СОДЕРЖАНИЕ

Номер 2, 2021

Газонасыщенные мерзлые породы криолитозоны

А. Н. Хименков, А. В. Кошурников, Д. О. Сергеев, П. А. Соболев 3

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Геоэкологические аспекты геотермальной энергетики

С. В. Черкасов, А. М. Фархутдинов, И. М. Фархутдинов 17

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Особенности сейсмогравитационных процессов в зонах активного проявления землетрясений Центральной Азии (на примере территории Узбекистана)

Н. Г. Мавлянова, Р. С. Ибрагимов, Т. Л. Ибрагимова, Х. Х. Рахматуллаев 27

Диссипативные геологические образования и модели оценки предельного состояния грунтовых оснований

Г. П. Постоев 41

Отражение количественных динамических характеристик экзогенных процессов в показателях морфологической структуры ландшафтов

А. С. Викторов, Т. В. Орлов, В. Н. Капралова 49

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Сравнительный анализ двух методов оценки качества вод

А. И. Гавришин 57

Влияние разрушения дамбы хвостохранилища в бассейне реки Сунгари (КНР) на качество вод Амура у Хабаровска в апреле 2020 года

В. П. Шестеркин 67

УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

Исследование электрокинетических и электрохимических явлений в фосфогипсе при решении геоэкологических задач

В. Ю. Шигаев, Д. А. Шелепов, А. Е. Хохлов, И. А. Меренов 75

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Применение геоморфометрического анализа рельефа при осуществлении хозяйственной деятельности на территории Архангельской области

Е. В. Полякова, Ю. Г. Кутинов, А. Л. Минеев, З. Б. Чистова 86

ЮБИЛЕИ

Алексей Сергеевич Викторов (к 70-летию со дня рождения) 96

Contents

Number 2, 2021

Gas-saturated frozen soils in the permafrost zone

A. N. Khimenkov, A. V. Koshurnikov, D. O. Sergeev, P. A. Sobolev 3

FUNCTIONING OF NATURAL AND NATURAL ANTHROPOGENIC SYSTEMS

Geoecological aspects of geothermal power engineering

S. V. Cherkasov, A. M. Farkhutdinov, I.M. Farkhutdinov 17

NATURAL AND HUMAN-INDUCED PROCESSES

Specific features of earthquake-induced ground failure in the seismically active zones of Central Asia (by the example of Uzbekistan)

N. G. Mavlyanova, R. S. Ibragimov, T. L. Ibragimova, Kh. Kh. Rakhmatullaev 27

Dissipative geological formations and models for assessing the limit state of ground bases

G. P. Postoev 41

Reflection of the quantitative dynamic characteristics of exogenous processes in metrics of landscape morphological patterns

A. S. Victorov, T. V. Orlov, V. N. Kapralova 49

ENVIRONMENT CONTAMINATION

Comparative analysis of two methods for assessing water quality

A. I. Gavrishin 57

The impact of the tailing pond dam destruction in the Sungari River basin (China) on the quality of the Amur River water near Khabarovsk in April 2020

V. P. Shesterkin 67

UTILIZATION AND DISPOSAL OF WASTES

Investigation of electrokinetic and electrochemical phenomena in phosphogypsum in solving geoecological problems

V. Yu. Shigaev, D. A. Shelepov, A. E. Khokhlov, I. A. Merenov 75

RESEARCH METHODS AND TECHNIQUES

The use of geomorphometric analysis of the relief upon economic activity in the Arkhangelsk region

E. V. Polyakova, Yu. G. Kutinov, A. L. Mineeva, Z. B. Chistova 86

JUBILEES

Aleksei Sergeevich Victorov (to the 70th birthday) 96

УДК 551.345;551.435.53

ГАЗОНАСЫЩЕННЫЕ МЕРЗЛЫЕ ПОРОДЫ КРИОЛИТОЗОНЫ

© 2021 г. А. Н. Хименков[1,*], А. В. Кошурников[2,], Д. О. Сергеев[1], П. А. Соболев[2]**

[1] *Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия*

[2] *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический ф-т, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия*

**E-mail: a_khimenkov@mail.ru*

***E-mail: msu-geophysics@mail.ru*

Поступила в редакцию 19.11.2020 г.
После доработки 24.12.2020 г.
Принята к публикации 11.01.2021 г.

Рассмотрены процессы формирования и разрушения зон повышенного содержания газа в мерзлых породах. В настоящее время теоретическая база изучения данной темы практически не разработана, хотя ее практическая значимость в последние годы резко возросла. Это связано с выбросами газа при бурении скважин в мерзлых породах, выявлением значительной эмиссии парниковых газов в Арктике, обнаружением ранее неизвестных процессов в криолитозоне, например, образование воронок за счет газового выброса. В работе впервые показано, что газонасыщенные зоны в сезонно- и многолетнемерзлых породах имеют все признаки геосистем: локализацию в пространстве, границы, морфологию, индивидуальное строение и свойства, историю развития, иерархию. Рассмотрены основные структурные элементы геосистем газонасыщенных мерзлых пород. Выделено пять типов данных геосистем: деятельного слоя, генетического типа, приуроченных к геологическим структурам; структурно-геологического типа, вторичных, связанных с разложением газогидратов в естественных условиях; и техногенных (за счет теплового или механического воздействия на гидрато- и газонасыщенные мерзлые породы).

Ключевые слова: *мерзлые породы*, *газовые каналы*, *фильтрация газа*, *флюиды*, *геосистема газонасыщенных пород*, *диссоциация газогидратов*, *напорная фильтрация газа*, *стадии развития*

DOI: 10.31857/S0869780921020041

ВВЕДЕНИЕ

По классическому определению, данному А.И. Поповым, “*Мерзлые породы являются многофазными и многокомпонентными системами. По агрегатному состоянию в мерзлых породах следует выделять твердую, жидкую и газообразную составляющие*” [22, с. 11]. Из трех названных основных составляющих мерзлых пород газовая наименее изучена. Наличие газовой компоненты – важная особенность строения мерзлых пород. Газы в порах мерзлых пород могут находиться в адсорбированном и свободном состоянии; они могут присутствовать во льду или воде (при наличии криопэгов или охлажденных пород), заполняющей поры, в виде мелких пузырьков или в растворенном состоянии. Газы оказывают влияние на различные свойства мерзлых пород. Наиболее существенно от газосодержания зависят их физические характеристики: плотность, теплофизические параметры (теплоемкость, теплопроводность и др.), проницаемость, а также физико-механические свойства.

Адсорбированный газ образуется на поверхности грунтовых частиц и на поверхности льда под воздействием молекулярных сил притяжения. Благодаря этим силам на поверхности частиц образуются полимолекулярные газовые “пленки”, нижние слои которых находятся под давлением в несколько десятков или даже сотен мегапаскалей; верхние слои менее прочно связаны с минеральными частицами (испытываемое ими давление близко к атмосферному). Количество адсорбированного газа мало и может составлять несколько процентов от объема породы. Растворенный газ находится в жидкой составляющей породы (в пленках незамерзшей воды вокруг минеральных частиц или в поровом растворе).

