Novy Dannye o Mineralakh SSSR. Moscow, Nauka Publ., 1998, pp. 36–39. (in Russian)
- Dukhovskii, A.A., Artamonova, N.A., Ivanova, E.I., Nikiforov, I.O. Ob'yomnaya model' Salminskogo massiva granitov rapakivi i zakonomernosti razmeshcheniya orudeneniya [Volumetric model of the Salminsky massif of rapakivi granites and patterns of mineralization distribution]. Otechestvennaya geologiia, 1994, vol. 4, pp. 24–32. (in Russian)
- Konyshev, A.A., Sidkina, E.S., Soldatova, E.A., Dogadkin, D.N., Gromyak, I.N. Features of chemical element behavior in the water-rock system of the rubble stone quarry in Pitkäranta district (Karelia). *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. *Inzhiniring georesursov*. 2021, vol. 332, pp. 7–19. https://doi.org/10.18799/24131830/2021/3/3098. (in
 - https://doi.org/10.18799/24131830/2021/3/3098. (in Russian)
- 7. Larin, A.M. *Granity rapakivi i assotsiiruyushchie porody* [Rapakivi granites and associated rocks]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2011, 402 p. (in Russian)
- 8. Litvinenko, A.V., Bogdanova, M.S., Karpechko, V.A., Litvinova, I.A., Filatov, N.N. *Vodnye resursy Karelii: osnovnye problemy ratsional'nogo ispol'zovaniya i okhrany* [Water resources of Karelia: main problems in rational use and protection]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2011, no. 4, pp. 12–20. (in Russian)
- 9. Litvinenko, A.V., Filatov, N.N., Lozovik, P.A., Karpechko, V.A. Regional'naya ekologiya: ekologo-ekonomicheskie osnovy ratsional'nogo ispol'zovaniya vodnykh resursov Karelii [Regional ecology: ecological and

- economic foundations of the rational use of water resources in Karelia]. *Inzhenernaya ekologiya*, 1998, vol. 6, pp. 3–13. (in Russian)
- 10. Metody geokhimicheskogo modelirovaniya i prognozirovaniya v gidrogeologii [Methods of geochemical modeling and forecasting in hydrogeology]. Krainov S.R., Ed. Moscow, Nedra Publ., 1988, 254 p. (in Russian)
- 11. Nefedov, E.I. *Berborit, novyi mineral* [Berborite, a new mineral]. *Doklady Akademii nauk SSSR. Seriya geologicheskaya*, 1967, vol. 174, pp. 189–192. (in Russian)
- 12. Tomilina, O.V., Palamarchuk, S.F., Yakhnin, E.Ya., Egorov, A.I. Komplekt kart geokhimicheskoi osnovy gosudarstvennoi geologicheskoi karty Rossiiskoi Federatsii. [Set of maps of the geochemical basis of the state geological map of the Russian Federation.] Geokhimicheskoe kartirovanie severa evropeiskoi territorii Rossii v ramkakh mezhdunarodnoi programmy "Ekogeokhimiya Barentseva regiona" i provedenie operezhayushchego etapa sostavleniya geokhimicheskikh osnov Gosgeolkarty-1000 tret'ego pokoleniya na listy R-35, 36 [Geochemical mapping of the European north of Russia within the framework of the international program "Ecogeochemistry of the Barents Region" and the advanced stage of compiling geochemical foundations of the third generation of State Geological Map-1000, sheets R-35, 36], Vol. 2. Sci. Report. St. Petersburg, 2004, 146 p. (in Rus-
- Toropov, A.S., Soldatova, E.A., Rikhvanov, L.P. Formy migratsii radionuklidov (U i Th) v prirodnykh vodakh v razlichnykh geokhimicheskikh usloviyakh na osnove raschetnykh i eksperimental'nykh dannykh [Forms of radionuclides (U and Th) migration in natural waters under different geochemical conditions based on computational and experimental data]. Izvestiya Tomskogo Polytekhnicheskogo univesiteta. Inzhiniring georesursov, 2020, vol. 331, pp. 7–21. https://doi.org/10.18799/24131830/2020/12/2935. (in Russian)
- 14. Courtijn, E., Vandecasteele, C., Dams, R. Speciation of aluminium in surface water. *Sci. Total Environ.*, 1990, vol. 90, pp. 191–202. https://doi.org/10.1016/0048-9697(90)90193-X.
- Dinu, M.I., Shkinev, V.M. Complexation of metal ions with organic substances of humus nature: methods of study and structural features of ligands, and distribution of elements between species. *Geochemistry Int.*, 2020, vol. 58, pp. 200–211. https://doi.org/10.1134/S0016702920020032.
- 16. Ephraim, J.H., Allard, B. Metal ion binding by humic substances. In: *Modelling in Aquatic Chemistry*. Grenthe I., Puigdomenech I., Eds. Paris, OECD, Nuclear Energy Agency, 1997, pp. 207–244.
- 17. Jordan, R.N., Yonge, D.R., Hathhorn, W.E. Enhanced mobility of Pb in the presence of dissolved natural or-

- ganic matter. *J. Contam. Hydrol.*, 1997, vol. 29, pp. 59–80. https://doi.org/10.1016/S0169-7722(96)00087-3.
- Konyshev, A.A., Sidkina, E.S., Cherkasova, E.V., Mironenko, M.V., Gridasov, A.G., Zhilkina, A.V., Bugaev, I.A. Migration forms of heavy metals and chemical composition of surface waters in the "Arsenic" shaft area (Pitkäranta Ore District, South Karelia). *Geochemistry Int.*, 2020, vol. 58, pp. 1068–1074. https://doi.org/10.1134/S0016702920090050.
- 19. Larin, A.M. Ore mineralisation. In: *Salmi Batholith and Pitkaranta Ore Field in Soviet Karelia* / Haapala I., Ramo O.T., Salonsaari P.T., Eds. Espoo, Finland, University of Helsinki, 1991, pp. 19–34.
- Lepokurova, O.E., Ivanova, I.S. Geochemistry of iron in organogenic water of Western Siberia, Russia. *Procedia Earth Planet. Sci.*, 2014, vol. 10, pp. 297–302. https://doi.org/10.1016/j.proeps.2014.08.068.

- 21. Rose, A.L., Waite T.D. Kinetics of iron complexation by dissolved natural organic matter in coastal waters. *Mar. Chem.*, 2003, vol. 84, pp. 85–103. https://doi.org/10.1016/S0304-4203(03)00113-0.
- 22. Savichev, O., Soldatova, E., Rudmin, M., Mazurov, A. Geochemical barriers in oligotrophic peat bog (Western Siberia). *Appl. Geochemistry*, 2020, vol. 113, 104519. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104519.
- 23. Soldatova, E., Sidkina, E., Sun, Z. Thermodynamic modeling of aqueous migration of chemical elements in irrigation water. *E3S Web Conf.*, 2020, vol. 222, 05022. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022205022.
- 24. Trüstedt, O. Die Erzlagerstätten von Pitkäranta am Ladoga-See. *Bull. la Comm. Géologique Finlande*, 1907, vol. 19, pp. 243–244. (in German)

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УЛК 550.45:574.24

БИОГЕОХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОЧВ ПОБЕРЕЖЬЯ ТАТАРСКОГО ПРОЛИВА В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

© 2021 г. Л. А. Гаретова^{1,*}, Е. Л. Имранова¹, О. А. Кириенко¹, Н. К. Фишер¹

¹ Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, ул. Дикопольцева, д. 56, Хабаровск, 680000 Россия *E-mail: micro@ivep.as.khb.ru
Поступила в редакцию 16.09.2021 г.
После доработки 11.10.2021 г.
Принята к публикации 21.10.2021 г.

Проведено исследование распределения органического вещества, углеводородов, летучих органических соединений, фотосинтетических пигментов и микроорганизмов в типичных для юго-западного побережья Татарского пролива почвах в зимний период. В торфяных почвах содержание $C_{\rm орг}$ составляло 42—45, в буроземах 10.0-32.7, в техноземах 7.3-17.9%, содержание углеводородов, соответственно, составляло 590-2780, 130-210 и 110-130 мг/кг. Суммарное содержание фитопигментов в торфяных почвах в среднем было в 6.5 раз выше, чем в буроземах. Во всех типах почв в составе пигментов преобладали каротиноиды. Численность гетеротрофных бактерий варьировала в зависимости от типа почвы (от 0.8 до 68.6 млн KOE/r). Доля нефтеокисляющих бактерий в почвенном бактериальном сообществе составляла от 18.2 до 87.5%, что указывает на высокую степень адаптации микробных сообществ к углеводородам. В составе летучих органических соединений преобладали продукты спиртового, ацетонового и метанового брожения. Данные по содержанию углеводородов и результаты молекулярного и группового состава H-алканов в торфяных почвах показали, что природные H-алканы торфов могут стать причиной возникновения дополнительного углеводородного фона, который с помощью применяемого метода W-спектрофотометрии идентифицируется как нефтяные углеводороды.

Ключевые слова: торфяная почва, буроземы, техноземы, органическое вещество, углеводороды, н-алканы, фитопигменты, микроорганизмы, летучие органические соединения

DOI: 10.31857/S0869780921060096

ВВЕДЕНИЕ

Разрушение исходных природных комплексов характерно для большей части побережья Татарского пролива и обусловлено строительством и расширением морских угольных и нефтяных терминалов, железнодорожных, автомобильных подъездных путей и других коммуникаций, трансформирующих естественное состояние многочисленных водных объектов и почвенных комплексов прибрежных территорий [19].

При экологических исследованиях потенциально неблагоприятных территорий существует необходимость использовать методологии геохимической экологии, геохимии ландшафтов, почвенной микробиологии и т.п. [11]. На территории Дальнего Востока геоэкологические исследования, в основном, сосредоточены на ландшафтах бассейна р. Амур, побережья Охотского моря и вызваны развитием горнопромышленного комплекса. Ландшафты юго-западного побережья Татарского пролива, их почвенные компоненты остаются малоизученными.

Биогеохимические потоки, связанные с различными поллютантами, сосредоточены в пределах органопрофиля почв, где процессы миграции и аккумуляции элементов контролируются составом органического вещества (ОВ) [15]. В органогенном слое сосредоточены биотические компоненты (водоросли, микроорганизмы, беспозвоночные), участвующие как в преобразовании ОВ, так и являющиеся прямыми предшественниками (биопродуцентами) различных типов ОВ, в том числе алифатических углеводородов (УВ) и летучих органических соединений (ЛОС). Преобразование качественной структуры ОВ является фактором, во многом определяющим физикохимические условия почвы, направленность и интенсивность проявления в ней различных геохимических, биохимических процессов. Именно на состав органической компоненты реагируют микробные сообщества, как в природных, так и в антропогенно-преобразованных экосистемах, играя ключевую роль в процессах гумусообразования [25].

В условиях возрастающего антропогенного пресса на компоненты прибрежных ландшафтов особенно сложно дифференцировать природные и антропогенные уровни загрязнения, поскольку на границе континентов и морей наиболее интенсивно идут процессы рассеивания и концентрирования различных соединений. Для корректной интерпретации полученных данных необходима информация об аборигенных углеводородных параметрах почв, в которых углеводородный комплекс является преимущественно автохтонным [6, 20]. Данные по таким почвам важны для понимания генезиса всех других углеводородных состояний почв, в том числе подверженных влиянию техногенного фактора и наличию аллохтонных углеводородов [23].

Кроме того, для уточнения существующих оценок глобального цикла углерода [15] необходимо получение максимально полной информации о величинах пулов углерода в почвах различного генезиса. Оценка основных пулов ОВ особенно важна для понимания процессов накопления углерода в почвах и углеродного обмена между почвами, атмосферой, гидросферой [3]. Поэтому необходимы исследования по определению источников поступления ОВ в почву, условий и продуктов его преобразования для оценки роли органической составляющей почвы в различных природных условиях. Для этого в настоящее время используют различные критерии молекулярно-массового распределения нормальных алканов (н-алканов) в исследуемом объекте [7, 35] Между тем работ, посвященных изучению состава и концентрации н-алканов в фоновых (незагрязненных) почвах, очень мало. Имеются данные о содержании н-алканов в почвах некоторых ненарушенных ландшафтов [1, 7, 30]. Исследования состава и генезиса ОВ почв прибрежных ландшафтов Дальневосточного побережья практически отсутствуют.

Одним из подходов к разделению (дифференциации) природных процессов образования и трансформации ОВ, формирующих природные (фоновые) уровни ОВ, УВ, ЛОС в почвах и антропогенного воздействия на них, на наш взгляд, является исследование состояния почвенного компонента ландшафтов в зимний (межвегетационный) период. Зимний период характеризуется затуханием большинства биохимических процессов в почве и фиксирует состав ОВ и биотических компонентов на конец вегетационного периода. Зимой деятельность микроорганизмов ограничена температурой, поэтому вещества, (природные и антропогенные), накопившиеся в летний период, не подвергаются активной биотрансформации. Также в этот период исключается миграция веществ по профилю почв и с поверхностным стоком. Поступление органических веществ за счет атмосферного переноса ограничивается

снежным покровом, что до теплого периода исключает пространственную миграцию поллютантов. Предполагается, что в зимний период наиболее ярко проявляются различия в составе ОВ и связанных с ним биотических компонентов в разных типах почв.

Целью работы являлось исследование состава и содержания ОВ и связанных с ним биотических компонентов (микроорганизмов и фитопигментов) в почвах Ванинского воднотранспортного узла на побережье Татарского пролива в зимний период.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Территория исследования относится к бассейну Японского моря и представлена глубоко вдающимися в сушу бухтами и многочисленными (более 100) малыми реками, впадающими в море через устьевые озера и в большей или меньшей степени открытые в сторону моря. Климат района исследований умеренно континентальный, формируется под влиянием муссонных процессов, с умеренно холодной снежной зимой и умеренно теплым летом [21]. Средняя годовая температура воздуха -+1.1°C, осадков за холодный период года выпадает от 160 до 300 мм. Средняя глубина промерзания — 155 см. Снежный покров появляется в начале ноября, сходит в конце апреля. Средняя из наибольших декадных высот снежного покрова за зиму - 69 см. Район исследования по принадлежности к морфоструктурам холмисто-увалистый ландшафт. По геоморфологическим условиям участок относится к эрозионно-денудационному. Места для почвенных разрезов выбраны в границах водоохраных зон устьевых областей малых рек Мучке и Токи, которые согласно ВК РФ составляют 100 м (рис. 1).

Ближайшие промышленные объекты — ООО "Ванинская морская судоходная компания" (минимальное расстояние 1224 м в юго-западном направлении), ООО "Токинский лесопильный завод" (1339 м в юго-западном направлении). На правобережной части водосбора р. Токи находится полигон ТКО пгс Ванино. На правом берегу оз. Мучке находится нефтехранилище. В бухте Мучке находится транспортно-перегрузочный комплекс АО "Дальтрансуголь".

Почвы побережья Татарского пролива представлены двумя основными типами — буроземами и торфяными почвами. На водосборной площади р. Мучке и одноименного озера отмечены буроземы (Cambisols): типичный глеевый (разрез 1М) и оподзоленный бурозем (разрез 2М). Названия почв в скобках даны в соответствии с классификацией почв WRB [31]. Для этого района характерно мелколесье. В видовом составе дре-

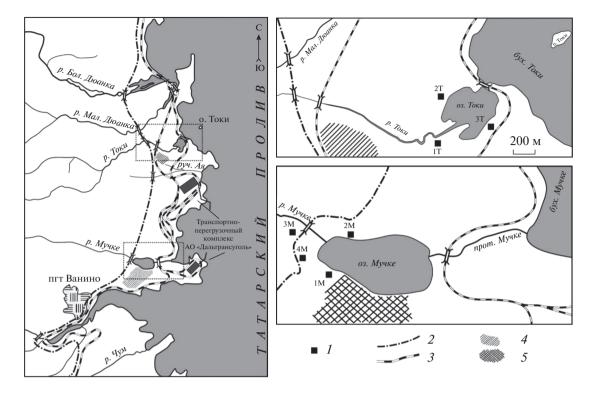


Рис. 1. Карта-схема района исследования. 1 — точки отбора почвенных образцов, 2 — автомобильная дорога, 3 — железная дорога, 4 — полигон твердых коммунальных отходов, 5 — нефтехранилище.

весного яруса помимо берез и лиственниц встречается осина.