Свободный газ заполняет свободное поровое пространство в виде отдельных пузырьков или каналов, его количество зависит от объема свободных пор, давления, степени водо- и льдонасыщения. Газовые гидраты (клатратные соединения газа с водой) формируются при достижении определенных соотношений температуры и давления. Считалось, что многолетнемерзлые поро-

ды непроницаемы для газа, низкие температуры подавляют активность живого вещества, и поэтому накопление газа в криолитозоне невозможно. Данная тема научных исследований казалась незначительной и имеющей только академический интерес.

С середины 1950-х годов начинается интенсивное освоение нефтегазовых месторождений на севере Арктики. При бурении скважин в толще мерзлых пород были отмечены многочисленные газопроявления, выражающиеся в выбросе бурового инструмента и шлама, промывочной жидкости и т.д. Диапазон глубин, с которых происходит большинство выбросов, составляет от 10 до 100 м [19, 4, 31]. Таким образом, было установлено, что в мерзлых породах могут формироваться локальные газонасыщенные зоны, оказывающие неблагоприятное воздействие на проведение буровых работ.

Исследования, проведенные в последние десятилетия, показали, что территориям, сложенным многолетнемерзлыми породами, отводится особая роль в современном цикле CH_4, здесь сосредоточено более 30% всего органического углерода планеты, при этом подавляющая его часть законсервирована в толщах мерзлых пород. Прогнозируемые климатические изменения к 2100 г., по результатам моделирования глубины сезонного оттаивания в модели тепло- и влагопереноса (ИФА РАН), приведут к высвобождению из многолетнемерзлых пород 1.3–1.7 млрд м^3 CH_4 [14]. Оттаивание криогенных толщ ведет к деградации содержащихся в них газогидратов, что, в свою очередь, приведет к эмиссии метана. Эмиссия метана может приобрести массированный характер и достичь уровней, способных вызвать значительное и даже катастрофическое потепление нашей планеты [23]. Таким образом, проблема формирования и накопления газа в мерзлых породах чрезвычайно важна и актуальна, как в теоретическом, так и в практическом отношении.

К настоящему времени сформулированы положения о различных генетических типах газа в мерзлых породах. Накоплен определенный объем данных о содержании газа в деятельном слое, в мерзлых породах различного генетического типа и различных тектонических структурах. Конкретизированы критерии выделения фоновых и повышенных значений газосодержания в породах. Разработаны механизмы криогенной концентрации газа и формирования газогидратов при эпигенетическом и сингенетическом промерзании пород. Выявлены условия и механизмы фильтрации газа в мерзлых породах. Проделанная работа позволила лучше понять процессы формирования газонасыщенных мерзлых пород и их поведение при природных изменениях и техногенных воздействиях.

Тем не менее, изученность этих геологических образований, их свойств, закономерностей распространения и истории развития явно недостаточна. Связано это, в первую очередь, с тем, что газонасыщенные мерзлые породы даже не выделены в отдельный тип образований. Они не являются целенаправленным объектом изучения ни одной из наук о Земле, включая геокриологию. При проведении инженерно-геологических изысканий газовая компонента мерзлых пород (за исключением некоторых показателей гидратосодержащих мерзлых пород) в настоящее время практически не изучается. При этом газонасыщенные мерзлые породы широко распространены в криолитозоне, они прослежены во всех генетических типах отложений и имеют различные размеры и морфологию. Развитие данных образований связано с определенной, общей для них последовательностью событий.

Цель настоящей статьи – выявление общих закономерностей формирования таких криогенных структур, как геосистемы газонасыщенных мерзлых пород, выделяемых авторами и не рассматриваемых ранее в геокриологии.

ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОВЫХ СКОПЛЕНИЙ В МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

В научной литературе существуют различные точки зрения на причины формирования повышенного содержания газа в многолетнемерзлых породах. Исследованиями различных авторов установлено широкое распространение бактериального углекислого газа и метана в мерзлых отложениях и подземных льдах северных территорий и Арктического шельфа [33, 10, 24]. Г.Н. Краевым и Е.М. Ривкиной выявлена динамика криогенной концентрации метана при неравномерном промерзании деятельного слоя и эпигенетического промерзания озерных отложений [16]. В.С. Якушевым показано, что мощное влияние на накопление газа в форме газогидратов в многолетнемерзлых породах оказало неравномерное эпигенетическое промерзание выходящих из субаквального положения морских осадков [31]. В работах С.Е. Агалакова [1], А.Р. Курчикова [18] показано, что мерзлая толща является зоной локального накопления в диапировых структурах глубинного газа, поступающего по разломам. По мнению Б.М. Валяева [9], Р.М. Бембеля и др. [6], понижение температуры и формирование мерзлых пород над газовыми месторождениями севера Западной Сибири могут происходить за счет адиабатического расширения поднимающегося из глубин газа.

В последние годы вышел ряд статей, посвященных рассмотрению особенностей процессов, связанных с миграцией газа в мерзлых породах и льдах, в которых газонасыщенные зоны рассмот-

рены как газодинамические геосистемы [27, 26], на основании лабораторного моделирования изучены процессы фильтрации газа в многолетнемерзлых породах [28]. А.И. Обжиров, изучая распределение природных газов в осадках дальневосточных морей, пришел к выводу, что биогенный метан, образующийся *in situ* в донных отложениях, формирует только региональный фон углеводородных газов, имеющий положительную корреляционную связь с количеством органического вещества в осадках. При этом аномальные концентрации углеводородных газов связаны или с их концентрацией в ходе эпигенетического промерзания осадков, или с поступлением из внешних источников за счет миграции глубинного газа [21].

ПЕРВИЧНЫЕ ГЕОСИСТЕМЫ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ МЕРЗЛЫХ ПОРОД

В естественных условиях содержание газа в отложениях соответствует количеству органики, присутствующей в них. По этому показателю следует выделить озерные, старичные, лагунные, дельтовые, болотные осадки, слой сезонного оттаивания. Под воздействием анаэробных бактерий происходит процесс биологического разложения органики и выделение биогаза, со средним содержанием метана 90%. При этом формируются фоновые для данного генетического типа осадков значения содержания газа (излишки газа выносятся фильтрацией в водную среду или атмосферу). Аномалии содержания газа формируются в тех случаях, когда существуют газонепроницаемый экран или приток газа извне. Для мерзлых пород такие условия создаются при эпигенетическом промерзании осадков. Промерзание и создает непреодолимый барьер для газа, и концентрирует его.

Нижняя граница фронта промерзания всегда неоднородна из-за различий в поверхностных условиях, составе и влажности отложений. Газ от выступающих частей фронта промерзания начинает отжиматься в сторону вогнутых, и там образуется очаг концентрации газа, т.е. формируется своеобразная ловушка, обусловленная не литологией, а сугубо криогенными причинами. Такому же процессу подвергаются и грунтовые воды вместе с растворенными газами. При льдообразовании происходит дополнительное выделение газа. Таким образом, формируются геосистемы газонасыщенных зон в многолетнемерзлых породах.

В организации криогенных газонасыщенных геосистем можно выделить три уровня:

– сезонномерзлые породы;

– генетический, включающий совокупность фаций одного генетического типа;

– структурно-геологический, включающий парагенетические комплексы пород в пределах геоструктур.