Часть почвенного покрова водосбора р. Мучке составляют техноземы (Technosols). Они диагностированы в почвенных разрезах 3М, 4М и представляют собой почвы, в которых верхняя часть горизонтов полностью трансформирована. Глубина трансформации достигает 40-50 см и более. Данный вид почв распространен вдоль автомобильной трассы Совгавань-Монгохто, где ранее проводились земляные работы с отсыпкой техногенными грунтами. В настоящее время идет развитие естественных почвообразовательных процессов, характерных для посттехногенной фазы, почвы покрыты сорной рудеральной травяной растительностью и постоянно подвергаются загрязнению веществами автомобильных выхлопных газов. По составу они представлены щебнем, дресвой, галькой и гравием, суглинком, супесью, доля артефактов составляет 10-20%.

Для водосбора р. Токи характерны торфяные эвтрофные почвы (Euthrophic Histosols). Они занимают в рельефе наиболее пониженные, болотистые участки, где распространены вейниковоосоковые сырые кочкарные луга. Древесные породы (в основном лиственница) произрастают на верховых болотах в угнетенном состоянии или образуют особые болотные экологические формы. Растительный покров характеризуется гос-

подством сфагновых мхов, вересковых кустарничков (багульник, голубика, подбел, клюква), пушиц, росянок. В профиле разреза 1Т (0–16 см) торф коричневый слаборазложившийся, мокрый, уплотнен, задернован, упругий, переход постепенный. В профиле 2Т (0–39 см) — торф среднеразложившийся, серовато-коричневый, мокрый, слегка уплотнен, переход постепенный. В профиле 3Т (0–60 см) торф хорошо разложившийся, мокрый, темно-серый.

Работы проводили в предвегетационный период — во второй декаде марта 2019 г. Средняя температура воздуха в марте 2019 г. составляла $+0.1\,^{\circ}$ С. Температура почвы минус $4\,^{\circ}$ С. Отбор проб почвы осуществлялся после снятия снежного покрова с глубины 0-20 см, в соответствии с требованиями ГОСТ $17.4.4.02-2017^{1}$. Масса объединенной пробы составляла 1 кг. Точки почвенных разрезов представлены на рис. 1.

Определение рН, удельной электропроводности (УЭП) и минерализации (М) водной вытяжки из почв проводили с помощью измерителя комбинированного Seven Multi S-47k, Mettler-Toledo (Швейцария). Содержание $C_{\rm opr}$ в почвах определяли гравиметрическим методом согласно ГОСТу

¹ ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. М.: Стандартинформ, 2018. 10 с. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200158951.

26213-91². Фотосинтетические пигменты определяли согласно стандарту³ в модификации Л.Е. Сигаревой [24]. Концентрацию пигментов определяли спектрофотометрическим методом на спектрофотометре модели UVmini-1240 производства фирмы "Shimadzu", Япония.

Определение содержания УВ в почвах выполняли по методике ПНД Ф 16.1:2.2.22—98⁴. Измерения концентрации УВ проводили на концентратомере КН-2М (Сибэкоприбор, Россия). Элюаты четыреххлористого углерода использовали для хроматографического анализа *н*-алканов (содержания и состава), который осуществляли методом капиллярной газовой хроматографии на газовом хроматографе Кристалл 5000.1 (Хроматэк, Россия), оснащенном пламенно-ионизационным детектором при программировании температуры от 60 до 320°C со скоростью 7° в мин (длина колонки 30 м, жидкая фаза ZВ-5).

Анализ ЛОС проводили методом парофазного анализа в сочетании с газовой хроматографией на хроматографе Кристалл-5000.1, детектор пламенно-ионизационный, капиллярная колонка HP FFAP 50 м \times 0.32 мм \times 0.32 мкм, при температуре от 50 до $200^{\circ}\text{C}^{5,6}$. Для определения содержания ЛОС в почвах навеску нативных образцов в количестве 10 г помещали во флакон объемом 20 см³, закупоривали крышкой с тефлоновой прокладкой, выдерживали 30 минут при 90°С. Затем шприцом брали 1 см³ паровой фазы и вводили в детектор хроматографа. Идентификация компонентов ОВ осуществлялась программой Хроматек-аналитик 2.5 версия 2.5.8.0 ЗАО СКБ "Хроматек" 1995—2005. Хроматографические анализы

² ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. М.: ИПК. Изд-во стандартов, 1991. 8 с. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200023481

URL: https://docs.cntd.ru/document/1200009756.

URL: https://docs.cntd.ru/document/1200097740.

URL: https://docs.cntd.ru/document/556339171.

выполняли в Центре экологического мониторинга ИВЭП ДВО РАН (аналитик Г.М. Филиппова).

Микробиологические анализы почвы производили согласно общепринятым в почвенной микробиологии методам [10]. Результаты выражали в колониеобразующих единицах на грамм абсолютно сухой почвы (КОЕ/г).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 представлена физико-химическая характеристика исследованных почв. Минерализация почвенной вытяжки варьировала от 45.8 до 211.5 мг/л, соответственно изменялась величина УЭП, которая превышала 423 мкСм/см. Величина рН находилась в пределах 4.0-5.85, наиболее кислая реакция среды отмечена в торфяных почвах (1Т и 2Т). Влажность торфяных почв закономерно увеличивалась по сравнению с другими типами почв исследованной территории. Содержание $C_{\text{орг}}$ тесно связано с типом почв. Так, в торфяных почвах водосбора р. Токи содержание Сорг было выше, чем в буроземах и техноземах и составляло 42-45%. Для торфяных почв северовосточной части о. Сахалина было показано [16], что более 60% общего запаса C_{opr} сосредоточено в верхнем горизонте профиля.

Согласно данным Ю.И. Пиковского [22], содержание нефтепродуктов в почве до 100 мг/кг считается "фоновой" концентрацией. В почвах водосбора р. Мучке содержание УВ составляло 110-210 мг/кг, что соответствовало уровню "повышено фоновый". Однако торфяные почвы водосбора р. Токи отличались более высоким (590— 2780 мг/кг) содержанием УВ. Такой уровень по вышеуказанной классификации характеризуется от "умеренного" до "сильного" загрязнения и значительно превышает содержание УВ в мерзлотных почвах Якутии районов нефтедобычи, где среднее содержание УВ было на уровне 697 мг/кг [8]. Вместе с тем доля УВ от $C_{\rm opr}$ в большинстве исследованных образцов почвы не превышала условной границы допустимой перегрузки - $C_{yB}/C_{opr} = 0.26\%$ [14]. Исключение составляла торфяная почва водосбора р. Токи (1Т), где высокий (0.54%) уровень углеводородной перегрузки сопровождался высоким содержанием $C_{\text{орг}}$ и УВ, что обусловлено близостью полигона хранения ТКО. Миграция УВ по профилю почв в зимний период ограничена промерзанием водной фазы. В летний период переход УВ и их производных в водную фазу при гидролитических процессах приводит к выносу водами с 1 кг торфа до 40 мг органики, в которой доля нефтепродуктов достигает 0.7 мг/дм^3 [20].

Формирование состава органического вещества определяется многими факторами, в том числе количественным и качественным составом

³ ГОСТ 17.1.4.02-90. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *а*. М.: ИПК. Изд-во стандартов, 1990. 14 с.

⁴ ПНД Ф 16.1:2.2.22—98. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органогенных, органоминеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектрометрии. М.: Гос. ком. РФ по охране окружающей среды, 2005. 21 с.

⁵ ПНД Ф 14.1:2:4.201-03. Методика выполнения измерений массовой концентрации ацетона и метанола в пробах питьевых, природных и сточных вод газохроматографическим методом. М.: ФГУ Центр экологического контроля и анализа, 2010. 16 с.

URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293780/4293780760.htm.
⁶ ПНД Ф 14.1:2:4.57-96. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовых концентраций ароматических углеводородов в питьевых, природных и сточных водах газохроматографическим методом. М.: ФГБУ ФЦАО, 2017. 18 с.

Вытяжка Почва Образец М, мг/л рΗ УЭП, мкСм/см Весовая влажность, % C_{орг}, % УВ. MГ/ГC_{VB}*, % or C_{onc} 1T 4.70 555.2 45.0 2.78 0.54 2T 211.5 4.08 423.0 44.0 0.26 336.7 1.34 3T 138.5 4.69 277.0 187.1 42.0 0.59 0.12 1M45.8 5.85 91.5 55.3 10.0 0.13 0.11 2M165.0 5.67 330.0 149.0 32.7 0.21 0.06 3M 42.7 5.04 85.4 51.0 7.3 0.13 0.11 99.6 4M 54.8 5.62 109.7 17.9 0.13 0.06

Таблица 1. Физико-химические параметры почв побережья Татарского пролива

первичных продуцентов, поступлением органических поллютантов (антропогенное воздействие), деятельностью микробных сообществ и педобионтов, участвующих в процессах трансформации ОВ. Для южно-таежной зоны Западной Сибири было показано, что преимущественное развитие определенных растительных ассоциаций обусловливает накопление органических веществ, существенно различающихся по химическому составу [13].

Различные продуценты отличаются по пигментному составу, поэтому для оценки их распределения использовали данные по содержанию отдельных фитопигментов и суммарное содержание в почвах хлорофилла a (хл a), хлорофилла b (хл b), хлорофиллов c (хл c) и каротиноидов (кар).

В торфяных почвах суммарное содержание фитопигментов изменялось от 202.2 до 424.6 и в среднем составляло 310.5 мкг/г (рис. 2). Максимальное содержание выявлено в торфяной почве (образец 1Т), отобранной на правом берегу р. Токи, минимальное – в почве, отобранной в лиственничнике (3Т). В почвах территории водосбора р. Мучке суммарное содержание фитопигментов варьировало от 25.7 до 69.4 мкг/г и в среднем было в 6.5 раз ниже, чем в торфяных почвах. При этом их среднее содержание в буроземах М1 и М2 находилось на уровне такового в техноземах (М3, М4) и составляло 47.8 и 47.5 мкг/г, соответственно, что свидетельствует о процессе восстановления органогенного горизонта техногенных почв. Доля хл a составляла от 6.9 до 31.5% при максимуме в составе пигментов торфяной почвы (1М). Хлорофилл b содержался в количестве 7.1-12.9%от суммы пигментов, а содержание хл с варьировало от 10.6 до 19.2%.

Величина отношения хл a/кар варьировала от 0.09 до 0.68, т.е. в составе пигментов доминировали каротиноиды. Аккумулируясь в почвах, каротиноиды становятся источником высокомолекулярных (C_{40}) углеводородов. В летний период растительный материал, поступающий в почву,

или образующийся в ризосфере непосредственно в почве, включается в трофические цепи и многократно используется консументами, разлагается гетеротрофами, а зимой фитопигменты консервируются до начала теплого периода.

В зимний период для почвенных микроорганизмов лимитирующими факторами являются температура, высота снежного покрова, наличие опада, а также низкое содержание свободной воды. Вместе с тем микроорганизмы способны выживать лаже в условиях вечной мерзлоты. Почва является гетерогенной системой с обилием микрозон благоприятных для сохранения и развития микроорганизмов, но не все бактерии и микромицеты устойчивы к низким температурам, часть из них погибает, и общее число их уменьшается. Наибольшая численность гетеротрофных бактерий (ОЧГ), в том числе и нефтеокисляющих (НОБ), отмечена в техногенной почве (образец 4М), отобранной вблизи несанкционированной свалки, минимальное — в торфяной почве (1Т) (рис. 3).

Средний показатель ОЧГ в техногенных почвах водосбора р. Мучке был 56.8 млн KOE/r, что

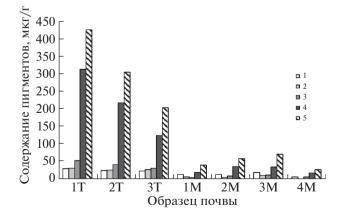


Рис. 2. Содержание фитопигментов в почвах: 1-хл a; 2-хл b; 3-хл c; 4- каротиноиды; 5- сумма фитопигментов.

^{*}Для пересчета содержания УВ на C_{VB} использовали коэффициент 0.867, (–) – не определяли.

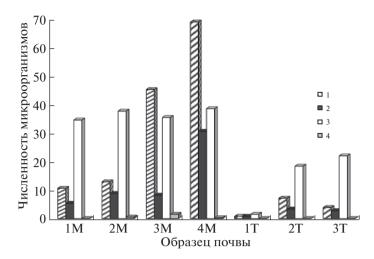


Рис. 3. Численность эколого-трофических групп микроорганизмов в почвах побережья Татарского пролива в зимний период: 1- общая численность гетеротрофов (млн KOE/r) 2- нефтеокисляющие бактерии (млн KOE/r); 3- микромицеты (тыс. KOE/r); 4- актиномицеты (млн KOE/r).

почти в 5 раз выше, чем в буроземах и в 14.5 раз выше, чем торфяных почвах водосбора р. Токи. Такие показатели численности микроорганизмов в зимний период сравнимы с таковыми для мерзлотных почв Якутии (40 млн КОЕ/г) [12]. При этом максимальная численность НОБ в исследованных нами техногенных почвах достигала 30.5 млн КОЕ/г и составляла от 18 до 87% от ОЧГ, тогда как численность НОБ в мерзлотных почвах района нефтедобычи в Якутии составляла только 0.5—10.0 млн КОЕ/г, а их доля от ОЧГ была лишь 0.2—3.3%, что указывает на более высокую потенциальную активность почв побережья Татарского пролива к деструкции УВ нефти по сравнению с мерзлотными почвами Якутии.

Микромицеты, в отличие от бактерий, всегда имеют активную (мицелий) и покоящуюся (споры разных размеров) биомассу. Установлено [17], что споры микромицетов малых размеров так же, как мелкие бактерии, лучше переносят сверхнизкие температуры по сравнению с крупными формами. Некоторые виды почвенных грибов приспособились к развитию в низкотемпературных условиях и могут успешно развиваться под снегом при около нулевых температурах [34]. В исследованных нами буроземах и техноземах численность данной группы микроорганизмов была достаточно стабильна и составляла 34.4—38.4 тыс. КОЕ/г, что значительно выше численности микромицетов в нефтезагрязненных почвах Якутии, где она составляла 0.08-1.0 тыс. KOE/г [12]. B торфяных почвах численность микромицетов изменялась от 1.5 до 21.9 тыс. КОЕ/г, что вероятнее всего обусловлено высокой влажностью торфяных почв. В то же время торфяные почвы отличались максимальным разнообразием микромицетов. В данных почвах выделено 10 видов микроскопических грибов, относящихся к 5 родам. Это Aspergillus wentii, As. nidulans, Verticillium chlamvdosporium, Ver. lecanii, Ver. nigrescens, Acremonium strictum, Trichoderma polysporum, T. hamatum T. viride, Mucor sp. Сравнительно мало в исследованных почвах актиномицетов (0.3–1.5 млн KOE/Γ), в торфяных почвах они не были обнаружены, что свидетельствует о слабой минерализации органического вещества, а также о низкой устойчивости данной группы микроорганизмов к низким значениям рН. Кроме этого актиномицеты не выносят переувлажнения, типичного для торфов. Снижение как общей численности микроорганизмов, так и эколого-трофических групп бактерий в торфяных почвах водосбора р. Токи богатых ОВ вероятнее всего обусловлена не только влиянием низких значений рН (4.08-4.69), высокой влажности, но и присутствием токсичных веществ, в том числе "сфагнолов" в торфе [9]. Наши данные согласуются с исследованиями по влиянию типа почвы на состав микробных сообществ, который определяется величиной рН, а также качеством и количеством ОВ почвы [39].

Предельные углеводороды или *н*-алканы признаны удобными маркерами для получения первичной геохимической информации об источниках происхождения ОВ. При этом используют различные критерии молекулярно-массового распределения *н*-алканов в исследуемом объекте. Это индексы нечетности (СРІ и ОЕР) и группы характерных гомологов [6, 35].

Содержание *н*-алканов в исследованных почвах варьировало от 2.14 до 9.67 мкг/г, что находится на среднем уровне их содержания в верхнем органогенном горизонте почв разных биоклиматических зон [23]. Среднее содержание *н*-алканов в торфяных почвах водосбора р. Токи было в

3 раза выше, чем в почвах водосбора р. Мучке (табл. 2).

Состав н-алканов отличался по диапазону идентифицированных гомологов: в составе н-алканов техногенных почв 3М и 4М встречались короткоцепочечные гомологи $C_{11}-C_{20}$, тогда как н-алканы торфяных почв были представлены исключительно длинноцепочечными гомологами $C_{25}-C_{39}$. Другим отличием состава *н*-алканов в почвах является разница в величине индекса нечетности (СРІ), которая для УВ почв водосбора р. Мучке была меньше 1 (CPI = 0.43-1.0), а для водосбора р. Токи — больше 1 (CPI = 1.1-2.68), т.е. органическое вещество в почвах водосбора р. Токи в малой степени преобразовано, что характерно для торфяных почв. В почвенном образце 4М обнаружен фитан, присутствие которого, наряду с величиной $OEP_{C19} = 1.08$, указывает на влияние микроводорослей в формировании состава ОВ. Наличие короткоцепочечных н-алканов C_{10} – C_{12} без существенного различия по четности-нечетности выявленное в образцах 3М и 4М может быть связано с загрязнением почвы нефтепродуктами и частицами угля [38]. Кроме этого, низкомолекулярные н-алканы могут попадать в почву при горении растительности [32]. Высокомолекулярные н-алканы в почвах находятся в различной степени преобразования, на что указывает различие в величинах индекса ОЕР.

Наши исследования показали, что в торфяных почвах доминирует слабо преобразованное ОВ, на что указывает относительно высокое содержание доли н-алканов синтезированных высшей растительностью ΣC_{25} , C_{27} , C_{29} , $C_{31} = 25.74 - 34.54$, при доминировании гомологов с нечетным количеством атомов углерода в составе μ -алканов [38]. При исследовании состава н-алканов различных типов торфов и растений торфообразователей было показано [27], что величина СРІ для н-алканов торфов меняется от 2 до 8 в зависимости от ботанического состава и условий залегания. Для н-алканов верхнего горизонта торфяных почв величина СРІ составляла 1.19—2.68, что, вероятно, обусловлено вкладом как низших растений (сфагнумовые мхи), так и опадом высших растений. Известно [28], что основными источниками *н*-алкана C₂₃ в почвах являются моховые сообщества, C_{27} — C_{29} — кустарниковые и древесные сообщества, C_{31} — травянистые сообщества. Отклонения в длине углеродной цепи могут наблюдаться из-за различной степени биодеградации соединений в почве, на что указывают различия в величине индекса ОЕР, характеризующего степень преобразования ОВ. По совокупности указанных маркеров в составе ОВ исследованных почв, в основном, преобладает ОВ синтезированное сосудистыми растениями. В исследованных торфяных почвах доминирует высокомолекулярные н-алканы, входящие в состав "торфяных битумов", близких по своим свойствам почвенным липидам [7]. Преобладание соединений с нечетным числом атомов углерода в органогенных горизонтах торфяных почв обусловлено микробиологической трансформацией высшей и низшей растительности, а также слабой миграционной способностью "нечетных" н-алканов [4]. При появлении в почвах техногенных н-алканов это соотношение меняется в сторону увеличения доли четных атомов углерода. Такая картина наблюдалась нами в техногенных почвах, где величина СРІ варьировала от 1.0 до 0.43. Также в этих почвах были идентифицированы отдельные н-алканы $(C_{10}-C_{20})$, входящие в состав нефтепродуктов. Обычно легкие н-алканы в первую очередь подвергаются фотохимической и микробиологической деструкции, но в зимний период они сохраняют свою структуру.

Массовая доля н-алканов в совокупности с величиной СРІ является индикатором глубины гумификации растительных и животных остатков в почве [4]. По данному признаку распределение н-алканов в верхнем горизонте торфяных почв носит аккумулятивный характер и связано с высоким (42-45%) содержанием Сорг. Механизм образования насыщенных углеводородов в процессе педогенеза в почвах практически одинаков [4]. Количественные отличия, в частности, достаточно высокая доля $\Sigma C_{20} - C_{25} = 19.66 - 20.54\%$ в техногенных почвах характеризует достаточно высокий вклад микробной и/или микробно-деструктивной составляющей в восстановление их органогенного горизонта. Аналогичные результаты были получены нами [5] при исследовании техногенных грунтов городской промзоны.

Особое место среди органических веществ в почве занимают ЛОС, которые имеют в основном двойной генезис. Они могут быть спутниками нефтяного загрязнения, а также образовываться в почве в результате микробиологического преобразования углеводных и углеводородных субстратов. Известно [26], что в процессе деструкции нефти наблюдается уменьшение доли насыщенных алифатических структур, накопление ароматических углеводородов и кислородсодержащих соединений, которые являются промежуточными продуктами метаболизма при микробном окислении углеводородов нефти. В зимний период при отсутствии миграции ЛОС в сопредельные среды суммарное содержание ЛОС в исследованных почвах составляло 2.7-25.0 мг/дм³, (в среднем 13.21 мг/дм³) (табл. 3). Источниками ЛОС бензольного ряда обычно являются нефть и уголь [33]. Бензол подвержен микробиологическому разложению в почвах. Уровни его деструкции определяются содержанием ОВ в почвах, обеспе-

Таблица 2. Состав молекулярных маркеров в почвах побережья Татарского пролива

	х маркеров в почвах побережья Татарского пролива Образцы почвы								
Компоненты	1 M	1 M 2 M 3 M 4 M		1T	2T	3T			
C _{opr} , %	10.0	32.7	7.3	17.9	45.0	44.0	42.0		
УВ, мг/г	0.13	0.21	0.11	0.13	2.78	1.34	0.59		
Содержание н-алканов, мкг/г	3.14	2.47	2.14	2.53	7.78	3.95	9.67		
Групповой состав H -алканов, $\%$ от общей площади пиков									
C_{10}	_	_	_	6.641	_	_	_		
C ₁₁	3.373	_	8.099	5.826	_	_	_		
C ₁₂	_	_	6.671	6.317	_	_	_		
C ₁₅	5.953	_	_	_	_	_	_		
C ₁₉	_	_	_	5.066	_	_	_		
C_{20}	5.092	_	_	4.671	_	_	_		
C ₂₂	4.429	3.979	6.613	5.852	_	_	_		
C ₂₃	4.626	4.829	_	_	_	_	_		
C ₂₄	3.122	4.265	7.366	5.525	_	_	_		
C ₂₅	6.981	6.591	6.563	3.610	1.455	_	_		
C ₂₆	5.395	8.343	11.096	5.233	1.573	_	_		
C ₂₇	10.646	5.835	_	4.242	2.939	4.344	1.749		
C ₂₈	7.366	8.731	9.213	6.688	3.279	10.121	3.735		
C ₂₉	_	4.155	_	_	14.139	7.750	2.648		
C ₃₀	3.748	6.599	8.455	3.184	3.897	9.084	2.652		
C ₃₁	6.271	_	5.453	3.781	25.519	13.643	4.671		
C ₃₂	5.997	6.223	4.777	2.728	6.189	_	4.195		
C ₃₃	_	_	_	_	11.259	_	4.817		
C ₃₄	7.958	6.304	7.929	7.180	8.709	3.288	16.810		
C ₃₅	5.132	9.794	9.777	6.686	10.042	19.740	15.471		
C ₃₆	6.96	6.855	7.987	6.303	3.496	5.162	18.214		
C ₃₇	6.95	8.575	_	5.734	7.503	15.300	15.572		
C ₃₉	_	9.022	_	_	_	11.570	9.465		
Фитан i - C_{20} , мкг/г	_	_	_	0.47	_	_	_		
∑нечетных	49.932	48.801	29.892	34.945	72.856	72.347	54.393		
	50.067	51.299	70.107	60.322	27.143	27.655	45.606		
CPI	1.00	0.95	0.43	0.58	2.68	2.62	1.19		
$\Sigma C_{25} - C_{39}$	73.40	87.03	71.25	55.37	100.0	100.0	100.0		
$\Sigma C_{20} - C_{25}$	20.70	18.81	20.54	19.66	1.455	_	_		
$\Sigma C_{25}, C_{27}, C_{29}, C_{31}$	34.54	16.58	12.02	11.63	44.05	25.74	9.068		
$\Sigma C_{23} - C_{25} / \Sigma C_{27} - C_{31}$	0.68	1.10	1.20	0.45	0.03	_	_		
OEP _{C11}	_	_	1.21	0.46	_	_	_		
OEP _{C19}	_	_	_	1.08	_	_	_		
OEP_{C23}	0.61	0.59	_	_	_	_	_		
OEP_{C25}	0.82	0.52	0.35	0.33	0.92	_	_		
OEP _{C27}	0.83	0.34	_	0.36	0.61	0.43	0.47		
OEP _{C29}	_	0.27	_	_	1.97	0.40	0.41		
OEP _{C31}	0.64	_	0.41	0.64	2.53	1.50	0.68		
OEP _{C33}	_	_	_	_	0.76	_	0.23		
OEP _{C35}	0.34	0.74	0.61	0.50	0.82	2.34	0.44		
OEP _{C37}	1.00	1.25	_	0.91	2.15	2.96	0.85		
	1	. = =			I	1			

Примечание: (-) — не обнаружено (ниже чувствительности прибора).

Таблица 3. Содержание ЛОС в почвах водосборов рек Мучке и Токи

Компоненты, мг/дм ³			Класс опасности					
	1 M	2M	3M	4M	1T	2T	3T	Класс опасности
Ацетальдегид	4.059	3.014	2.410	3.257	3.074	0.232	2.308	3
Ацетон	4.205	2.129	1.884	2.591	4.252	0.047	3.829	4
Бензол	0.004	0.006	_	0.016	0.021	_	0.008	1
Бутанол	_	0.093	_	_	0.217	0.669	0.239	3
Гексан	0.412	0.173	0.127	0.725	0.568	0.188	0.198	3
Изобутанол	_	1.701	_	_	_	_	_	3
Изопропилбензол	0.084	0.054	_	0.005	0.075	0.010	0.029	3
Метанол	4.518	5.257	5.925	5.297	12.954	_	3.660	2
Метилацетат	_	_	_	_	_	0.033	_	4
М-ксилол	0.006	0.004	0.011	0.009	_	1.484	_	3
О-ксилол	0.081	0.015	0.038	0.022	0.033	0.005	0.016	3
Π -ксилол	0.058	1.117	0.052	_	2.930	_	2.339	3
Пропанол-2	0.065	0.109	_	0.085	0.532	_	0.219	2
Толуол	0.008	0.059	0.017	0.016	0.058	0.003	0.076	4
Этилацетат	1.016	0.098	0.263	0.212	0.322	0.029	0.518	4
Сумма ЛОС	14.516	13.829	10.727	12.235	25.036	2.700	13.439	

Примечание (-) — не обнаружено.

чивающим активность углеводородокисляющих микроорганизмов [37].

Нормативные документы по содержанию большинства ЛОС в почвах в настоящее время отсутствуют. Определены ПДК некоторых ароматических соединений: бензола, толуола, ксилолов — $0.3 \, \mathrm{Mr/kr}$ и изопропилбензола — $0.5 \, \mathrm{Mr/kr}$, позволяющие ориентировочно оценить степень загрязнения почв.

Обращает на себя внимание относительно высокое (от 3.66 до 12.95 мг/дм³) содержание метанола в исследованных почвах. Вероятнее всего это обусловлено тем, что метан, образующийся в процессе метанового брожения органических веществ в период вегетации, накапливается в почве, где происходит его гидроксилирование с образованием метанола, который сорбируется ОВ и минеральными частицами почвы. При антропогенных нарушениях, чаще всего создаются неблагоприятные условия для развития метанотрофов и/или ограничиваются диффузия и перенос метана к метанотрофам, что способствует снижению потребления метана и, соответственно, уменьшению содержания продуктов его окисления [29]. Процессы трансформации метана могут осуществлять многие представители метанотрофных бактерий, в частности бактерии сем. Methylocystaсеае и Proteobacteria [18]. Метанотрофы развиваются в условиях, где существует взаимодействие между кислородными и бескислородными средами. Оптимальная активность большинства метанотрофов приурочена к обстановкам с рН, близким к нейтральным величинам, мезофильным температурным режимом и низкой соленостью [36].

Подавляющее большинство идентифицированных в почве ЛОС являются веществами нерастворимыми или слаборастворимыми в воде, поэтому в почве они присутствуют в составе микропленок или эмульсий и, соответственно, мигрировать по почвенному профилю, а также поступать с поверхностным стоком в водотоки в теплый период будут именно в виде водных эмульсий, а не истинных растворов [2]. Включение в метаболические процессы неустойчивых и устойчивых подвижных продуктов трансформации (спиртов, альдегидов, кетонов, сложных эфиров и других оксисоединений) имеет явные негативные последствия, поскольку основная часть этих соединений экологически опасна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время усиливается тенденция изучения почв с учетом их взаимодействия со смежными средами: атмосферой, земной корой и гидросферой [3]. Почву стараются рассматривать не изолированно, а как важное звено в сложных системах "атмосфера \leftrightarrow почвы \leftrightarrow грунтовые воды"; "атмосфера \leftrightarrow почвы \leftrightarrow гидросфера". Исследование почвы в зимний период, при отсут-

⁷ СанПиН 1.2.3685-21. "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания". 960 с. URL: https://docs.cntd.ru/document/573500115

ствии таких взаимодействий может служить одним из подходов к пониманию процессов, протекающих в почвах, а качественный и количественный состав ОВ и связанных с ним биотических компонентов в зимний период рассматривать как фоновое состояние, позволяющее зафиксировать результаты вегетационной деятельности в различных типах почв.

В зимний период в почвах законсервировано ОВ, различного химического состава и генезиса. В течение зимнего периода лабильные органические вещества почвы защищены от биодеградации и миграции в сопряженные среды, а вещества с устойчивой структурой стабилизированы вследствие ограничения влияния физико-химических факторов. Таким образом, зимний период является наряду с геохимическими барьерами, дополнительным барьером на пути миграции ОВ из почв.

Установлено, что углеводороды в торфяных почвах способны формировать уровни, значительно (в 6—28 раз) превосходящие их фоновый показатель. Сопоставляя данные по содержанию УВ и результаты молекулярного и группового состава *н*-алканов в торфяных почвах, можно заключить, что природные *н*-алканы торфов могут стать причиной возникновения дополнительного углеводородного фона, который с помощью применяемого метода ИК-спектрофотометрии идентифицируется как нефтяные углеводороды.

Содержание фитопигментов в почве отражает состав продуцентов, участвующих в обогащении почв органическим веществом. В составе пигментов всех типов почв преобладали каротиноиды (хл a/кар = 0.09–0.68), что, вероятно, характерно для межвегетационного периода, так как каротиноиды в большей степени, чем хлорофиллы устойчивы к окислению и микробной трансформации.

Анализ пигментного состава почв и распределения молекулярных маркеров (*н*-алканов) показал, что в формировании торфяных почв района исследования доминирующую роль играют травянистые растения. В процессе восстановления органогенного горизонта техногенных почв заметную роль играет микробная и/или микробнодеструктивная составляющая, что подтверждается высокой численностью гетеротрофных, в том числе нефтеокисляющих бактерий.

Зимние условия способствуют стабилизации и сохранению ЛОС в органогенном горизонте почв. В теплый период года органические вещества, в том числе УВ и ЛОС, содержащиеся в почвах прибрежных ландшафтов вместе со стоком могут попадать в малые реки, а затем в морскую акваторию.