Геосистемы газонасыщенных пород деятельного слоя распространены в тонком верхнем слое литосферы (десятки сантиметров), ежегодно промерзающем и оттаивающем. Отличительными особенностями деятельного слоя в пределах распространения многолетнемерзлых пород являются повышенная увлажненность, большие градиенты температур при промерзании, значительная неоднородность температурного поля, обусловливающая неравномерность промерзания. Подстилается он газо- и водонепроницаемым слоем многолетнемерзлых пород. Все это приводит к тому, что во время сезонного промерзания в незначительном слое породы создаются условия для существенного перераспределения воды и газа. Процессы, происходящие при формировании сезонномерзлого слоя, являются моделью процессов, реализующихся при эпигенетическом промерзании пород в больших объемах и на больших площадях.

Г.Н. Краевым [15] был поставлен лабораторный эксперимент по изучению миграции газа при одностороннем промерзании насыщенных метаном пород (рис. 1). В промерзшем песке аллаиховской свиты в верхних трех срезах метан содержался в концентрации 0–0.5 мл/кг, а в нижнем заметно больше – 2.3 мл/кг. Концентрация CH_4 в суглинках в верхних 10 см составляла 3.8 ± 0.2 мл/кг. Ниже, у основания контейнера концентрация была заметно меньше – 2.5 ± 0.1 мл/кг. Результаты эксперимента показали, что в суглинках метан при промерзании сконцентрировался в верхней части разреза, в нижней части за счет миграции влаги (и газа вместе с ней) к фронту промерзания содержание газа даже уменьшилось. В песках наблюдалось его отжатие к газонепроницаемой подошве. Полученные данные позволили автору сделать вывод о том, что распределение метана в эксперименте близкое к наблюдаемому в природе – результат миграции метана вместе с поровым раствором при промерзании сверху и отжима при промерзании снизу, со стороны мерзлых синкриогенных отложений [15].

В сезонномерзлом слое, несмотря на его незначительные вертикальные размеры и кратковременность существования, формируются локальные зоны повышенного содержания газа [16]. Метан с первого дня промерзания равномерно накапливался в талых горизонтах почвы, перекрытых промерзшим слоем, со скоростью порядка 0.015 $см^3$/(кг сут). В течение зимы в почвах Северо-Востока Сибири формируется 2–3 г/$м^2$ метана при мощности сезонноталого слоя (СТС) 50–60 см и около 1 г/$м^2$ в слое мощностью 30 см. Авторы приходят к выводу, что средние значения

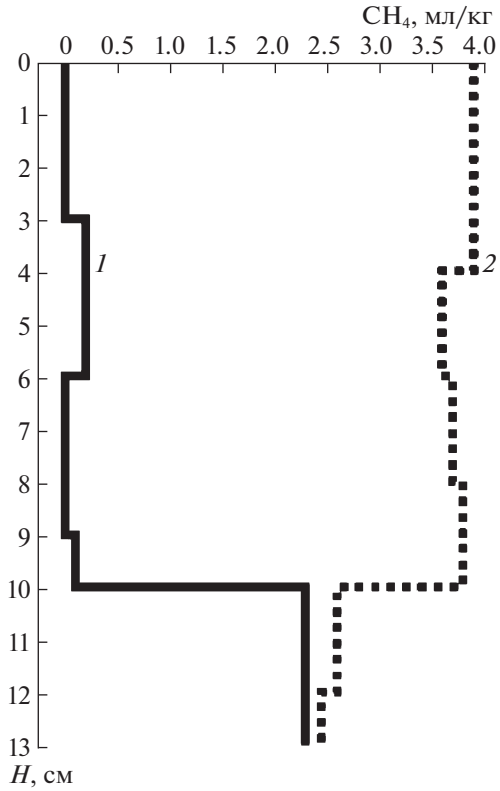


Рис. 1. Распределение метана в песках (*1*) и суглинках (*2*) в результате промораживания одинаково и однородно насыщенных талых грунтов [15].

концентрации метана у подошвы СТС – около 2 см^3/кг могут формироваться лишь за счет локального продуцирования. Но наблюдаемые местами локальные максимумы, многократно превышающие эти значения, могут быть объяснены только при допущении возможности перераспределения газа по латерали. Это происходит из-за неровностей фронта промерзания. В вогнутых частях подошвы слоя сезонного промерзания формируются своеобразные газовые микроловушки. Например, для формирования концентрации 15 см^3/кг (24 см^3/дм^3 в пределах 1 дм^2) на одном из изученных участков потребовался биогенный метан не только из промерзающего вышележащего модельного столбика почвы объемом 5 дм^3, но еще из 11–12 соседних. Данные закономерности перераспределения газа при промерзании СТС не зависят от генезиса отложений. В естественных условиях содержание метана в нижней части СТС составляло в среднем 1.4 см^3/кг.

Криогенные газонасыщенные геосистемы генетического типа формируются при эпигенетическом промерзании пород определенного генетического типа. Количество органики и, соответственно, содержание газа определяются фациальными условиями, что позволяет оценить вероятность распределения газонасыщенных зон в пределах генетического типа. Для примера рассмотрим формирование газонасыщенной зоны в осадках старичного озера [16] (рис. 2). Разложение органики при недостатке кислорода приводит к образованию и накоплению метана в молодых озерных отложениях. Эпигенетическое промерзание озера начинается после заполнения его осадками или осушения при дренировании. Промерзание верхнего слоя осадков приводит к формированию газонепроницаемого слоя и повышению давления в талой зоне. Под слоем мерзлого грунта, в более глубоких слоях талых осадков метаногенез продолжает развиваться. Продолжающееся промерзание вытесняет большую часть метана вниз в грубозернистые слои с значительным объемом свободных пор, где он накапливается в свободном виде. Исходя из полевых наблюдений, данных радиоуглеродного датирования и лабораторных исследований, авторы предполагают, что в зависимости от природных условий и динамики замерзания метан, содержащийся в талых осадках, может при их эпигенетическом промерзании сместиться вниз на десятки метров и накапливаться в литологических карманах [32].

Следует добавить, что существование карманов, в которых при промерзании талых осадков могут накапливаться отжимающиеся газы, может быть обусловлено не только литологией, но и морфологией фронта промерзания. Кроме того, газ может накапливаться не только в свободной форме, но и в виде газогидратов, поскольку возникающие давления до 30 кг/см^2, большое количество воды и газа при отрицательных температурах создают для этого условия.

Важнейшей геологической особенностью верхних горизонтов субмаринной части литосферы является широкое распространение газосодержащих грунтов. Выделяются следующие элементы геосистемы системы – газонасыщенные морские осадки [2, 29, 20]:

– газ (биогенный, термогенный и биогенно-термогенный); в осадках (породах) он находится в виде пузырьков, окруженных водой (кристаллами льда, соли), в растворенном (в поровом пространстве) или в свободном виде, а также в твердом состоянии (газогидраты);

– осадки, включающие минеральные и органические компоненты, а также соли и воду;

– газовыделяющие структуры (зоны генерации): поверхностные газогенерирующие осадки (биогенный газ), глубинные газогенерирующие породы (катагенный газ), гидратосодержащие породы;

– газовые потоки в осадочной толще (зоны транзита): газовые “трубы” (“столбы”, “колонны”);

– газовые ловушки (зоны накопления газа), газогидратные толщи, газовые карманы, обшир-

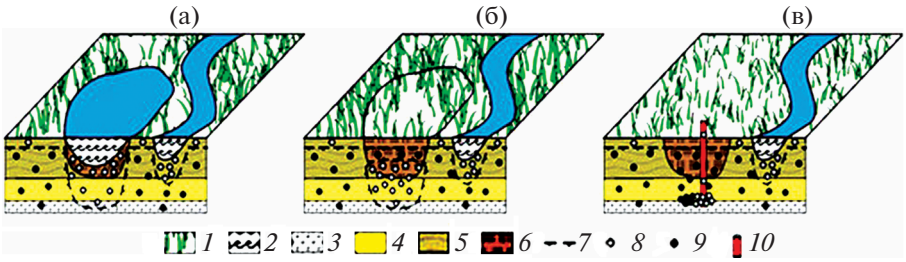


Рис. 2. Палеоэкологическая реконструкция участка на Колымской пойме: а – талые осадки под пойменным озером с потенциальным образованием метана; б – промерзание обогащенных метаном осадков после осушения озера; в – метан, захваченный в порах и полостях мерзлой породы после полного замерзания талика. *1* – пойма; *2* – речные и озерные воды; *3* – русловой гравийный слой; *4* – речной аллювий, слой песка; *5* – пойменный аллювий, иловый слой; *6* – озерные отложения, торфяные илы; *7* – граница вечной мерзлоты; *8* – свободный метан; *9* – захваченный метан; *10* – скважина 3.4-07 глубиной 25 м [32].

ные скопления свободного газа в приповерхностных осадках под региональными флюидоупорами, в том числе под подводными реликтовыми многолетнемерзлыми породами (“газовые фронты”), домы (невысокие придонные купольные структуры), купола газового вспучивания, трещины растяжения;

– флюидопроводящие структуры (на донной поверхности): линейные (зоны тектонических разломов, трещины), борозды выпахивания айсбергов (плугмарки).

Фоновые значения концентрации метана в эпигенетических мерзлых породах различного генезиса приведены в табл. 1. Даже в одном генетическом типе наблюдается значительный разброс значений содержания газа. Минимальные и максимальные значения могут отличаться на порядок (для прибрежно-морских глин). При этом, основную роль играет криогенная концентрация газов в ходе эпигенетического промерзания.

Криогенные газонасыщенные геосистемы структурно-геологического типа формируются при совместном взаимодействии нескольких факторов:

– тектонического, связанного с образованием локальных тектонических структур, обусловливающих движение газа к поверхности и накопление их в куполах;

– гидрологического, связанного с движением мощных потоков грунтовых газонасыщенных вод к поверхности;

– геологического, связанного с формированием мощной водонасыщенной, слоистой разновозрастной, полигенетической толщи;

– криогенного, обусловившего эпигенетическое промерзание литологически разнородной, водо- и газонасыщенной толщи, в результате чего формируется сложно построенный парагенез криогенных образований, включающий пластовые льды, льдистые мерзлые породы, криопэги, горизонты газогидратов и “карманы” напорных свободных газов.

В результате взаимодействия перечисленных и иных факторов формируются наиболее мощные криогенные газонасыщенные геосистемы. Основа их развития уже не промерзание отдельных генетических типов отложений. Общая геологическая история, связанная с локальными тектоническими структурами, и общая направленность криогенного воздействия обусловливают развитие комплекса парагенетически связанных друг с другом мерзлотно-геологических формаций.

Таблица 1. Концентрация метана (ppmV) в мерзлых породах [10]

Возраст	МИС 1			МИС 2			МИС 2-3			МИС 5		
				Генезис			Болотный, озерно-аллювиальный, эоловый			Морской, прибрежно-морской		
Состав	Пески (6)*			Пески, супеси (7)			Пески, супеси, суглинки (10)			Глины, суглинки (8)		
CH_4	Сред.	Макс.	Мин.	Сред.	Макс.	Мин.	Сред.	Макс.	Мин.	Сред.	Макс.	Мин.
Динамический метод	–	–	–	115	217	14	3329	5248	104	1682	2215	1148
Метод “head space”	68	212	18	186	460	15	1009	1969	97	2884	5515	585

* В скобках количество образцов

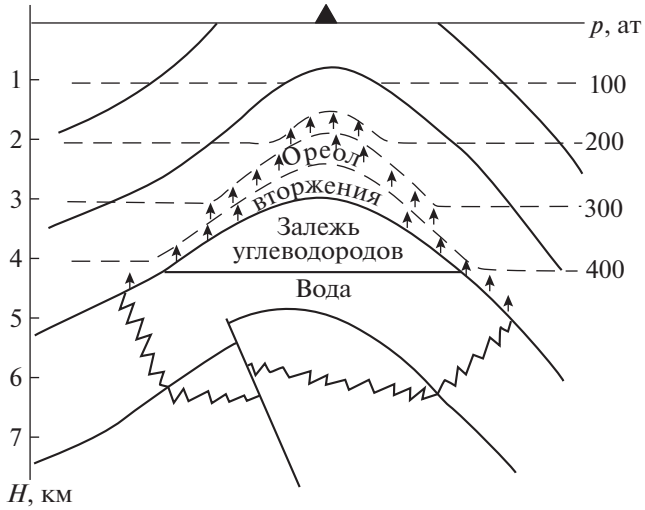


Рис. 3. Распределение повышенных поровых давлений в ореоле вторжения над углеводородной залежью [3].

Скопления газа в виде свободного газа и газогидратов, являются элементами (подсистемой) этой закономерно построенной геосистемы. При изучении зон повышенной газонасыщенности в мерзлых породах их можно рассматривать как самостоятельные криогенные геосистемы [25]. Они имеют все признаки, позволяющие это делать, а именно наличие естественных границ, морфологию, определенное положение в пространстве, пространственно-временную упорядоченность структуры, внутренние связи, свойства.

Для понимания особенностей распределения газа в мерзлых породах следует рассмотреть модель изменения по вертикали пластового давления внутри залежей газовых месторождений, предложенную К.А. Аникеевым [3]. Важнейший элемент этой модели – ореол вторжения, который возникает в результате интенсивного проникновения в глинистую покрышку высоконапорных флюидов из залежи. Вторгающиеся флюиды порождают аномально высокие давления как в порах глинистых пород, так и в песчаных линзах, секущих трещинах и “карманах”, особенно мобильных в зонах проводящих разломов. Изобары сверхвысоких давлений в ореолах вторжения зависят от высоты залежи. В своде залежи избыточное давление максимально, а к периферии ослабевает (рис. 3).

Существует пространственная связь местоположения зоны газонасыщенных мерзлых пород с антиклинальными поднятиями. Наибольшее содержание газа в многолетнемерзлых породах севера Западной Сибири приурочено к приподнятым блокам в виде тектонических валов и сводов. В осадочном чехле севера Западной Сибири эти своды и мегавалы образуют структуры размерами в десятки и сотни километров и амплитудой в сотни метров (рис. 4) [17].