Авторы выражают благодарность в.н.с. ИВЭП ДВО РАН, к.б.н. М.А. Климину за помощь в выполнении анализов и н.с. ИГД ДВО РАН А.М. Кошелькову за отбор почвенных образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Анохина Н.А., Демин В.В., Завгородняя Ю.А. Состав μ -алканов и μ -метил-кетонов в почвах парковой зоны Москвы // Почвоведение. 2018. № 6. С. 683—692
- Баженова О.К., Бурмин Ю.К., Соколов Б.А., Хаин В.Е. Геология и геохимия нефти и газа. М.: МГУ, 2004. С. 144—181.
- Водяницкий Ю.Н. Тенденции развития химии почв // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2010. № 66. С. 64—82.
- 4. Габов Д.Н., Безносиков В.А., Кондратенок Ю.М., Груздев И.В. Насыщенные углеводороды в фоновых и загрязненных почвах Предуралья // Почвоведение. 2010. № 10. С. 1190—1196.
- 5. *Гаретова Л.А.*, Фишер Н.К., Имранова Е.Л., Кириен-ко О.А., Кощельков А.М. Особенности формирования органических соединений в грунтах и донных отложениях промзоны г. Хабаровск // Геохимия. 2021. Т. 66. № 5. С. 464—472.
- 6. Геннадиев А.Н., Завгородняя Ю.А., Пиковский Ю.И., Смирнова М.А. Алканы как компоненты углеводородного состояния почв: поведение, индикационное значение // Почвоведение. 2018. № 1. С. 37—47.
- 7. Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Смирнова М.А., Жидкин А.П., Ковач Р.Г. Углеводороды в почвах фоновых таежных ландшафтов (юго-западная часть Устьянского плато) // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5, география. 2016. № 3. С. 90—97.
- 8. Глязнецова Ю.С., Чалая О.Н., Лифшиц С.Х., Зуева И.Н. Мониторинг состояния нефтезагрязненных почв криолитозоны. ПЭММЭ, XXIX. 2018. № 4. С. 111—128.
- 9. Головченко А.В., Добровольская Т.Г., Семенова Т.А., Богданова О.Ю., Кухаренко О.С. Влияние температуры на структуру микробных сообществ верхового торфяника (модельный опыт) // Вестник ТГПУ. 2010. Вып. 3(93). С. 92—100.
- 10. Егоров Н.С. Руководство к практическим занятиям по микробиологии. М.: МГУ, 1995. 224 с.
- 11. *Ермаков В.В.* Геохимическая экология и биогеохимические критерии оценки экологического состояния таксонов биосферы // Геохимия. 2015. № 3. С. 203—221.
- 12. *Ерофеевская Л.А.* Разработка способа очистки мерзлотных почв и грунтов от нефтезагрязнений в природно-климатических условиях Якутии: дис. ... канд. биол. н. Якутск, 2018. 248 с.
- 13. Инишева Л.И., Юдина Н.В., Головченко А.В., Савельева А.В. Биохимические факторы формирования состава болотных вод и миграция веществ в системе геохимически сопряженных ландшафтов олиготрофных болот // Почвоведение. 2021. № 4. С. 420—428.
- 14. *Кремлева Т.А*. Геохимические факторы устойчивости водных систем к антропогенным нагрузкам: дис. ... д. хим. н. Тюмень: ТГУ, 2015. 260 с.
- 15. *Кудеяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А., Борисов А.В. и др.* Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. 315 с.
- 16. Липатов Д.Н., Щеглов А.И., Манахов Д.В., Брехов П.Т. Пространственная изменчивость запасов органического углерода в торфяных почвах и глее-

- земах северо-востока острова Сахалин // Почвоведение. 2021. № 2. С. 211–223.
- 17. *Марфенина О.Е.*, *Никитин Д.А.*, *Иванова А.Е.* Структура грибной биомассы и разнообразие культивируемых микромицетов в почвах Антарктиды (станция Прогресс и Русская) // Почвоведение. 2016. № 8. С. 991—999.
- 18. Намсараев Б.Б., Русанов И.И., Мицкевич И.Н., Веслополова Е.Ф., Большаков А.М. и др. Микробное некультивируемое сообщество осадков Гыданской губы и Енисейского залива Карского моря // Океанология. 2014. Т. 54. № 3. С. 338—348.
- 19. *Никаноров А.М., Брызгало В.А.* Антропогенная нагрузка на устьевые области рек Дальнего Востока в современных условиях // Вода: химия и экология. 2012. № 2. С. 11—17.
- Одинцова Т.А. Разработка технологии идентификации и мониторинга нефтяных загрязнений: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Пермь: ГИ УРО РАН, 2010. 24 с.
- 21. *Петров Е.С., Новороцкий П.В., Леншин В.Т.* Климат Хабаровского края и Еврейской автономной области. Владивосток-Хабаровск: Дальнаука, 2000. 203 с.
- 22. Пиковский Ю.И., Геннадиев А.Н., Чернянский С.С., Сахаров Г.Н. Проблемы диагностики и нормирования загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами // Почвоведение. 2003. № 9. С. 1132—1140.
- 23. Пиковский Ю.И., Смирнова М.А., Геннадиев А.Н., Завгородняя Ю.А. и др. Параметры самородного углеводородного состояния почв различных биоклиматических зон // Почвоведение. 2019. № 11. С. 1307—1321.
- 24. *Сигарева Л.Е.* Хлорофилл в донных отложениях Волжских водоемов. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2012. 217 с.
- Федотов Г.Н., Лысак Л.В. О возможной роли микроорганизмов в образовании гумусовых веществ в почвах // ДАН. 2014. Т. 455. № 1. С. 114—117.
- 26. *Щемелинина Т.Н., Анчугова Е М., Лаптева Е.М., Василевич Р.С. и др.* Моделирование технологии "контурного заводнения" в микрокосмах // Почвоведение. 2020. № 2. С. 219—229.
- 27. *Юдина Н.В.*, *Савельева А.В*. Углеводороды в растениях торфообразователях и торфах олиготрофноевтрофных болот Западной Сибири // Геохимия. 2008. № 1. С. 84–91.
- 28. Bush R. T., Mcinerney F.A. Influence of temperature and C4 abundance on n-alkane chain length distributions

- across the central USA // Organic Geochemistry. 2015. \mathbb{N}_{2} 79. P. 65–73.
- 29. Chen Y., Day S.D., Shrestha R.K., Strahm B.D., Wiseman P.E. Influence of urban land development and soil rehabilitation on soil—atmosphere greenhouse gas fluxes // Geoderma. 2014. V. 226–227. P. 348–353.
- 30. Gocke M., Wiesenber G.L.B., Kuzyakov Y. Differentiation of plant derived organic matter in soil, loess fnd rhizoliths based on n-alkane molecular proxites // Biogeochemistry. 2013. V. 112. № 1-3. P. 23–40.
- 31. IUSS Working Group WRB, World Reference Base for Soil Resources 2014, International Soil Classification System for Naming Soil and Creating Legends for Soil Maps, World Soil Resources Reports No. 106 (UN Food and Agriculture Organization, Rome, 2015).
- 32. Kuhn Th.K., Krull E.S., Bowater A., Grice K., Gleixner G. The occurrence of short chain n-alkanes with an even over odd predominance in higher plants and soils // Organic Geochemistry. 2009. V. 41. № 2. P. 88–95.
- 33. Malone R., Warner R.W., Evangelou V.P., Wong J.L. Transport of benzene and trichloroethylene through landfill soil liner mixed with coal slurry // Waste Management Res. 1994. V. 12. P. 417–428.
- Panikov N.S. Subzero Activity of Cold-Adapted Yeasts // Cold-Adapted Yeasts. Berlin: Springer, 2014. P. 295–323.
- 35. *Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M.* The biomarker guide. Second Edition I, II, Cambridge: University Press, 2005. 1155 p.
- 36. Serrano-Silva N., Sarria-Guzman Y., Dendooven L., Luna-Gudo M. Methanogenesis and Methanotrophy in Soil: A Review // Pedosphere. 2014. V. 24. № 3. P. 291–307.
- 37. Soares A.A., Albergaria J.T., Domingues V.F., Conceicao M. et al. Remediation of soils combining soil vapor extraction and bioremediation: Benzene // Chemosphere. 2010. V. 80. № 7. P. 823–828.
- Sojinu S.O., Sonibare O.O., Ekundayo O., Zeng E.Y. Assessing anthropogenic contamination in surface sediments of Niger Delta, Nigeria with fecal sterols and nalkanes as indicators // Sci. Total Environ. 2012. V. 441. P. 89–96.
- 39. Wakelin S.A., Macdonald L.M., Rogers S.L., Gregg A.L., Bolger T.P., Baldock J.A. Habitat selective factors influencing the structural composition and functional capacity of microbial communities in agricultural soils. // Soil Biol. Biochemistry. 2008. V. 40. № 3. P. 803–813.

BIOGEOCHEMICAL COMPOSITION OF SOILS OF TNE COAST OF TNE TATAR STRAIT IN WINTER

L. A. Garetova^{a,#}, E. L. Imranova^a, O. A. Kirienko^a, and N. K. Fisher^a

^a Institute of Water and Ecological Problems, Far East Branch, Russian of Sciences, Dikopoltseva str., 56, Khabarovsk, Russia, 680000

#E-mail: micro@ivep.as.khb.ru

Assessment of the distribution of organic compounds (CO) and biotic components in soils in the winter (pregrowing) period contributes to obtaining the most complete information for understanding the processes of carbon accumulation in soils of various genesis and carbon exchange between soils, atmosphere, and hydrosphere. This study was carried out to assess the composition of OC (C_{org}), hydrocarbons (HC), volatile organic compounds (VOC) and biotic components (microorganisms and phytopigments) in various types of soils during winter period. Samples were collected from the main types of soils on the southwestern coast of

the Tatar Strait: peat soils (Euthrophic Histosols), burozems (Cambisols), and technogenic soils (Technosols). The winter period is characterized by attenuation of most biochemical processes in the soil and fixes the composition of OC and biotic components at the end of the growing season. In peat soils, the C_{org} content was 42–45, in burozems 10.0–32.7, and in technozems 7.3–17.9%. The HC content was 590–2780, 130–210, and 110-130 mg/kg, respectively. The study of the molecular weight distribution of n-alkanes made it possible to establish that natural HC in peat soils are able to form levels significantly (6–28 times) higher than the background indicators of HC content. The accumulation in soils of a significant (up to 25.03 mg/dm³) amount of VOCs is due to the presence of low temperatures and snow cover, which prevent their evaporation and migration into the conjugated environments, VOCs are dominated by microbiological transformation products (acetone, acetaldehyde, methanol). The total number of heterotrophic bacteria varied depending on the type of soil (from 0.8 to 68.6 million CFU/g). The proportion of oil-oxidizing bacteria ranged from 18.2 to 87% of the number of heterotrophs; the number of micromycetes varied from 1.5 to 38.4 thousand CFU/g. The pigments in all types of soils were dominated by carotenoids (Chl. a/car = 0.09-0.68), which is associated with their resistance to oxidation and biodegradation. The microbial and/or microbial-destructive component Σ C20-C25 = 19.7-20.5% plays a significant role in the process of restoration of the organogenic horizon of technogenic soils, which is consistent with the maximum (68.6 million CFU/g) number of heterotrophic bacteria, among which the ability to oxidize oil was up to 87%. The absence of actinomycetes in peat soils is due to low (4.08–4.7) pH values and excessive waterlogging.

Keywords: peat soil, burozems, technozems, organic compound, hydrocarbons, n-alkanes, phytopigments, microorganisms, volatile organic compounds

REFERENCES

- 1. Anokhina, N.A., Demin, V.V., Zavgorodnyaya, Yu.A. *Sostav n-alkanov i n-metil-ketonov v pochvakh parkovoi zony Moskvy* [Composition of n-alkanes and n-methyl-ketones in soils of the park zone in Moscow]. *Pochvovedenie*, 2018, no. 6, pp. 683–692. (in Russian)
- Bazhenova, O.K., Burmin, Yu.K., Sokolov, B.A., Khain, V.E. *Geologiya i geokhimiya nefti i gaza* [Geology and geochemistry of oil and gas]. Moscow, MGU Publ., 2004, pp.144–181. (in Russian)
- 3. Vodyanitskii, Yu.N. *Tendentsii razvitiya khimii pochv* [Development trend of soil chemistry]. *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*, 2010, no. 66, pp. 64–82. (in Russian)
- 4. Gabov, D.N., Beznosikov, V.A., Kondratenok, Yu.M., Gruzdev, I.V. *Nasyshchennye uglevodorody v fonovykh i zagryaznennykh pochvakh Predural'ya* [Saturated hydrocarbons in background and contaminated soils of CisUrals region]. *Pochvovedenie*, 2010, no. 10, pp. 1190–1196. (in Russian)
- Garetova, L.A., Fisher, N.K., Imranova, E.L., Kirienko, O.A., Koshchel'kov, A.M. Osobennosti formirovaniya organicheskikh soedinenii v gruntakh i donnykh otlozheniyakh promzony g. Khabarovsk [Features of the formation of organic compounds in soils and bottom sediments of the industrial zone of Khabarovsk]. Geokhimiya, 2021, vol. 66, no.5, pp. 464–472. (in Russian)
- Gennadiev, A.N., Zavgorodnyaya, Yu.A., Pikovskii, Yu.I., Smirnova, M.A. Alkany kak komponenty uglevodorodnogo sostoyaniya pochv: povedenie, indikatsionnoe znachenie [Alkanes as components of the hydrocarbon state of soils: behavior and indicative value]. Pochvovedenie, 2018, no. 1, pp. 37–47. (in Russian)
- 7. Gennadiev, A.N., Pikovskii, Yu.I., Smirnova, M.A., Zhidkin, A.P., Kovach, R.G. *Uglevodorody v pochvakh fonovykh taezhnykh landshaftov (yugo-zapadnaya chast' Ust'yanskogo plato)* [Hydrocarbons in the soils of the background taiga landscapes (southwestern part of the Ustyanskoe plateau)]. *Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 5, geografija*, 2016, no. 3, pp. 90–97. (in Russian)

- 8. Glyaznetsova, Yu.S., Chalaya, O.N., Lifshits S.Kh., Zueva, I.N. *Monitoring sostoyaniya neftezagryaznenny-kh pochv kriolitozony* [Monitoring of the state of oil-contaminated soils of the permafrost zone]. *PEMME*, *XXIX*. 2018, no. 4, pp. 111–128. (in Russian)
- 9. Golovchenko, A.V., Dobrovol'skaya, T.G., Semenova, T.A., Bogdanova, O.Yu., Kukharenko, O.S. *Vliyanie temperatury na strukturu mikrobnykh soobshchestv verkhovogo torfyanika (model'nyi opyt)* [Influence of temperature on the structure of microbial communities of high-moor peat bog (model)]. *Vestnik TGPU*, 2010, vol. 3(93), pp. 92–100. (in Russian)
- 10. Egorov, N.S. *Rukovodstvo k prakticheskim zanyatiyam po mikrobiologii* [A guide to practical exercises in microbiology]. *Moscow, MGU Publ.*, 1995, 224 p. (in Russian)
- 11. Ermakov, V.V. Geokhimicheskaya ekologiya i biogeokhimicheskie kriterii otsenki ekologicheskogo sostoyaniya taksonov biosfery [Geochemical ecology and biogeochemical criteria for assessing the ecological state of taxa in the biosphere]. Geokhimiya, 2015, no. 3, pp. 203–221. (in Russian)
- 12. Erofeevskaya, L.A. *Razrabotka sposoba ochistki merzlotnykh pochv i gruntov ot neftezagryaznenii v prirodno-klimaticheskikh usloviyakh Yakutii* [Development of a method for cleaning permafrost soils and soils from oil pollution in the natural and climatic conditions of Yakutia]. Cand. Sci. (Biolog.) dissertation. Yakutsk, 2018, 248 p. (in Russian)
- 13. Inisheva, L.I., Yudina, N.V., Golovchenko, A.V., Savel'eva, A.V. Biokhimicheskie faktory formirovaniya sostava bolotnykh vod i migratsiya veshchestv v sisteme geokhimicheski sopryazhennykh landshaftov oligotrofnykh bolot [Biochemical factors of the formation of the composition of bog waters and the migration of substances in the system of geochemically coupled landscapes of oligotrophic bogs]. Pochvovedenie, 2021, no. 4, pp. 420–428. (in Russian)
- 14. Kremleva, T.A. *Geokhimicheskie faktory ustoichivosti vodnykh sistem k antropogennym nagruzkam* [Geochemical factors of water system resistance to anthropogenic impact]. Doktoral Sci. (Chem.) dissertation,