Приуроченные к газоносным структурам пластовые воды имеют повышенную газонасыщенность. По данным изучения разреза неокомских отложений на 39 площадях в северных районах Западно-Сибирского мегабассейна, концентрация метана в них колеблется от 78% до 98%. В большинстве случаев газонасыщенность более 3 см^3/см^3 указывает на наличие в пластовых условиях свободной газовой фазы, что подтверждается получением фонтанов газа с водой [7]. Геофизические исследования арктического шельфа показали прямую пространственную связь местоположения газонасыщенных зон, в том числе и в виде газогидратов, с антиклинальными поднятиями в осадочном чехле. Таким образом, еще до промерзания над тектоническими структурами, в которых формируются залежи углеводородов, наблюдается закономерное распределение газов. Высоконапорные мелкие скопления углеводородов распространены в глинистой покрышке лишь в пределах контура залежи. При удалении от свода аномальность пластового давления в этих скоплениях уменьшается, а за контуром залежи исчезают газопроявления и в покрышке [12]. При промерзании, вследствие криогенной концентрации газов и формировании мерзлотного экрана, эта зависимость вероятно будет выражена еще сильнее.

Геохимические исследования рассеянных углеводородных газов, проведенные на территории Бованенковского и Харасавейского ГКМ, показали неравномерность их концентрации в верхних горизонтах многолетнемерзлых пород. В скважинах глубиной до 3 м, расположенных в контуре месторождений, значения концентраций углеводородных газов значительно выше, чем за пределами контуров (табл. 2). При близких процентных содержаниях метана в контурах газоносных структур и за их пределами непосредственно над месторождениями содержание данного газа более чем в 2 раза превышает значения законтурной части. Данное распределение значений концентрации углеводородных газов отражает общие закономерности газонасыщенности мерзлых пород в районах газовых месторождений.

Бугры пучения. К газонасыщенным криогенным геосистемам следует отнести и многолетние бугры пучения (гидролакколиты). Размеры их изменяются в больших пределах: диаметр основания от 20 до 250 м, а высота – от 2 до 70 м. Кровля бугров обычно состоит из переслаивающихся льдистых суглинков и супесей мощностью 2–10 м, под которыми залегает ледяное ядро мощностью до десятков метров. Данные образования формируются при эпигенетическом промерзании озерных отложений (чаще всего термокарстовых).

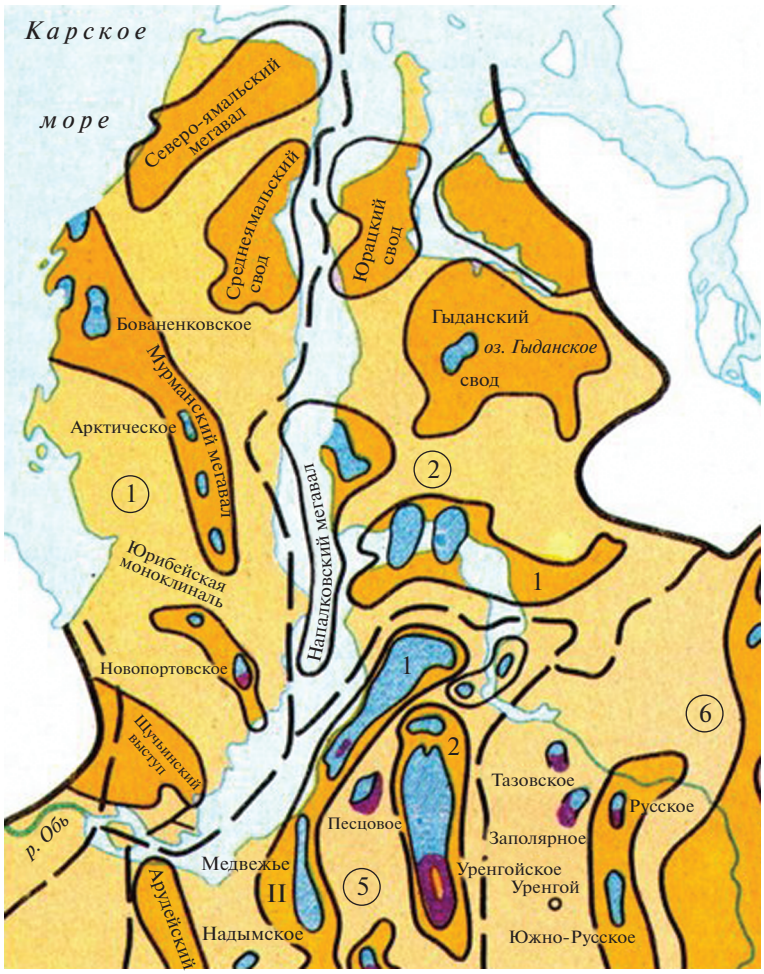


Рис. 4. Фрагмент карты “Западно-Сибирская нефтегазоносная провинция” [11].

В этих условиях промерзание происходит по типу “закрытых систем”, характерной особенностью которых является возникновение криогенного напора, приводящего к концентрации воды и растворенного газа в локальной зоне под растущим бугром. Бугры вырастают в промерзающих озерных котловинах постепенно в течение длительного времени, поднимаясь со скоростью от едва заметной до превышающей 0.5 м/год. Апикальные части ядра ледяных бугров бывают обогащены крупными воздушными включениями за счет выделения воздуха при льдообразовании, в результате чего здесь образуются обширные воздушные полости [30]. Перекрывающие газонасыщенные зоны низкотемпературные льдистые мерзлые породы не позволяют газам, находящимся под давлением, поступать в атмосферу. Растущие бугры подстилаются талыми водоносными горизонтами или водяными линзами мощностью до 2 м, обладающими гидравлическим напором.

Таблица 2. Средние значения газохимических показателей поверхностных отложений Бованенковского и Харасавейского ГКМ [8]

Углеводородный газ (УВГ)	Содержание УВГ, $см^3/кг$	
	в контуре газоносности	за контуром газоносности
CH_4	338.18	141.84
C_2H_6	0.4225	0.2703
C_3H_8	0.23148	0.2471
C_4H_{10}	0.0671	0.0398
C_5H_{12}	0.0782	0.0719
C_6H_{14}	0.005	0.0003
CH_4 (в % от суммы УВГ)	**98.72**	**98.63**

ВТОРИЧНЫЕ ГЕОСИСТЕМЫ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ МЕРЗЛЫХ ПОРОД

Вторичные газонасыщенные геосистемы формируются при разрушении первичных систем,

которое, в первую очередь, связано с растеплением мерзлых пород и диссоциацией газогидратов в естественных условиях или в результате техногенных воздействий. В стабильных геокриологических условиях газовая составляющая находится в равновесном "законсервированном" состоянии. Газовые карманы в многолетнемерзлых породах, в которых газ находится в свободном состоянии, гидратосодержащие мерзлые породы, газонасыщенные субаквальные осадки – все эти геосистемы существуют столетия и тысячилетия. Выход геосистемы газонасыщенных многолетнемерзлых пород или хотя бы части ее из устойчивого термодинамического состояния запускает процессы ее адаптации к новым условиям, выражающиеся в повышении давления в газовой составляющей. Увеличение давление газа в мерзлых породах возникает при повышении их температуры, за счет чего начинается разложение газогидратов, или при расширении свободного газа, а также при снятии внешней нагрузки (например, при таянии ледника или уменьшения глубины моря). В свою очередь, увеличение давления газа приводит к деформациям мерзлого массива, газ начинает фильтроваться в сторону меньших давлений, в большинстве случаев к поверхности.

В результате фильтрационно-деформационного механизма [26] формируется локальная газонасыщенная зона, пронизывающая мерзлый массив, в которой газ находится при повышенном давлении. Низкотемпературные мерзлые породы, слагающие верхнюю часть разреза, до определенного момента сдерживают рвущийся вверх поток газа, но по достижению определенного предела прочности, происходят разрыв кровли и взрыв, формирующий воронку газового выброса. При диссоциации газогидратов выделяется свободный газ, находящийся под давлением, который начинает фильтроваться сквозь высокотемпературные мерзлые породы в область меньших гидростатических и литостатических давлений.

При разработке математических или феноменологических моделей вторичных геосистем газонасыщенных мерзлых пород, следует учитывать, что с начала своего зарождения и на протяжении всего жизненного цикла они представляют из себя локальные саморазвивающееся геодинамические геосистемы, развитие которых имеет вероятностный характер.

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Следует отметить, что имеются лишь единичные данные о связи прочностных характеристик мерзлых грунтов с их газонасыщенностью. Публикации по данной теме только начинают появляться в последнее время. В результате исследований, проведенных специалистами ИГЭ РАН [13], выявлено, что уже при незначительных повышениях температуры в мерзлых грунтах начинается выделение газов. При внешнем давлении 0.001 МПа (минимально возможное для установки трехосного сжатия) газовыделение начинается при отрицательной температуре –5°С, достигает своего максимума при +1°С для песчаных грунтов и –2°С для суглинка, затем интенсивность выделения газовой составляющей снижается. Выявлено, что температура начала выделения газа с ростом объемного сжимающего давления постепенно снижается до –8°С (при давлении 0.2 МПа). Исследования прочностных характеристик мерзлых грунтов после газовыделения при различных отрицательных температурах показали, что величина объемного сжимающего давления оказывает значительное влияние на сцепление и угол внутреннего трения, особенно при температурах от –5°С до –7°С. Причем это влияние выражено по-разному для песка и суглинка, что связано с особенностями фазового состава влаги в этих грунтах [13].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящее время газовая составляющая многолетнемерзлых пород, как структурный элемент мерзлых пород практически не изучена. Есть лишь единичные работы, посвященные данной теме. Прежде следует выделить публикации Ю.Б. Баду [5], в которых рассматриваются мерзлые породы газоносных структур севера Западной Сибири. Он выделяет криогенную толщу в газоносной структуре, как многокомпонентную и многофазную криолитологическую систему в виде составной части газоносной структуры (ГС) (рис. 5).

Она состоит из яруса мерзлых пород и яруса охлажденных пород. Подошва криогенной толщи отбивается по положению нулевой изотермы, а подошва мерзлой – по изотерме температуры начала замерзания. При выделении ГС предлагается учитывать: ее геотектоническое положение, возраст и генезис отложений, геоморфологическое устройство поверхности, фациальную обстановку осадконакопления, вещественный состав мерзлых пород, а также распределение по разрезу их температуры, мощности, льдистости и газонасыщенности.

В данной редакции формулировка "газоносной структуры" полность поглощает понятие "криогенная толща". При этом в определении ГС основное внимание уделено литогенной основе. Ни в геосистеме ГС, ни в ее подсистеме – "криогенной толще", газовая составляющая в виде структурного элемента не рассматривается. Тем не менее, формирование газонасыщенных зон мерзлых пород, даже совпадающих со структурами газовых месторождений, осуществляется в

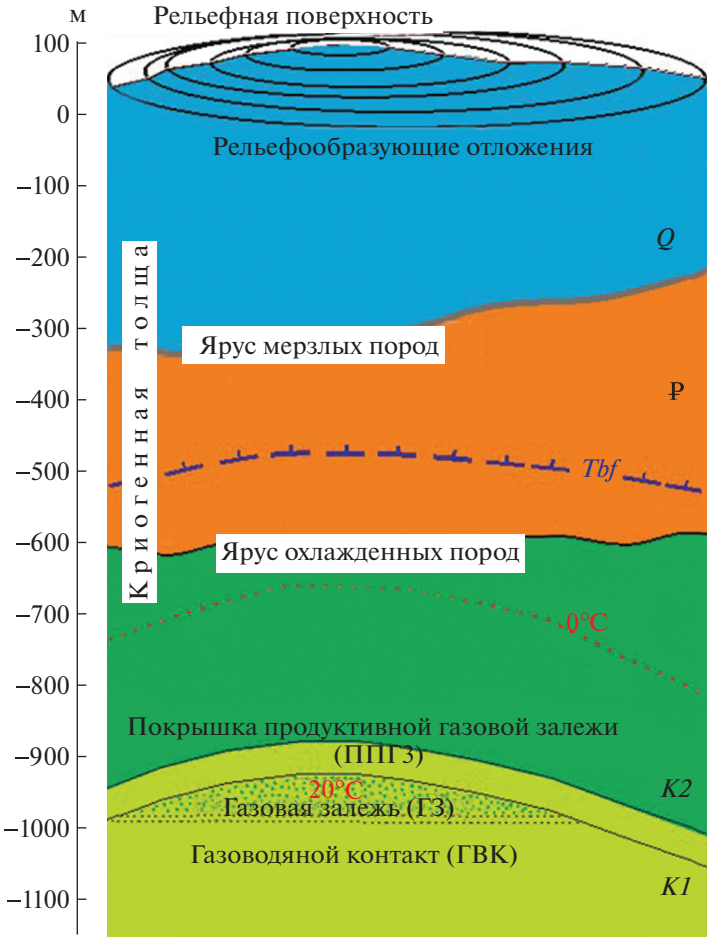


Рис. 5. Элементы газоносной структуры и криогенной толщи [5].

особом режиме. Этот режим только частично связан с общими закономерностями формирования ГС, и во многом определяется спецификой криогенной истории, включая криогенную концентрацию газа.

По нашим представлениям, геосистемы газонасыщенных мерзлых пород являются структурным элементом криогенных геосистем [25] и представляют из себя локальные зоны повышенного, относительно фоновых значений, содержания газа (в свободном виде или в виде газогидрата). Они имеют особую историю развития, определенное положение в пространстве, естественные границы, морфологию, структуру, внутренние связи, свойства, Структура газовой составляющей геосистем газонасыщенных мерзлых пород отражает историю накопления и преобразования газа при переходе геологического объекта из талого состояния в мерзлое.

Критериев выделения газонасыщенных мерзлых пород пока не разработано. В качестве предварительного обсуждения можно предложить следующие:

– содержание газа в породах, превышающее фоновое;

– содержание газа в мерзлых породах, которое существенным образом изменяет их физико-механические свойства.

Геосистемы газонасыщенных мерзлых пород отличаются большим разнообразием сценариев развития и комплексов процессов, обусловливающих их формирование, структуру и морфологию. Тем не менее, можно выделить некоторую общую последовательность стадий их развития. Каждая газонасыщенная геосистема в многолетнемерзлых породах проходит 4 основных стадии развития: 1 – генерация газа; 2 – перераспределение или транзит газа; 3 – накопление газа. Локальная зона содержащая газ под давлением крайне неустойчива и со временем начинает разрушаться, это обусловливает необходимость выделения 4 этапа – ее разрушение. Выделенные стадии отражают направленность и стадийность развития геосистем газонасыщенных мерзлых пород.