- Tyumen, Tyumen State University, 2015, 260 p. (in Russian)
- 15. Kudeyarov, V.N., Zavarzin, G.A., Blagodatskii, S.A., Borisov, A.V., et al. *Puly i potoki ugleroda v nazemnykh ekosistemakh Rossii* [Pools and fluxes of carbon in terrestrial ecosystems in Russia]. Moscow, Nauka Publ., 2007, 315 p. (in Russian)
- Lipatov, D.N., Shcheglov, A.I., Manakhov, D.V., Brekhov, P.T. Prostranstvennaya izmenchivost' zapasov organicheskogo ugleroda v torfjanykh pochvakh i gleezemakh severo-vostoka ostrova Sakhalin [Spatial variability of organic carbon stocks in peat soils and gleys in northeastern Sakhalin Island]. Pochvovedenie, 2021, no. 2, pp. 211–223. (in Russian)
- 17. Marfenina, O.E., Nikitin, D.A., Ivanova, A.E. Struktura gribnoi biomassy i raznoobrazie kul'tiviruemykh mikromitsetov v pochvakh Antarktidy (stantsiya Progress i Russkaya) [The structure of fungal biomass and the diversity of cultivated micromycetes in the soils of Antarctica (Progress and Russkaya stations)]. Pochvovedenie, 2016, no. 8, pp. 991–999. (in Russian)
- 18. Namsaraev, B.B., Rusanov, I.I., Mitskevich, I.N., Veslopolova, E.F., Bol'shakov, A.M., et al. *Mikrobnoe nekul'tiviruemoe soobshchestvo osadkov Gydanskoi guby i Eniseiskogo zaliva Karskogo morya* [Microbial uncultivated community of sediments of the Gydan Bay and the Yenisei Bay of the Kara Sea]. *Okeanologiya*, 2014, vol. 54, no. 3, pp. 338–348. (in Russian)
- 19. Nikanorov, A.M., Bryzgalo, V.A. *Antropogennaya nagruzka na ust'evye oblasti rek Dal'nego Vostoka v sovremennykh usloviyakh* [Anthropogenic load on the estuarine areas of the rivers of the Far East in modern conditions]. *Voda: khimiya i ekologiya*, 2012, no. 2, pp. 11–17. (in Russian)
- Odintsova, T.A. Razrabotka tekhnologii identifikatsii i monitoringa neftyanykh zagryaznenii [Development of technology for identification and monitoring of oil pollution]. Extended abstract Cand. sci. (Techn.) dissertation. Perm, Mining Institute URO RAN, 2010, 24 p. (in Russian)
- 21. Petrov, E.S., Novorotskii, P.V., Lenshin, V.T. *Klimat Khabarovskogo kraya i Evreiskoi avtonomnoi oblasti* [The climate of the Khabarovsk Territory and the Jewish Autonomous Region]. Vladivostok—Khabarovsk, Dal'nauka Publ., 2000, 203 p. (in Russian)
- 22. Pikovskii, Yu.I., Gennadiev, A.N., Chernyanskii, S.S., Sakharov, G.N. *Problemy diagnostiki i normirovaniya zagryazneniya pochv neft'ju i nefteproduktami* [Problems of diagnostics and regulation of soil pollution by oil and oil products]. *Pochvovedenie*, 2003, no. 9, pp. 1132–1140. (in Russian)
- Pikovskii, Yu.I., Smirnova, M.A., Gennadiev, A.N., Zavgorodnyaya, Yu.A., et al. *Parametry samorodnogo* uglevodorodnogo sostoyaniya pochv razlichnykh bioklimaticheskikh zon [Parameters of the natural hydrocarbon state of soils in different bioclimatic zones]. *Poch*vovedenie, 2019, no. 11, pp. 1307–1321. (in Russian)
- Sigareva, L.E. Khlorofill v donnykh otlozheniyakh Volzhskikh vodoemov [Chlorophyll in bottom sediments of the Volga reservoirs]. Moscow, Tovarishchestvo nauchnykh izdanii KMK, 2012, 217 p. (in Russian)
- Fedotov, G.N., Lysak, L.V. O vozmozhnoi roli mikroorganizmov v obrazovanii gumusovykh veshchestv v pochvakh [On the possible role of microorganisms in the formation of humic substances in soils]. Doklady aka-

- demii nauk, 2014, vol. 455, no. 1, pp. 114–117. (in Russian)
- Shchemelinina, T.N., Anchugova, E.M., Lapteva, E.M., Vasilevich, R.S., et al. *Modelirovanie tehnologii "kontur-nogo zavodneniya" v mikrokosmakh* [Microcosm modeling of "contour flooding" technology]. *Pochvovedenie*, 2020, no. 2, pp. 219–229. (in Russian)
- 27. Yudina, N.V., Savel'eva, A.V. *Uglevodorody v rasteniyakh torfoobrazovatelyakh i torfakh oligotrofno-evtrofnykh bolot Zapadnoi Sibiri* [Hydrocarbons in peatforming plants and peats of oligotrophic-eutrophic bogs in Western Siberia]. *Geokhimiya*, 2008, no. 1, pp. 84–91. (in Russian)
- 28. Bush, R.T., Mcinerney, F.A. Influence of temperature and C4 abundance on n-alkane chain length distributions across the central USA. *Organic Geochemistry*. 2015, no. 79, pp. 65–73.
- 29. Chen, Y., Day, S.D., Shrestha, R.K., Strahm, B.D., Wiseman, P.E. Influence of urban land development and soil rehabilitation on soil—atmosphere greenhouse gas fluxes. *Geoderma*, 2014, vol. 226–227, pp. 348–353.
- 30. Gocke, M., Wiesenber, G.L.B., Kuzyakov, Y. Differentiation of plant derived organic matter in soil, loess fnd rhizoliths based on n-alkane molecular proxites. *Biogeochemistry*. 2013, vol. 112, no. 1–3, pp. 23–40.
- 31. IUSS Working Group WRB, World Reference Base for Soil Resources 2014, International Soil Classification System for Naming Soil and Creating Legends for Soil Maps, World Soil Resources Reports No. 106 (UN Food and Agriculture Organization, Rome, 2015)..
- 32. Kuhn, Th.K., Krull, E.S., Bowater, A., Grice, K., Gleixner, G. The occurrence of short chain n-alkanes with an even over odd predominance in higher plants and soils. *Organic Geochemistry*. 2009, vol. 41, no. 2, pp. 88–95.
- 33. Malone, R., Warner, R.W., Evangelou, V.P., Wong, J.L. Transport of benzene and trichloroethylene through landfill soil liner mixed with coal slurry. *Waste Management Res.* 1994, vol. 12, pp. 417–428.
- 34. Panikov, N.S. Subzero Activity of Cold-Adapted Yeasts. In Cold-Adapted Yeasts. Berlin: Springer, 2014, pp. 295–323.
- Peters, K.E., Walters, C.C., Moldowan, J.M. The biomarker guide. Second Edition I, II, Cambridge: University Press, 2005. 1155 p.
- 36. Serrano-Silva, N., Sarria-Guzman, Y., Dendooven, L., Luna-Gudo, M. Methanogenesis and Methanotrophy in Soil: *A Review. Pedosphere*, 2014, vol. 24, no. 3, pp. 291–307.
- 37. Soares, A.A., Albergaria, J.T., Domingues, V.F., Conceicao, M., et al. Remediation of soils combining soil vapor extraction and bioremediation: Benzene. *Chemosphere*, 2010, vol. 80, no. 7, pp. 823–828.
- Sojinu, S.O., Sonibare, O.O., Ekundayo, O., Zeng, E.Y. Assessing anthropogenic contamination in surface sediments of Niger Delta, Nigeria with fecal sterols and nalkanes as indicators. *Sci. Total Environ.*, 2012, vol. 441, pp. 89–96.
- Wakelin, S.A., Macdonald, L.M., Rogers, S.L., Gregg, A.L., Bolger, T.P., Baldock, J.A. Habitat selective factors influencing the structural composition and functional capacity of microbial communities in agricultural soils. *Soil Biol. Biochemistry*, 2008, vol. 40, no. 3, pp. 803–813.

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 550.8.013

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ УЯЗВИМОСТИ ЗДАНИЙ ПРИ НАВОДНЕНИЯХ

© 2021 г. В. Н. Бурова^{1,*}

¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН), Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия *E-mail: valentina_burova@mail.ru
Поступила в редакцию 13.07.2021 г.
После доработки 27.07.2021 г.
Принята к публикации 30.07.2021 г.

Рассмотрены и проанализированы основные направления и нормативно-методические документы, связанные с оценками последствий от наводнений. Предложены дополнения к основной общепринятой классификации последствий от наводнений для различных типов зданий. Разработаны подходы к оценкам уязвимости объектов (зданий) от наводнений, основанные на использовании данных об изменении их балансовой стоимости при изменении физического состояния от воздействия на него водных масс. Для 7 различных типов зданий составлены диаграммы зависимости степени уязвимости от различных параметров интенсивности наводнений, предназначенные, в основном, для ориентировочных и массовых оценок возможных потерь от проявления наводнений. Разработанные подходы к оценкам уязвимости являются универсальными, оперативными и доступными.

Ключевые слова: наводнения, уязвимость, параметры интенсивности, степень деформирования (разрушения), соотношение параметров интенсивности и степени уязвимости

DOI: 10.31857/S0869780921050027

ВВЕДЕНИЕ

Наводнение — одно из самых распространенных природных стихийных бедствий, в результате затопления территорий приводящее к повреждению (разрушению) объектов экономики, сельскохозяйственных угодий и гибели людей. По повторяемости, площади распространения и суммарному среднегодовому материальному ущербу наводнения на территории Российской Федерации занимают первое место среди природных опасностей, а по количеству человеческих жертв и удельному материальному ущербу (приходящемуся на единицу пораженной площади) — второе место после землетрясений.

В России общая площадь земель, подвергающихся затоплениям при наводнениях, составляет около 5% территории страны. Потенциальная угроза затопления существует более чем для 40 крупных городов и нескольких тысяч других населенных пунктов [5]. Убытки, связанные с наводнениями, оцениваются примерно в 40 млрд руб. в год¹.

В последние десятилетия отмечается уверенная тенденция роста экстремальных наводнений, как в России, так и во всем мире [1, 8, 9, 11]. Наи-

большее количество наводнений зафиксировано в Дальневосточном и Северокавказском регионах России². В мире наводнениям наиболее подвержены страны Азии (Китай, Австралия, Индонезия и Филиппины)³. Весьма опасны наводнения и в США [8].

Такая ситуация привела к наращиванию информации о наводнениях, что спровоцировало увеличивающийся интерес к проблеме наводнений, связанный с оценками последствий от их

Colorado flooding one month later: positive signs of recovery URL: https://www.fema.gov/news-release/2013/10/11/colorado-flooding-one-month-later-positive-signsrecovery.

NatCatSERVICE. Natural catastrophe know-how for risk management and research. URL:http://natcatservice.munichre.com/?filter=eyJ5ZWFyRnJvbSI6MjAxNSwieWVhclRvIjoyM-DE1fO%3D%3D&type=1.

Natural Disasters 2011. Bangkok: Thai Meteorological Department. URL: https://www.tmd.go.th/en/downloads.php. ReliefWeb. Pakistan Floods: The deluge of disaster-facts &figures as of 15 September 2010 (report from Singapore Red Cross

Society). URL: https://reliefweb.int/report/pakistan/pakistanfloodsthe-deluge-disaster-facts-figures-15-september-2010.

¹ Информационное агентство России ТАСС: Наводнения в России и ущерб от них. URL: http://tass.ru/proisshestvi-ya/662522

² О катастрофических дождях на черноморском побережье Краснодарского края — анализ ситуации. URL: https://meteoinfo.ru/news/1-2009-10-01-09-03-06/5419-07072012

³ Australian Storms and Floods: White Paper. "A land ... of droughts and flooding rains" // A special report by Zurich risk engineering, Australia & New Zealand. URL:https://www.zurich.com.au/content/dam/australia/general_insurance/risk_engineering.

проявления в различных сферах. В последние годы созданы комплексные методики оценок последствий от наводнений [1, 2], в которых предусматривается, что характеристика ущерба от наводнения должна включать в себя как природные характеристики процесса, так и социально-экономические составляющие оцениваемой территории. Социально-экономическая оценка включает определение количества населенных пунктов, охваченных воздействием наводнения, величину прямого материального ущерба и угрозу для жизни, характер прямого повреждения промышленных объектов и дорожной инфраструктуры, жилых зданий; размеры и структуру затопления освоенной территории; степень нарушения уклада жизни и производственной деятельности людей: необходимость эвакуации местных жителей; ухудшение экологической обстановки и другие характеристики в конкретных регионах. С учетом данных положений для всей территории России и некоторых ее регионов (Челябинская и Оренбургская области, Республика Башкортостан) выполнена оценка и составлены карты социальноэкономической уязвимости [4, 6]. Такие оценки уязвимости проведены с использованием непараметрического метода PATTERN — Planning Assistance Through Technical Relevance Number – Ποмощь планированию посредством относительных показателей технической оценки.

Все большее внимание при изучении последствий от наводнений в последнее время уделяется изучению социальных последствий, связанных не только с человеческими жертвами и санитарными потерями, но и с общественными трансформациями в виде социально-психологического состояния [3, 10].

Несмотря на рост негативных последствий от наводнений, до сего времени нет не только надежных долгосрочных прогнозов их проявления, но и достоверных и общепринятых методик подсчета причиняемых ими ущербов и общепринятой концепции защиты.

В большинстве случаев учитывается прямой ущерб, связанный с непосредственным физическим контактом паводковых или дождевых вод с хозяйственными объектами, а величина ущерба, как правило, определяется затратами на восстановление хозяйства или текущей рыночной стоимостью разрушенных (или нарушенных) хозяйственных объектов. Таким же образом оценивается ущерб от нарушения или разрушения жилых построек и имущества, находящегося в них, а также от разрушения мостов, автомобильных и железных дорог, линий связи и электропередачи, газо- и нефтепроводов.

В перспективе, в силу ряда природных и антропогенных причин, ущербы, причиняемые наводнениями, будут расти, поэтому насущно необходимо усиление научно-исследовательских,

организационных и практических работ, направленных на уменьшение ущербов от наводнений.

Цель данной работы заключалась в выявлении основных сценариев развития наводнений, определении последствий их воздействия на различные типы зданий в виде степени их уязвимости на основе анализа фактических данных и имеющихся методических разработок по оценкам ущерба и классификаций (числовых и формально описательных) последствий от наводнений в пределах определенных регионов.

Такой подход позволяет осуществлять экспресс-оценку уязвимости отдельных типов зданий по ограниченному количеству показателей интенсивности наводнения, что в свою очередь дает возможность проведения своевременной оценки последствий и принятия защитных мер от данной опасности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Характеристика объекта исследования

Наводнения (затопление территорий) происходят по разным причинам: половодье, ливневые дожди, прорыв плотин на гидротехнических объектах и т.п. Все негативные последствия наводнений происходят от взаимодействия водных масс с различными объектами. Механизмы такого взаимодействия и их последствия различаются и зависят от характеристики водных масс и реципиента (объекта). Водные массы в зависимости от источника (причины) наводнения представляют либо движущийся поток воды с определенной скоростью (мощностью), либо статические массы воды в течение определенного времени, находящиеся на определенном уровне.

Как правило, наибольшие потери происходят при прорыве плотины, дамбы или другого гидротехнического сооружения, либо при переливе воды через плотину из-за переполнения водохранилища. Затопление местности, расположенной ниже сооружения, осуществляется в этом случае внезапно, с приходом, так называемой волны прорыва (вытеснения, пропуска), высота которой может достигать нескольких десятков метров, а скорость движения — нескольких десятков м/с. Основной поражающий фактор наводнений — движущийся поток воды, который способен разрушить здание или сооружение, а также другие объекты (реципиенты) в результате механического воздействия (давления).

Здания и (или) другие сооружения, периодически попадающие в зону затопления и находящиеся значительное время во взаимодействии с водными массами, значительно усугубляют потери капитальности: гнилью повреждается дерево; отваливается штукатурка; выпадают кирпичи; подвергаются коррозии металлические конструк-

ции; из-за размыва и утраты прочностных свойств грунта под фундаментом в результате его взаимодействия с водой (возможны размывы и разжижение грунта), происходит неравномерная осадка зданий и, как следствие, появляются трещины. Уязвимость в данном случае пропорциональна времени воздействия, как однократного, так и повторного (несколько раз за определенный период времени). Опыт показывает, что при сравнительно частых затоплениях (1 раз в 3–4 года) срок между капитальным ремонтом кирпичного здания уменьшается на 15 лет, а стоимость ремонта обходится в 3 раза дороже. После каждого значительного затопления балансовая стоимость деревянного здания падает на 5-10%, а шоссейных и железных дорог — на 8—12%. Из-за неравномерной осадки грунта происходят частые размывы канализационных и водопроводных труб, электрических, телевизионных и телеграфных кабелей и пр.

Прямой и косвенный ущербы от наводнений обычно находятся в соотношении 70% и 30%. В настоящей работе рассматриваются подходы к оценке степени уязвимости объектов (различных зданий), непосредственно определяющие прямой ущерб от наводнений.

Как правило, достижение той или иной степени повреждения (разрушения) объекта происходит при выполнении условия вида:

$$g(a,b,c...) > g_{ik}^{kp}$$

где g — критериальная функция, характеризующая силу опасного процесса; g_{ik}^{kp} — критическое значение критериальной функции для i-й степени разрушения (повреждения) объекта k-го типа; a, b, c — значения параметров, характеризующих разрушительную силу опасного процесса, в частности, для наводнений это может быть глубина, скорость потока, удельная энергия потока, время взаимодействия водных масс с объектом и т.д.

В определенных случаях для объекта (j) на основании предварительных исследований между характерными значениями параметров a, b, c может быть установлена связь вида:

$$a = f(b) = n_i b^{rj},$$

где n_i и r_i — коэффициенты.

В частности, такая зависимость может быть установлена между характерной скоростью (u) и характерной глубиной (h) объекта. Следовательно, критерий разрушения i-й степени для объекта j может быть выражен следующим образом:

$$u > u_{ii}$$

где u_{ij} — критическое значение скорости для объекта j, при которой возникает i-я степень его разрушения.

Оценка уязвимости зданий при наводнениях

Ущерб, связанный с разрушением объектов и сооружений при наводнениях, оцениваемый через степень разрушения (поражения) объектов, выражается в соответствии с существующими в настоящее время методическими документами в терминах функциональных, натуральных и стоимостных критериев⁴ [3, 4, 7].

Принято различать следующие степени разрушения:

- слабое разрушение разрушение, при котором объект продолжает функционировать, несмотря на разрушение отдельных второстепенных элементов и необходимость их ремонта; непосредственный ущерб объекту находится ориентировочно в пределах до 10% первоначальной стоимости объекта;
- среднее разрушение разрушение, вследствие которого объект временно перестает функционировать; значительные разрушения второстепенных элементов или умеренные деформации основных (несущих) элементов, требующие проведения капитального ремонта объекта; трудозатраты на восстановление находятся ориентировочно в пределах 10—50% стоимости объекта;
- сильное разрушение разрушение, при котором объект перестает функционировать; имеются значительные деформации и разрушения основных элементов, требующие проведения перестройки для восстановления объекта; трудозатраты на восстановление превышают ориентировочно 50% стоимости объекта.

Анализ существующих нормативно-методических документов и фактических данных позволил составить сводную таблицу соотношения критических значений параметров интенсивности наводнений, при которых происходит изменение физического состояния объекта (7 различных типов зданий), относящееся к определенной степени разрушения (табл. 1).

При оценках уязвимости объектов, на наш взгляд, также целесообразно дополнительно ввести категории:

— полного разрушения (коллапс), при которой теряется 100% стоимости объекта, т.е. здания не подлежат восстановлению, требуется новое строительство;

⁴ Методика определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии гидротехнического сооружения (за исключением судоходных и портовых гидротехнических сооружений). Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 29 марта 2016 года № 120. URL: https://docs.cntd.ru/document/573191717

Таблица 1.

Тип здания**	Степень разрушения*											
	сильная			сильная				сильная				
	<i>h</i> , м	и, м/с	b, балл	<i>t</i> , час	<i>h</i> , м	и, м/с	b, балл	<i>t</i> , час	<i>h</i> , м	и, м/с	b, балл	t, час
1	1-3	2	7.5	48	1-2	1.5	6.5	24	0-1	0.5-1	5.5	12
2	3-3.5	2	7.5	48	2.5	1.5	6.5	24	1	1	5.5	12
3	3.5	2	7.5	7.2	2.5	1.5	6.5	48	1-2	1	5.5	24
4	4	2.5	8	150	3	2	7	100	2	1	6	50
5	4–6	3	9	240	3-4	2.5	8	170	2.5	1.5	6	50
6	7.5	4	9	_	6	3	8	_	3	1.5	6	_
7	12	4	11	_	9	3	10	_	4	1.5	9	_

^{*}h — глубина затопления, u — скорость потока, b — зона разрушения, характеризующаяся определенной энергией потока воды, выраженной в баллах, t — время затопления.

Таблица 2. Соотношение степени разрушения и уязвимости объектов (зданий, сооружений)

Степень разрушения	Уязвимость, дол. ед.	Описание разрушений
Незначительная	менее 0.1	Отсутствие заметных повреждений во всех элементах объекта
Слабая	0.1 - 0.3	Разрушение отдельных второстепенных элементов. Функционирование не на-
Средняя	0.3-0.5	рушено Значительные разрушения второстепенных элементов или деформации основных. Временное прекращение функционирования
Сильная	0.5 - 0.7	Разрушение основных элементов. Остается возможность восстановления
Очень сильная	более 0.7	Полное разрушение, не подлежащее восстановлению

 отсутствие заметных повреждений во всех элементах здания, характеризующуюся как "безопасность".

Таким образом, анализируются 5 степеней оценки последствий взаимодействия водных масс (наводнений) с объектами (зданиями), которые необходимо соотнести с их уязвимостью. Совершенно очевидно, что при потере 100% стоимости объекта (или тотальном разрушении) уязвимость равна 1; при отсутствии видимых деформаций она практически отсутствует, а ее значение приближается к 0.

В различных методиках оценку ущербов от воздействия природных опасностей на объекты экономики степень повреждения (разрушения) предлагается определять через стоимость восстановления объекта. Степень разрушения зданий и сооружений можно соотносить с трудозатратами на восстановление нормального функционирования поврежденных, разрушенных объектов, изменениями сроков капитального ремонта, балансовой стоимостью сооружения и т.п. Основываясь на том (предположив), что существует прямая

связь между физическими потерями (уязвимостью) в виде повреждения определенного количества элементов объекта и материальными затратами на их восстановление, и приняв, что 10% от балансовой стоимости объекта соответствуют физической уязвимости, равной 0.1, можно составить таблицу соответствия степеней разрушения и уязвимости (табл. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Предложенные в табл. 1 и 2 соотношения параметров интенсивности наводнений со степенями деформирования (разрушения) зданий были использованы в качестве основополагающих при оценках степени уязвимости отдельных типов зданий. В настоящей работе, оценки уязвимости проводились при следующих основных граничных условиях:

1) процесс определенной интенсивности не имеет территориальной привязки;

^{**}Тип здания: 1 — сборные деревянные жилые дома, 2 — деревянные дома (1—2 этажа), 3 — легкие бескаркасные постройки (1—2 этажа), 4 — кирпичные дома (1—2 этажа), 5 — кирпичные дома (4 этажа и более), 6 — каркасные панельные, 7 — бетонные и железобетонные.

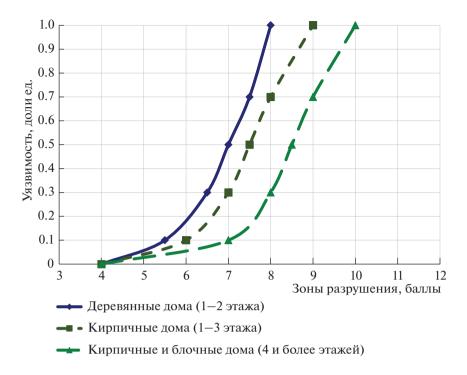


Рис. 1. Уязвимость различных типов зданий в зависимости от зоны разрушения, характеризующейся определенным значением энергии потока воды.

- 2) вероятность реализации события равна единице (т.е. рассматривается пессимистический сценарий развития события);
- 3) объект это жилое здание с различными конструктивными характеристиками.

Всего было рассмотрено 7 типов зданий: 1 — сборные деревянные жилые дома; 2 — деревянные дома (1—2 этажа); 3 — легкие бескаркасные постройки (1—2 этажа); 4 — кирпичные дома (1—2 этажа); 5 — кирпичные дома (4 этажа и более); 6 — каркасные панельные; 7 — бетонные и железобетонные.

Таблицы предназначены, в основном, для ориентировочных и массовых оценок, так как не учитывают разброс параметров устойчивости в пределах одного типа объектов и влияние различных местных условий. Эти параметры независимы друг от друга и представляют некоторые фиксированные комбинации параметров потока из множества возможных критических комбинаций. Если все параметры, характеризующие интенсивность наводнения, превышают (или не превышают) приведенные в табл. 1 значения, то это является однозначным критерием разрушения (или не разрушения) тому или иному типу объектов. В противном случае, когда какой-то из параметров не соответствует этому положению, определение устойчивости системы остается весьма неоднозначным. Поэтому можно либо подбирать другие сочетания критических значений параметров, либо построить кривые уязвимости для различных типов сооружений в зависимости от отдельных параметров с учетом соотношения степени разрушения с уязвимостью.

Используя имеющиеся характеристики интенсивности наводнений для различных типов зданий, отвечающих разной степени деформирования (разрушения) (см. табл. 1 и 2), и соответствие между изменением балансовой стоимости и уязвимостью, были составлены диаграммы степени уязвимости от различных параметров интенсивности наводнений (рис. 1—3).

По приведенным выше таблицам и кривым уязвимости для различных типов сооружений в зависимости от отдельных параметров интенсивности процесса можно определять значения уязвимости без учета особенностей состояния конкретного сооружения. В действительности, экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что однотипные здания в результате воздействия на них опасности определенного генезиса и определенной интенсивности имеют, тем не менее, различные степени повреждения. Такие различия обусловлены различиями в величине физического износа конкретных сооружений. качества выполнения строительных работ при их возведении, прочностными свойствами строительных материалов и множеству других факторов случайного характера. Поэтому следует еще раз отметить, что полученные зависимости уязвимости от параметров интенсивности наводнения характерны для типового здания без учета факто-

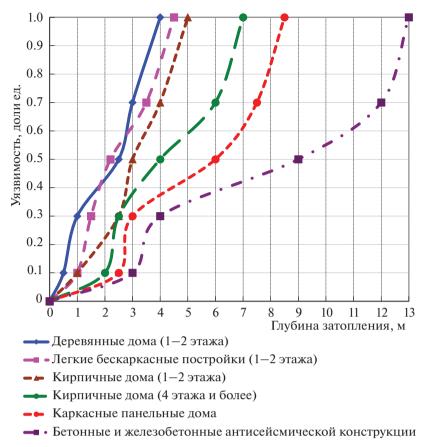


Рис. 2. Уязвимость различных типов зданий в зависимости от глубины затопления.

ров случайного характера, в том числе и временного, связанного с износом здания. Таким образом, можно предположить, что полученные данные характерны для зданий с минимальным коэффициентом износа, с вероятностью реализации события с характерными параметрами интенсивности приблизительно равной 1.

Использование составленных диаграмм для предварительной оценки возможных потерь можно рассмотреть на следующем примере. Допустим известно, что по прогнозным данным, уровень воды в реке, на берегу которой расположен поселок городского типа, во время половодья поднимется на 3 м выше его нормативного значения. При этом в зону затопления попадут 50 одно-двухэтажных домов, с различными конструктивными характеристиками (табл. 3).

Согласно диаграмме (см. рис. 2), степень уязвимости зданий, расположенных в зоне затопления, будет иметь соответствующие значения: сборные деревянные жилые дома — 0.70; легкие бескаркасные постройки — 0.65 и кирпичные дома — 0.50. Таким образом, ущерб, причиненный каждому типу здания, будет пропорционален значению стоимости здания, умноженному на степень уязвимости:

$$Y = C_{\nu}C$$
,

где Y — ущерб, руб.; C_y — степень уязвимости, C — стоимость здания.

Экспресс оценка общего ущерба от затопления домов в результате наводнения, имеет следующий вил:

$${\cal Y}_o = 20 \cdot 0.70 \cdot C_1 + 20 \cdot 0.65 \cdot C_2 + 10 \cdot 0.50 \cdot C_3,$$
 где C_1 , C_2 и C_3 – стоимость каждого типа зданий.

Таблица 3. Характеристика зданий в зоне затопления

№ п/п	Тип здания	Кол-во	Степень уязвимости (см. рис. 2)
1	Сборные деревянные жилые дома (1-2 этажа)	20	0.70
2	Легкие бескаркасные постройки (1-2 этажа)	20	0.65
3	Кирпичные дома (1-2 этажа)	10	0.50

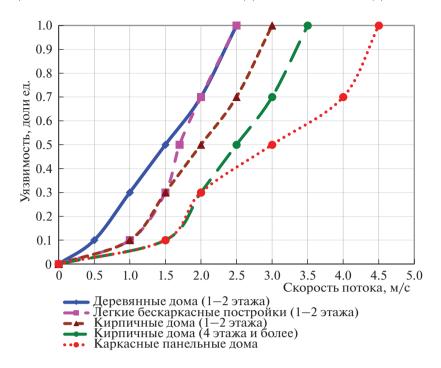


Рис. 3. Уязвимость различных типов зданий в зависимости от скорости потока воды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные диаграммы зависимости степени уязвимости для отдельных типов зданий от определенных параметров интенсивности наводнения позволяют оперативно произвести предварительные расчеты потерь от наводнений в различных регионах страны с использованием минимальной информации об источнике и решипиенте исследуемой опасности.

Оперативность, универсальность и доступность такого подхода к оценке уязвимости и ущербов способствует быстрому реагированию соответствующих служб и принятию своевременных решений для смягчения последствий от проявления наводнений.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания и плана НИР по теме N_2 г.р. AAAA-A19-119021190077-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Алексеевский Н.И., Магрицкий Д.В., Колтерманн П.К. и др. Наводнения на Черноморском побережье Краснодарского края // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 1. С. 3—17.
- 2. Бабурин В.Л., Горячко М.Д., Земцов С.П. и др. Оценка социально-экономических рисков и ущербов от опасных гидрологических явлений (на примере Славянского района Краснодарского края) // Геориск. 2015. № 3. С. 45—53.
- 3. Бондарев В.П., Болховитинова Ю.А. Социальные последствия катастрофических наводнений //

- Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2019. № 5. С. 21-29.
- 4. *Гладкевич Г.И.*, *Терский П.Н.*, *Фролова Н.Л*. Оценка опасности наводнений на территории Российской Федерации / Водное хозяйство России. 2012. № 2. С. 29—45.
- Малик Л.К. Факторы риска повреждения гидротехнических сооружений. Проблемы безопасности. М.: Наука, 2005. 354 с.
- 6. Падалко Ю.А. Социально-экономическая уязвимость населения и хозяйства регионов Российской части бассейна р. Урал от наводнений // Успехи современного естествознания. Науки о Земле. 2016. № 12. С. 439—444.
- Печенин С.А., Розов А.Л., Новокшенов Л.В. Методика оценки ущерба при наводнениях. С.-Пб.: В/ч 70170. 1992.
- 8. Экстремальные гидрологические ситуации / Отв. ред. Н.И. Коронкевич, Е.А. Барабанова, И.С. Зайцева. М.: ООО "Медиа-ПРЕСС", 2010. 464 с.
- Blöschl G., Hall J., Parajka J. et al. Changing Climate Shifts Timing of European Floods // Science. 2017. V. 357. № 6351. P. 588–590.
- 10. Box P., Bird D., Haynes K., King D. Shared responsibility and social vulnerability in the 2011 Brisbane flood // Natural Hazards. 2016. T. 81 (3). P. 1549–1568.
- Frolova N.L., Kireeva M.B., Magritckiy D.V. et al. Hydrological Hazards in Russia: Origin, Classification, Changes and Risk Assessment // Natural Hazards. 2017. V. 8.

SPECIFIC FEATURES IN ASSESSING VULNERABILITY OF BUILDINGS UPON FLOODS

V. N. Burova^{a,#}

^a Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia [#]E-mail: valentina burova@mail.ru

The paper considers and analyzes the main directions in investigation as well as the regulatory and methodological documents related to assessing the consequences of floods. Supplements are proposed to the principal commonly recognized classification of flood consequences for various types of buildings. The approaches are developed to assessing the vulnerability of engineering structures (buildings) to floods based on the use of data on changes in the book value of an object when its physical condition changes due to the water impact. For seven different types of buildings, vulnerability diagrams were built for different flood intensity parameters. These diagrams are mainly intended for indicative and general estimates of possible losses from floods. The developed approaches to vulnerability assessment appear to be universal, quick and easily available.