На первой стадии происходит генерация и первичное накопление в тех или иных геологических условиях (сезонноталый слой, талики, область повышения температуры или снижения внешнего давления в гидратосодержащих породах, зоны разломов, связанные с газовыми флюидами из нижележащих горизонтов и др.).

Вторая стадия соответствует перераспределению газа из областей первичного накопления в смежные области, которое происходит под воздействием возникающего давления, обусловленного различными причинами (криогенная концентрация, перепад давлений в различных частях порового пространства). Движение газа может происходить по пористым, трещиноватым, водонасыщенным горизонтам и зонам таликов, повышенных тепловых потоков, аномально высоких давлений и высокотемпературных мерзлых пород. Для таликов в многолетнемерзлых породах при промерзании и возникновения криогенного напора зона транзита совпадает с областью первичного накопления газа.

На третьей стадии формируются зоны накопления газовых флюидов (газовые ловушки, газовые карманы, горизонты газогидратов). Эти зоны могут развиваться на небольшой глубине, под кровлей низкотемпературных или льдонасыщенных многолетнемерзлых пород, являющихся экраном, препятствующим движению газовых флюидов. Кроме того, формирование газовых ловушек обусловлено литологическим фактором, наличием газонепроницаемых глинистых горизонтов. В зонах накопления газы находятся под повышенным давлением.

На четвертой стадии на контакте области накопления газовых флюидов и перекрывающих мерзлых пород формируются пластические и разрывные деформации. В некоторых случаях они проявляются в виде бугров пучения. После того как давление преодолеет прочность кровли могут наблюдаться взрывные процессы с выбросами мерзлой породы и формированием воронок газового выброса. В других случаях газ может фильтроваться по образовавшимся трещинам и просачиваться на поверхность, что наблюдается в осадках и водах некоторых озер на севере Западной Сибири.

Выделенные стадии соответствуют жизненному циклу геосистем газонасыщенных мерзлых пород и отражают общую последовательность смены формирующих их процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По содержанию газа выделяются две группы мерзлых пород. В одной содержание газа близко к средним значениям в талых породах (фоновое значение); во второй – содержание газа достигает аномальных значений, значительно превышающих фоновые. Повышенное содержание газа формируется в результате различных процессов (криогенная концентрация, поступление глубинного газа по трещинам и различным зонам тектонических деформаций, выделение газа при разложении газогидратов).

Газонасыщенные мерзлые породы представляют из себя геосистемы, имеющие историю развития, определенное положение в пространстве, естественные границы, морфологию, структуру, внутренние связи, свойства. Структура геосистемы газонасыщенной мерзлой породы отражает историю накопления и преобразования газа при переходе геологического объекта из немерзлого состояния в мерзлое.

Полный цикл развития газонасыщенная геосистема в многолетнемерзлых породах включает 4 основных стадии: 1 – генерации газа; 2 – транзита газа; 3 – накопления газа; 4 – разрушения. В зависимости от природных условий сценарии развития отдельных геосистем могут отличаться, что отражается в их морфологии, строении, условиях залегания.

Выделяются 5 типов криогенных газонасыщенных геосистем:

1) деятельного слоя, в которых газ концентрируется за счет криогенного напора при неравномерном промерзании;

2) генетического типа (озерные, лагунные, морские); в них газ концентрируется за счет криогенного напора при эпигенетическом промерзании или за счет поступления с глубины;

3) структурно-геологического типа, которые приурочены к месторождениям углеводородов и связаны тектоническими структурами (купола, валы, разломы); газ поступает с более глубоких горизонтов по системе трещин и может смешиваться с газом, присущим генетическому типу, вследствие чего формируются смешанные криогенные газонасыщенные геосистемы;

4) вторичного типа, формирование которых связано с разложением газогидратов в естественных условиях из-за растепления многолетнемерзлых пород и последующей миграции выделившегося газа из области диссоциации по зоне транзита в область накопления; причиной растепления может быть, как изменение поверхностных условий (поверхностные водоемы, смена растительности, увеличение толщины снежного покрова), так и потепление климата;

5) техногенного типа, формирование которых обусловлено тепловым или механическим воздействием инженерных сооружений на газонасыщенные мерзлые породы.

Геосистемы газонасыщенных мерзлых пород встречаются на всей территории криолитозоны,

отличаясь между собой масштабами проявлений, которые зависят от геолого-тектонических и мерзлотных условий накопления газа.