Keywords: floods, vulnerability, intensity parameters, degree of deformation (destruction), the ratio of intensity parameters to the degree of vulnerability

REFERENCES

- 1. Alekseevskii, N.I., Magritskii, D.V., Koltermann, P.K., et al. *Navodneniya na Chernomorskom poberezh'e Krasnodarskogo kraya* [Floods on the Black Sea coast of the Krasnodar krai]. *Water resources*, 2016, vol. 43, no. 1, pp. 3–17. (in Russian)
- 2. Baburin, V.L., Goryachko, M.D., Zemtsov, S.P., et al. *Otsenka sotsial'no-ekonomicheskikh riskov i ushcherbov ot opasnykh gidrologicheskikh yavlenii (na primere Slavyanskogo rayona Krasnodarskogo kraya)* [Assessment of socio-economic risks and damages from dangerous hydrological phenomena (by the example of the Slavyansky district of the Krasnodar krai)]. *Georisk*, 2015, no. 3, pp. 45–53. (in Russian)
- 3. Bondarev, V.P., Bolkhovitinova, Yu.A. *Sotsial'nye posledstviya katastroficheskikh navodnenii* [Social consequences of catastrophic floods]. *Vestnik Moskovskogo universtita. Seriya 5. Geografiya*, 2019, no. 5, pp. 21–29. (in Russian)
- 4. Gladkevich, G.I., Terskii, P.N., Frolova, N.L. *Otsenka opasnosti navodnenii na territorii Rossiiskoi Federatsii* [Assessment of flood hazard on the territory of the Russian Federation]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii*, 2012, no. 2, pp. 29–45. (in Russian)
- 5. Malik, L.K. Faktory riska povrezhdeniya gidrotekhnicheskikh sooruzhenii. Problemy bezopasnosti [Risk factors

- for damage to hydraulic structures. Security problems]. Moscow, Nauka, 2005, 354 p. (in Russian)
- 6. Padalko, Yu.A. Sotsial'no-ekonomicheskaya uyazvimost' naseleniya i khozyaistva regionov Rossiiskoi chasti basseina r. Ural ot navodnenii [Socio-economic vulnerability of the population and economy of the regions of the Russian part of the Ural River basin from floods]. Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. Nauki o Zemle, 2016. no. 12. pp. 439–444. (in Russian)
- 7. Pechenin, S.A., Rozov, A.L., Novokshenov, L.V. *Metodika otsenki ushcherba pri navodneniyakh* [Methodology for assessing damage during floods]. St. Petersburg, V/ch 70170, 1992. (in Russian)
- 8. Ekstremal'nye gidrologicheskie situatsii [Extreme hydrological situations]. N.I. Koronkevich, E.A. Barabanova, I.S. Zaitseva, Eds. Moscow, Media-PRESS Publ., 2010, 464 p. (in Russian)
- 9. Blöschl, G., Hall, J., Parajka, J., et al. Changing climate shifts timing of European floods. *Science*, 2017, vol. 357, no. 6351, pp. 588–590.
- Box, P., Bird, D., Haynes, K., King, D. Shared responsibility and social vulnerability in the 2011 Brisbane flood. *Natural Hazards*, 2016, vol. 81 (3), pp. 1549

 1568
- 11. Frolova, N.L., Kireeva, M.B., Magritckiy, D.V. et al. Hydrological hazards in Russia: origin, classification, changes and risk assessment. *Natural Hazards*, 2017, vol. 88, no. 1, pp. 103–131.

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 504; 502.64

ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЕННОГО КОМПОНЕНТА ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ГОРОДА

© 2021 г. Т. Б. Минакова¹, В. Г. Заиканов^{1,*}, Е. В. Булдакова¹

¹ Институт геоэкологии им Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН), Уланский пер., д. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия
 *E-mail: v.zaikanov@mail.ru
 Поступила в редакцию 11.09.2021 г.
 После доработки 17.09.2021 г.
 Принята к публикации 25.09.2021 г.

Геоэкологическая безопасность города напрямую зависит от свойств геологической среды. Одним из индикаторов ее состояния являются природно-техногенные образования, почвы-урботехноземы. В статье предлагается подход к оценке ущерба от накопленного загрязнения почв. Наземные загрязнения связаны с эмиссией и выпадением загрязняющих веществ, с размещением промышленных и бытовых отходов, проявлением аварийных ситуаций на опасных предприятиях и др. Расчеты подтвердили преобладание в городе техногенного ущерба над ущербом от опасных природных процессов, а сумма этих ущербов отражает степень геоэкологической опасности/безопасности города.

Ключевые слова: техногенные факторы, опасные производственные объекты, геоэкологическая опасность, геохимическое загрязнение почв, ущерб от загрязнения почв

DOI: 10.31857/S0869780921060060

ВВЕДЕНИЕ

Экологическая безопасность – важнейший фактор для обеспечения комфортных и стабильных условий жизнедеятельности городов. Однако просчеты в градостроительстве, недостаточное внимание к проблеме нарастающего техногенного прессинга на городские территории приводят к ухудшению экологической обстановки. Существенный негативный вклад в это вносит недоучет геоэкологических факторов при планировании и проектировании городских пространств. Таким образом, актуальность комплексной оценки геоэкологической опасности/безопасности городов обусловливается необходимостью сохранения и мониторинга экологической безопасности, потребностью проектирования строительства объектов экономики и планирования городских пространств, обоснования эффективности принимаемых управленческих решений.

Геоэкологическая составляющая в общей экологической оценке безопасности территории города включает наличие природных, техногенных и формирующихся при их взаимодействии природно-техногенных опасностей [2]. Изучение геоэкологических особенностей в городах столкнулось со сложностью оценки опасности отдельных процессов и, тем более, их сочетаний в связи с непростым их взаимодействием, а также суще-

ствованием прямых и обратных связей, цепных реакций, совмещением нескольких опасных геоэкологических факторов на ограниченной площади. Оценка геоэкологической безопасности города в части проявления природных опасностей нашла отражение в статье [7]. Задачей же настоящего исследования являлась разработка подхода к оценке техногенной составляющей в обеспечении геоэкологической безопасности при соблюдении единых принципов:

- общий критерий оценки учитываемых природных и техногенных факторов (обеспечение геоэкологической безопасности путем достижения минимизации возможного ущерба от проявления негативных природных процессов и воздействия опасных производственных объектов);
- учет временного фактора, так как причины и последствия проявления негативных воздействий могут быть длительными (накопленный ущерб) или внезапными (аварии), поэтому расчеты ущербов различного генезиса на одной территории, отличающейся в свою очередь огромной дифференциацией природных и социально-экономических условий, возможны при условии приведения показателей ущерба к определенному моменту времени;
- привлечение к оценке ущербов стоимостных показателей, обеспечивающих более высокую

точность и сопоставимость производимых расчетов (в отличие от балльных экспертных оценок);

– достоверность и открытость используемой для оценки исходной информации (к сожалению, ее недостаточность обусловливает необходимость довольно частого привлечения нормативных значений).

Доминирующий параметр величины ущерба на конкретный временной срез определяет максимальный уровень геоэкологической опасности территории, что соответствует минимальному уровню безопасности. Принимая за критерий количественной оценки геоэкологической безопасности городской территории минимальный ущерб от опасных геоэкологических процессов [7], в расчетах учитывается вероятность проявления опасных событий и возможные их последствия.

Общеизвестно, что количественные оценки более точные, они необходимы при выборе эффективных вариантов обеспечения геоэкологической безопасности, для инвестирования природоохранных мероприятий на городских территориях и т.д. До последнего времени вызывала сомнение сама возможность количественной оценки реального уровня геоэкологической безопасности городов. На практике эту величину следует находить на основе статистических данных. Однако в процессе подобной оценки сталкиваемся с отсутствием единой базы необходимых характеристик и недоступностью статистических показателей по городам. К сожалению, существующие Реестры опасных производственных объектов (ОПО) Ростехнадзора и объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду (объекты НВОС) Росприроднадзора, созданные с целью учета и присвоения класса опасности регистрируемым объектам и содержащие данные о них, не размещаются в открытом доступе. Кроме того, оценка ущерба осложняется из-за невозможности во многих случаях прогноза проявления опасности, а также из-за вероятного возникновения непредсказуемой цепочки связей и одновременного участия нескольких видов воздействий и реципиентов.

Уровень геоэкологической безопасности формируется исходя из развития города, его промышленной специализации и земельного баланса. Среди многочисленных видов природных и техногенных факторов, определяющих геоэкологическую безопасность городов, необходимо выбрать самые опасные и наиболее распространенные. Анализ материалов по геоэкологическому состоянию городских пространств показал, что во всех городах площадное распространение имеет геохимическое загрязнение почв, грунтов и вод [3, 4]. Загрязняющие вещества попадают с выбросами предприятий и транспорта, сбросами неочищенных стоков, с промышленными, строи-

тельными и бытовыми отходами. В последние десятилетия происходит изменение в структуре загрязнителей. На первое место вышли выбросы автотранспорта, которые в некоторых городах достигают до 60—80% суммарного атмосферного загрязнения.

Цель настоящих исследований — обоснование оценки ущерба от загрязнения почв как одного из природно-техногенных компонентов геологической среды города.

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГОРОДСКИХ ПОЧВ ЧЕРЕЗ ПОКАЗАТЕЛЬ УЩЕРБА, ПРИЧИНЯЕМОГО РАЗЛИЧНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

Выпадение пыли в городах — один из основных факторов миграции химических элементов из атмосферы в почвенный покров города, представленный в основном различными видами урботехноземов. Они являются основной депонирующей средой города, определяющей уровень загрязнения городской среды.

В структуре почвенного покрова города с незапечатанной поверхностью подавляющая часть площадей приурочена к природным и озелененным территориям, где почвы выступают в качестве среды обитания (субстрата) для зеленых насаждений и функционируют под интенсивным техногенным воздействием. При этом в городских почвах развиваются негативные процессы. ухудшающие их качество и снижающие их возможность к выполнению экологических функций. Основными негативными проявлениями техногенного воздействия на городские почвы являются: разрушение и нарушение почвенного профиля, водно-воздушного, теплового режимов, химическое загрязнение, а также потеря их способности к самоочищению, снижение биопродуктивности и сокращение биоразнообразия.

Почвы — наиболее пролонгированный вторичный источник загрязнения сопредельных природных сред: атмосферного воздуха (в результате распыления почв на незадернованных участках, отвалах, хвостохранилищах и т.п.), поверхностных и подземных вод, растительности (в результате вовлечения токсикантов в круговорот веществ), что в итоге ухудшает экологическое качество окружающей среды города [8].

В отличие от остальных депонирующих сред, почва является наиболее устойчивой средой, отражающей современную и историческую геохимическую ситуацию — так называемые "почвапамять" и "почва-момент" [9]. Фактически показатель уровня загрязнения почв не только определяет качество почв, но и служит индикатором накопленного вреда и опасности для человека. По этому показателю в конкретный момент времени

Показатели	Бийск	Комсомольск- на-Амуре	Красноярск	Череповец
Площадь города, га	29 183	32500	35390	13089
в т.ч. площадь производственных и коммунально-складских зон, га	3700.0	2480.4	6363.5	6542.3
Доля площадей открытых почв в городе	0.243	0.426	0.376	0.027
Количество учтенных объектов, шт.	40	31	36	25
в т.ч. І категории	9	4	8	6
в т.ч. II категории	28	22	20	19
Площадь учтенных объектов, га	3058.2	1742.8	4136.1	5305.5
Доля площади учтенных объектов от площади производственных и коммунально-складских зон города, %	82.7	70.3	65.0	81.1

Таблица 1. Исходные данные для оценки ущерба от загрязнения почв на примере некоторых городов

можно судить о степени опасности или безопасности городской среды.

Особенность загрязнения городских почв токсикантами, нефтью, нефтепродуктами и др. в результате производственной деятельности заключается в длительности процесса и косвенном характере воздействия. Несмотря на невысокую среднюю долю открытых почв в городе, неравномерность их распространения в пределах городских границ (практически от минимальной в центре города и до более 80% на периферии), значения накопленного ущерба существенны и в расчетном суммарном ущербе от техногенного воздействия могут достигать более 80%, особенно в городах с химической промышленностью.

Наземные загрязнения связаны с необходимостью размещения больших объемов промышленных отходов, содержащих опасные химические элементы. Такие объекты занимают значительные площади, загрязняя почвы, грунты и подземные воды на прилегающей территории и оказывают статическое давление на геологическую среду. Их относят к числу объектов НВОС. Кроме того, многие предприятия представляют собой ОПО из-за возможного возникновения в ходе их деятельности или в результате неожиданного внешнего природного и техногенного воздействия аварийной ситуации, последствия которой отражаются в негативных изменениях окружающей среды. Например, после пожара и взрыва образуются техногенные отходы, может произойти деформация земной поверхности, разлив нефтепродуктов, захламление территории и т.п.

Дифференциация исходных и расчетных данных, необходимых для последующей оценки ущербов, отражена на примере нескольких городов в табл. 1.

Природные и социально-экономические условия городов существенно различаются. При сравнительно близкой их общей площади (кроме

Череповца) размеры производственных и коммунально-складских зон существенно разнятся: от 18% (Красноярск) до 7.6% (Комсомольск-на-Амуре) от территории города, а в г. Череповец почти 50%. Площадь же учитываемых объектов негативного воздействия, среди которых преобладают объекты II категории, превышает 60% от площади производственных и коммунальноскладских зон, что свидетельствует о достаточной представительности выборки объектов в каждом городе.

Рассмотрим один из возможных подходов к оценке ущерба от техногенного воздействия различных стационарных источников на почвы с учетом: 1) накопленного ранее (загрязнение почв), 2) существующего и требующего рекультивации (складирование и хранение промышленных отходов), и 3) потенциального (аварийного). В таком случае в общем виде ущерб от воздействия учитываемых техногенных факторов (B_y^{T}) определяется суммой:

$$B_y^{\mathrm{T}} = B_y^{\mathrm{3\Pi}}/a^{\mathrm{3\Pi}} + B_y^{\mathrm{OT}} \cdot a^{\mathrm{OT}} + B_y^{\mathrm{aB}},$$

где $B_y^{\rm 3\Pi}$ — накопленный ущерб от геохимического загрязнения почв; $B_y^{\rm ot}$ — существующий ущерб от складирования и хранения промышленных отходов; $B_y^{\rm ab}$ — потенциальный ущерб от возможного проявления аварии, $a^{\rm 3\Pi}$ и $a^{\rm ot}$ — коэффициенты дисконтирования показателя, соответственно при загрязнении почв и складировании промотходов. Ущерб от аварий рассчитывается в год осуществления оценки.

Разновременность проявления учитываемых видов техногенного воздействия указывает на необходимость учета фактора времени путем дисконтирования получаемых значений ущербов — приведения их к единой годовой размерности. В рассматриваемом случае приведение необходимо как от более раннего момента времени (загрязне-

ние почв происходило много лет с начала функционирования источников загрязнения), так и до более позднего (например, рекультивация возможна только через 3-5 лет). В качестве момента приведения выбирается базовый момент, когда осуществляется оценка. Основной используемый при дисконтировании экономический норматив—норма дисконта (E), выражаемая в долях единицы или процентах в год. Расчет осуществляется при условии постоянства нормы дисконта, т.е. E неизменна в течение периода расчета, по формуле:

$$a = 1/(1+E)^{t_n}$$

где a — коэффициент дисконтирования, t_n — разница между годом осуществления оценки и годом начала (год образования предприятия) или окончания негативного воздействия (плановый срок завершения рекультивации).

С экономической точки зрения, норма дисконта — это норма прибыли. Применительно к решаемой задаче это ожидаемая эффективность проведения природоохранных мероприятий, затратам на реализацию которых соответствуют величины определяемого ущерба. Учитывая, что основными источниками загрязнения почв в городах являются промышленные предприятия различных направлений, считаем допустимым привлечение отраслевых значений коэффициентов эффективности капитальных вложений, соответствующих каждому предприятию 1,2,3. В результате расчет коэффициента дисконтирования для каждого предприятия (группы предприятий) будет индивидуальным.

При оценке ущерба необходимо учитывать воздействие конкретных источников еще и потому, что для каждого города будут характерны специфические их сочетания и последствия. Ущерб от загрязнения почв формируется многие годы. Он сохраняется и после ликвидации (перепрофилирования) предприятия, тогда требуется санация почв или рекультивация территории. В зависимости от мощности предприятия и особенностей технологического процесса производства (включая привлечение современных природо-

охранных технологий), а также от его местоположения и климатических особенностей города, площадь распространения загрязняющих веществ будет неодинаковой. Кроме того, для различных видов экономической деятельности характерен своеобразный набор загрязняющих веществ с разной степенью опасности.

Опираясь на Методики оценки ущербов от загрязнения компонентов природы (в том числе почвы) разных лет (1987—2018 гг.), разработан подход к оценке ущерба от загрязнения почв объектами НВОС и ОПО в городах.

Формально загрязняющие вещества с самой промплощадки смываются поверхностным стоком, а плошаль, попадающая непосредственно в зону выпадения загрязняющих веществ, законодательно ограничивается шириной санитарнозащитной зоны (СЗЗ), однако практически может выходить и за ее пределы, что подтверждается мониторинговыми наблюдениями за загрязнением тяжелыми металлами в городах [1]. В соответствии с критериями, утвержденными Постановлением Правительства РФ от 31 декабря 2020 г. № 2398 "Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий"⁴, считаем целесообразным при оценке геоэкологической безопасности городов учитывать объекты НВОС и ОПО, относимые к I и II категориям. Тогда ущерб от геохимического загрязнения почв в городе $(B_y^{\rm 3\Pi \Gamma})$ определяется на момент (год) расчета как сумма:

$$B_y^{3\Pi\Gamma} = \sum_{i=1}^n (B_{yiI}^{3\Pi} + B_{yiII}^{3\Pi}),$$

где $B_{yiI}^{3\Pi}$ и $B_{yiII}^{3\Pi}$ — ущерб от загрязнения почв токси-кантами (тяжелыми металлами), соответственно, объектами I и II категории.

При расчете ущерба от каждого предприятия кроме категории его опасности учитывается состав преобладающих токсикантов и глубина их проникновения в почву, отраслевая принадлежность, и рассчитывается условная площадь загрязненных им почв.

$$B_{vil}^{3\Pi} = S_{il}^{3\Pi} \cdot k_i \cdot k_g \cdot k_a \cdot k_p \cdot C_{il},$$

$$B_{yiII}^{3\Pi} = S_{iII}^{3\Pi} \cdot k_j \cdot k_g \cdot k_q \cdot k_p \cdot C_{iII},$$

где i — индекс объекта НВОС; $S_{i1}^{\rm 3\Pi}$ и $S_{i11}^{\rm 3\Pi}$ — площади загрязненных почв i-м объектом соответственно I или II категории; k_j — коэффициент степени химического загрязнения почв; k_g — коэффициент учета глубины загрязнения почвы; k_q — коэффи

¹ Методика определения экономической эффективности затрат в мероприятия по охране окружающей среды. Утв. Госпланом СССР 15 января 1980 // Сборник утвержденных методик. М.: Экономика, 1983. С. 125.

² Методика определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений, рацпредложений, утвержденной постановлением КГНТ, Госпланом СССР, Госизобретений СССР от 14 февраля 1977 года № 481/16/13/3.

³ Нормативные коэффициенты эффективности капитальных вложений (Ен). Приказ Минстроя РФ от 14.09.1992 N 209 "Об утверждении Методики по определению уровня арендной платы за нежилые здания (помещения). URL: https://docs.cntd.ru/document/9034800.

⁴ http://governmtnt.ru/docs/all/132200/

циент учета категории земель и вида разрешенного использования земельного участка; k_p — коэффициент открытости почв в городе; $C_{i\mathrm{I}}$ и $C_{i\mathrm{II}}$ — затраты на вывоз (замену) загрязненной почвы i-м объектом, соответственно, I или II категории с 1 га.

Расчет условной площади загрязнения почв і-м объектом осуществляется исходя из размеров промплощадки, объемов производства, ширины фактической или нормативной СЗЗ, а также радиуса возможного распространения загрязнения за ее пределами (до десятков километров по данным мониторинга). Коэффициент степени химического загрязнения почв рассчитывается как средняя величина по рассматриваемым городам на основе данных наблюдательной сети Росгидромета и организаций, проводящих многолетние наблюдения за загрязнением почв токсикантами промышленного происхождения (ТПП), нефтепродуктами и др., отражаемых в Ежегодниках (2006-2020 гг.) [1]. Конечно, отдельные участки почв в городе могут иметь более высокий класс загрязнения, чем среднее значение по городу. При расчете этого коэффициента учитывалось фактическое накопление в почвах элементов 1 класса опасности: Pb, Zn, Cd, Hg, As; 2 класса опасности: Ni, Cu, Co, Cr, а также характерное для городов загрязнение территории бензапиреном и нефтепродуктами, и радиусы распространения загрязненных почв за пределами СЗЗ. Соотношения фактических значений содержания ТПП в почвах с фоновыми районами существенно различаются в рассматриваемых городах. Поэтому в соответствии с рекомендациями Методики [6], принято, что значение k_i изменяется от 1 до 6.

Коэффициент учета глубины загрязнения почвы определялся авторами в зависимости от расположения оцениваемых городов в различных физико-географических зонах и получил значения от 1.3 до 2. Поскольку оценка проводится по городам, коэффициенту учета категории земель и вида разрешенного использования земельного участка присваивается одно значение $k_q=1.3\ [6]$. Для рассматриваемых городов характерен достаточно высокий показатель запечатанности почв, поэтому в формулу расчетов предлагается ввести коэффициент открытости почв (k_p) , который изменяется от сотых до десятых долей от площади города.

Размер ущерба зависит не только от площади загрязненных почв и степени опасности загрязняющих веществ, но в значительной степени от принятой в расчетах стоимости улучшения состояния почв. Хотя предлагаемые в Методике [6] таксы дифференцируются по лесорастительным зонам, но, к сожалению, в последней ее редакции они слишком укрупнены и недостаточно обосно-

ваны. В ФЗ № 75 рекомендуется "определение размера вреда окружающей среде (в рассматриваемом случае от химического загрязнения почв, захламления территории при размещении отходов и авариях на предприятиях) ...осуществлять исходя из фактических затрат на их восстановление ...в соответствии с проектами рекультивационных и иных восстановительных работ...". Международная практика в этом вопросе также ориентирована на определение затрат по восстановлению природных объектов [5]. Поэтому оценивать ущерб целесообразнее, исходя из затрат на восстановление дорогих городских земель, рекультивируя площади размещения промышленных и бытовых отходов, освобождая территории от захламления после аварийных пожаров и взрывов. Однако учитывая, что оценка загрязненных почв за многие годы является по своей сути накопленным ущербом, но при этом трудно установить "загрязнителя", которому следует предъявить штраф, то в данном случае таксовый подход можно считать допустимым.

Анализ стоимостных показателей вывоза (замены) загрязненной почвы с 1 га, расчетов ущербов от загрязнения почв в разные годы (с учетом приведения их к единой размерности) позволил установить эти величины применительно к аналогичным объектам в отраслях при одинаковой категории опасности.

Для объектов складирования промышленных отходов и ТКО, хвостохранилищ, шламохранилищ, золоотвалов, рассматриваемых, как источники причинения вреда одновременно всем компонентам природы, расчет ущерба ($B_{yr}^{\text{от}}$) производится аналогичным вышеизложенному путем применительно к каждому из них:

$$B_{yr}^{\text{ot}} = \sum_{i}^{n} (S_{r}^{\text{ot}} \cdot C_{r}^{\text{ot}}),$$

где r — индекс объекта складирования отходов; $S_r^{\text{от}}$ — площадь, занимаемая отходами r-го вида; $C_r^{\text{от}}$ — стоимость ущерба от размещения отходов r-го вида (величина ущерба не может быть ниже величины затрат на их рекультивацию).

Основным показателем безопасности ОПО является их аварийность, существенно зависящая от основной деятельности предприятия, возраста и состояния используемого оборудования, соблюдения техники безопасности и других факторов. Ущерб от аварийности производственных объектов — вероятностная величина. Поэтому при его расчете обязательно учитывается частота

⁵ Федеральный закон "Об охране окружающей среды" от 10.01.2002 N 7-ФЗ (последняя редакция). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/

Показатели	Бийск	Комсомольск- на-Амуре	Красноярск	Череповец
Накопленный ущерб от загрязнения почв учтенными объектами, млн руб./его доля в структуре общего ущерба, %:	2618.6/86.7	2370.2/74.9	5534.8/84.8	914.6/25.1
в т.ч. І категории, млн руб.	1925.1	1971.3	4346.0	871.5
в т.ч. II категории, млн руб.	693.5	398.9	1188.8	43.1
Количество учтенных опасных наземных источников заг-	6	4	5	4
рязнения почв, шт.				
Ущерб от их негативного воздействия, млн руб./его доля в структуре общего ущерба, $\%$	129.1/4.3	559.9/17.7	527.6/8.1	2592.2/71.0
Количество учтенных ОПО, шт.	42	71	53	61
Ущерб от их вероятной аварийности воздействия, млн руб./ его доля в структуре общего ущерба, $\%$	272.3/9.0	235.5/7.4	463.2/7.1	142.9/3.9
Общий ущерб от загрязнения почв всеми учтенными источниками, млн руб.	3019.9	3165.6	6525.3	3649.7
Удельный ущерб, тыс. руб./га	104	97	184	279

Таблица 2. Структура ущербов от загрязнения почв различными источниками на примере некоторых городов

повторяемости аварийной ситуации, ее вид и сценарии последствий:

$$B_{yiz}^{aB} = \sum_{iz}^{n} M_{iz} \cdot P_{iz} \cdot C_{iz},$$

где i — индекс объекта ОПО; z — вид возможной аварии (пожары, взрывы, разлитие нефтепродуктов и др.); M_{iz} — число i-х объектов с возможным проявлением аварии z-го вида; P_{iz} — вероятность проявления на i-м объекте аварии z-го вида; C_{iz} — размер возможного ущерба при проявлении на i-м объекте аварии z-го вида.

Результаты оценки ущерба от загрязнения почв и захламления городских территорий отражены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что в городах преобладает накопленный ущерб от загрязнения почв в результате продолжительного выпадения загрязняющих веществ из атмосферы. Максимальная значимость негативного воздействия наземных объектов связана с крупноплощадными и опасными хвостохранилищами в г. Череповец. Доля ущерба от вероятной аварийности ОПО в общем ущербе города больше в Бийске, где среди учтенных преобладали "возрастные" объекты. Сравнение значений удельных годовых ущербов от техногенного воздействия над природным [7] показало превышение первых над вторым от 2 до 8 раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках оценки геоэкологической безопасности урбанизированных территорий предложена методика расчета ущерба от загрязнения почв, одного из показателей техногенной опасности/безопасности городской среды.

В рамках разработки подхода к оценке роли воздействия техногенных факторов в геоэкологической безопасности урбанизированных территорий применительно к загрязнению городских почв можно сделать следующие выводы:

- представительной является выборка наиболее опасных и крупных предприятий, площадь промплощадок которых превышает 50% от площадей производственных и коммунально-складских городских территорий;
- расчет разновременных ущербов должен осуществляться на определенный момент с учетом дисконтирования показателей;
- ориентировочное соотношение рассмотренных видов ущербов от техногенного загрязнения почв складывается следующим образом: B_{ν}^{3H} : B_{ν}^{ot} : $B_{\nu}^{\text{ab}} 82$:10:8.

Расчетами подтверждено преобладание значений показателей техногенного ущерба над ущербом от опасных природных процессов полученного ранее. Сумма этих двух показателей явится основой для дальнейшей интегральной оценки геоэкологической безопасности урбанизированных территорий, а структура ее показателей позволит принимать эффективное решение по улучшению геоэкологической ситуации.

Учет значений ущерба от геоэкологических факторов в общей оценке экологической обстановки позволит перейти к разработке единого показателя, учитывающего экологические и геоэкологические параметры окружающей природной среды города.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Ежегодник. Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения в 2020 году. Обнинск: ФГБУ "НПО "Тайфун", 2021. 128 с. URL: https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/554/TPP_2020.pdf
- 2. Заиканов В.Г., Минакова Т.Б., Булдакова Е.В. Природно-техногенные геоэкологические опасности в городе: формирование, динамика, воздействие // Геоэкология. 2021. № 5. С. 42—56.
- 3. Заиканов В.Г., Минакова Т.Б., Булдакова Е.В., Сависько И.С. Индексы и индикаторы геоэкологической безопасности урбанизированных территорий // Геоэкология. 2019. № 4. С. 94—101.
- 4. *Заиканов В.Г., Минакова Т.Б.* Геоэкологическая оценка территорий. М.: Наука, 2005. 319 с.
- Медведева О.Е. О методике стоимостной оценки вреда окружающей среде в связи с деградацией и загрязнением почв // Экологическое нормирование и управление качеством почв и земель / Под

- общ. ред. С.А. Шобы, А.С. Яковлева, Н.Г. Рыбальского. М.: НИА-Природа, 2013. С. 258–266.
- 6. Методика исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды. Утв. приказом Минприроды России от 08.07.2010 № 238 (с правками 2014 г., 2018 г.). URL: https://docs.cntd.ru/document/902227668
- 7. *Минакова Т.Б., Заиканов В.Г., Булдакова Е.В.* Геоэкологический след в городах России: подходы, оценки, результаты // Геоэкология. 2020. № 6. С. 83—94.
- 8. Решетина Т.В. Управление качеством городских почв в ходе их эксплуатации // Экологическое нормирование и управление качеством почв и земель / Под общ. ред. С.А. Шобы, А.С. Яковлева, Н.Г. Рыбальского. М.: НИА-Природа, 2013. С. 219—229.
- 9. Таргульян В.О., Соколов И.А. Структурный и функциональный подход к почве: почва-память и почва-момент // Сб. Математическое моделирование в экологии. М.: Наука, 1978. С. 17—33.

THE APPROACH TO ASSESSING POLLUTION OF SOIL COMPONENT IN NATURAL-ANTHROPOGENIC SYSTEMS FOR URBAN GEOENVIRONMENTAL SAFETY

T. B. Minakova^a, V. G. Zaikanov^{a,#}, and E. V. Buldakova^a

^a Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulansky per. 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia [#]E-mail: v.zaikanov@mail.ru

The urban geoenvironmental safety depends directly on the properties of geological environment. Natural-anthropogenic urban soils called technozems are one of the indicators of its state. The article suggests an approach to assessing the damage from accumulated soil pollution. Ground pollution is associated with the emission and precipitation of pollutants, with the disposal of industrial and municipal waste, emergency situations at hazardous enterprises, etc. The calculations have confirmed the predominance of human-induced damage over that arisen from hazardous natural processes in the city, with the sum of these damages indicating the degree of geoenvironmental hazard/safety of the city.

Keywords: technogenous factors, hazardous industrial enterprises, geoenvironmental hazard, geochemical soil pollution, soil pollution damage

REFERENCES

- Ezhegodnik. Zagryazneniepochv Rossiiskoi Federatsii toksikantami promyshlennogo proiskhozhdeniya v 2020 godu [Yearbook. Contamination of soils in the Russian Federation with toxicants of industrial origin in 2020]. Obninsk, NPO Taifun Publ., 2021, 128 p. URL: https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/554/TPP 2020.pdf. (in Russian)
- Zaikanov, V.G., Minakova, T.B. Geoekologicheskaya otsenka territorii [Geoecological assessment of territories]. Moscow, Nauka, 2005, 319 p. (in Russian)
- 3. Zaikanov, V.G., Minakova, T.B., Buldakova, E.V. *Prirodno-tekhnogennye geoekologicheskie opasnosti v gorode: formirovanie, dinamika, vozdeistvie* [Naturaltechnogenic geoenvironmental hazards in the city: for-

- mation, dynamics, and impact]. *Geoekologiya*, 2021, no. 5, pp. 42–56. (in Russian)
- Zaikanov, V.G., Minakova, T.B., Buldakova, E.V., Savis'ko, I.S. *Indeksy i indikatory geoekologicheskoi bezopasnosti urbanizirovannykh territorii* [Indices and indicators of geoenvironmental safety for urban areas]. *Geoekologiya*, 2019, no. 4, pp. 94–101. (in Russian)
- Medvedeva, O.E. O metodike stoimostnoi otsenki vreda okruzhayushchei srede v svyazi s degradatsiei i zagryazneniem pochv [The methodology of environmental damage cost assessment due to soil degradation and pollution]. S.A. Shoba, A.S Yakovlev, N.G. Rybal'skii, Eds., Moscow, NIA-Priroda Publ., 2013. pp. 258–266. (in Russian)
- 6. Minakova, T.B., Zaikanov, V.G., Buldakova, E.V. Geoekologicheskii sled v gorodakh Rossii: podkhody, otsenki, rezul'taty [Geoecological footprint in Russian cities:

- approaches, estimates, and results]. *Geoekologiya*, 2020, no. 6, pp. 83–94. (in Russian)
- 7. Metodika ischisleniya razmera vreda, prichinennogo pochvam kak ob'ektu okhrany okruzhayushchei sredy [Methodology for calculating damage to soils as an object of environmental protection]. Approved by the order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, no. 238 dated 08.07.2010 (revised in 2014, 2018). URL: https://docs.cntd.ru/document/902227668. (in Russian)
- 8. Reshetina, T.V. *Upravlenie kachestvom gorodskikh pochv v khode ikh ekspluatatsii* [Quality management of urban
- soils during their operation]. *Ekologicheskoe normirovanie i upravlenie kachestvom pochv i zemel'* [Environmental regulation and management of soil and land quality]. S.A. Shoba, A.S. Yakovlev, N.G. Rybalskii, Eds. Moscow, NIA-Priroda Publ., 2013, pp. 219–229. (in Russian)
- 9. Targulyan, V.O., Sokolov, I.A. *Strukturnyi i funktsion-al'nyi podkhod k pochve: pochva-pamyat' i pochva-mo-ment* [Structural and functional approach to soil: soil-memory and soil-moment]. Collection of articles in mathematical modeling in ecology. Moscow, Nauka Publ., 1978. pp. 17–33. (in Russian)