Недостаточная изученность не позволяет в настоящее время создать общую теорию их образования, это дело будущего. Для этого потребуются нетривиальные и инновационные подходы, не укладывающиеся в русло традиционных представлений, существующих в геокриологии.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания и плана НИР ИГЭ РАН по теме № г.р. АААА-А19-119021190077-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Агалаков С.Е.* Газовые гидраты в туронских отложениях на севере Западной Сибири // Геология нефти и газа. 1997. № 3. С. 16–21.
2. *Андреев В.М., Туголесов Д.Д., Хренов С.Н.* Грязевые вулканы и нефтегазопроявления российского сектора Черного моря // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2006. № 2. С. 50–59.
3. *Аникеев К.А.* Прогноз сверхвысоких пластовых давлений и совершенствование глубокого бурения на нефть и газ. М.: Недра, 1971. 168 с.
4. *Арэ Ф.Э.* Проблема эмиссии глубинных газов в атмосферу // Криосфера Земли. 1998. Т. II. № 4. С. 42–50.
5. *Баду Ю.Б.* Криогенная толща газоносных структур Ямала. О влиянии газовых залежей на формирование и развитие криогенной толщи. М.: Научный мир, 2018. 232 с.
6. *Бембель Р.М., Бембель С.Р., Кашин А.Е., Ласковец Е.Б.* Связь очагов активного нефтегазонакопления и глубинных криогенных источников // Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике. Новосибирск: Наука, 1997. С. 193–199.
7. *Беспалова С.Н.* Оценка перспектив нефтегазоносности неокомских отложений севера Западной Сибири по геохимическим показателям // Геология нефти и газа. 1984. № 12. С. 22–26.
8. *Бондарев В.Л., Миротворский М.Ю., Облеков Г.И. и др.* Геохимические методы при обнаружении и локализации залежей углеводородных газов (УВГ) в надпродукгивных отложениях газоконденсатных месторождений полуострова Ямал // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2005. № 11. С. 17–22.
9. *Валяев Б.М.* Приповерхностный интервал нефтегазонакопления: специфика и масштабы утилизации углеводородных флюидов // Геология морей и океанов: матер. XVII Междунар. науч. конф. (школы) по морской геологии. М.: ГЕОС, 2007. Т. 1. С. 92–95.
10. *Васильев А.А., Стрелецкая И.Д., Мельников В.П., Облогов Г.Е.* Метан в подземных льдах и мерзлых четвертичных отложениях Западного Ямала // ДАН. 2015. Т. 465. № 5. С. 604–607.
11. Горная энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1986. Т. 2. 575 с.
12. *Дурмишьян А.Г.* Значение аномально высоких пластовых давлений при поиске газовых и газоконденсатных залежей // Газовая промышленность. 1961. № 7. С. 1–3.
13. *Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Котов П.И., Собин Р.В.* Динамика выделения газа из мерзлых грунтов при изменении температуры и давления // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2020. № 4. С. 15–20.
14. *Краев Г.Н.* Закономерности распространения метана в многолетнемерзлых породах на Северо-Востоке России и прогноз его поступления в атмосферу: автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М.: ЦЭПЛ РАН, 2010. 20 с.
15. *Краев Г.Н., Шульце Э.Д., Ривкина Е.М.* Криогенез как фактор распределения метана в горизонтах мерзлых пород // ДАН. 2013. Т. 451. № 6. С. 684–687.
16. *Краев Г.Н., Ривкина Е.М.* Накопление метана в промерзающих и мерзлых почвах криолитозоны // Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17. № 3. С. 173–184.
17. *Курасов И.А., Ступакова А.В.* Тектоническое строение северной части Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2014. № 4. С. 56–64.
18. *Курчиков А.Р.* Гидрогеотермический режим углеводородных скоплений Западной Сибири // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 11–12. С. 1846–1853.
19. *Мельников П.И., Мельников В.П., Царев В.П., Дегтярев Б.В. и др.* О генерации углеводородов в толщах многолетнемерзлых пород // Известия АН СССР. Серия геологическая. 1989. № 2. С. 118–128.
20. *Миронюк С.Г., Отто В.П.* Газонасыщенные морские грунты и естественные газовыделения углеводородов: закономерности распространения и опасность для инженерных сооружений // Геориск. 2014. № 2. С. 8–18.
21. *Обжиров А.И., Телегин Ю.А., Окулов А.К.* Газогеохимические поля и распределение природных газов в дальневосточных морях // Подводные исследования и робототехника. 2018. № 1 (25). С. 66–74.
22. *Попов А.И.* Криолитология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1985. 239 с.
23. *Сергиенко В.И., Лобковский Л.И., Семилетов И.П. и др.* Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей восточной Арктики как возможная причина “метановой катастрофы”: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // ДАН. 2012. Т. 446. № 3. С. 330–335.
24. *Стрелецкая И.Д., Ванштейн Б.Г., Васильев А.А., Облогов Г.Е.* Содержание и генезис метана в мерзлых отложениях и подземных льдах на побережье и шельфе Карского моря // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. № 4 (23). С. 67–72. https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art67
25. *Хименков А.Н.* Геосистемный подход в геокриологии // Криосфера Земли. 2013. Т. 17. № 2. С. 74–82.
26. *Хименков А.Н., Станиловская Ю.В.* Феноменологическая модель формирования воронок газового

выброса на примере Ямальского кратера // Арктика и Антарктика. 2018. № 3. С. 1–25. https://doi.org/10.7256/2453-8922.2018.3.27524

27. *Хименков А.Н., Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Сергеев Д.О., Станиловская Ю.В.* Флюидодинамические геосистемы в криолитозоне. Ч. 2. Криолитодинамические и криогазодинамические геосистемы // Арктика и Антарктика. 2018. № 2. С. 48–70. https://doi.org/10.7256/2453-8922.2018.2.26377
28. *Хименков А.Н., Кошурников А.В., Соболев П.А.* Лабораторное моделирование фильтрации газа в многолетнемерзлых породах // Арктика и Антарктика. 2019. № 4. С. 52–73. https://doi.org/10.7256/2453-8922.2019.4.30997
29. *Шахова Н.Е.* Метан в морях Восточной Арктики: автореф. дисс. ... докт. геол.-мин. наук. М.: ИО РАН, 2010. 44 с.
30. *Шумский П.А.* Основы структурного ледоведения. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 492 с.
31. *Якушев В.С.* Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. М.: ВНИИГАЗ, 2009. 192 с.
32. *Kraev G., Schulze E-D., Yurova A., Kholodov A., Chuvilin E., Rivkina E.* Cryogenic Displacement and Accumulation of Biogenic Methane in Frozen Soils // Atmosphere. 2017. 8 (6). https://doi.org/10.3390/atmos8060105
33. *Leibman M.O., Hubberten H.-W., Lein A.Yu., Streletskaya I.D., Vanshtein B.G.* Tabular ground ice origin in the Arctic coastal zone: cryolithological and isotope-geochemical reconstruction of conditions for its formation // Proc. of the 8th Int. Conf. on Permafrost (Zurich, Switzerland). Lisse, Netherlands: A.A. Balkema Publishers, 2003. V. 1. P. 645–650.

GAS-SATURATED FROZEN SOILS IN THE PERMAFROST ZONE

A. N. Khimenkov[a,#], A. V. Koshurnikov[b,##], D. O. Sergeev[a], and P. A. Sobolev[b]

[a] *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

[b] *Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia*

[#] *E-mail: a_khimenkov@mail.ru*

[##] *E-mail: msu-geophysics@mail.ru*

The article focuses on the processes of formation and destruction of zones with increased gas content in frozen soils. Currently, the theoretical basis for this topic has not been developed enough, although its theoretical and practical importance has sharply increased during the last decade. Significantly grown importance is explained by gas emission during drilling of many wells in frozen soils, a huge volume of greenhouse gases emitted in the Arctic region and the discoveries of previously unknown processes in permafrost zone, such as the formation of gas-blow-out craters. This article is the first to show that gas-saturated zones in seasonally frozen or permafrost formations have all signs of geosystems: they have localization space, boundaries, morphology, individual structure and properties, formation history, and hierarchy. The main structural elements of geosystems in gas-saturated frozen soils are also considered in this article. Five types of such geosystems were identified: the first type for seasonally thawed or frozen layer, the second one is structural, the third is related to geological structures, the fourth type is related to decomposition of gas hydrates in natural conditions, and the fifth is the technogenic type (due to thermal or mechanical impact on hydrate-saturated and gas-saturated permafrost).

Keywords: *frozen soil*, *gas funnels*, *gas filtration*, *fluids*, *geosystems of gas-saturated soils*, *gas hydrates dissociation*, *pressured gas filtration*, *stages of development*

REFERENCES

1. Agalakov, S.E. *Gazovye gidraty v turonskikh otlozheniyakh na severe Zapadnoi Sibiri* [Gas hydrates in the Turonian sediments in the north of Western Siberia]. *Geologiya nefti i gaza*, 1997, no. 3, pp. 16–21. (in Russian)
2. Andreev, V.M., Tugolesov, D.D., Khrenov, S.N. *Gryazevye vulkany i neftegazoproyavleniya rossiiskogo sektora Chernogo morya* [Mud volcanoes and oil and gas manifestations in the Russian sector of the Black Sea]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana,* 2006, no. 2, pp. 50–59. (in Russian)
3. Anikeev, K.A. *Prognoz sverkhvysokikh plastovykh davlenii i sovershenstvovanie glubokogo bureniya na neft' i gaz* [Prediction of super-high reservoir pressures and improvement of deep drilling for oil and gas]. Moscow, Nedra, 1971, 168 p. (in Russian)
4. Are, F.E. *Problema emissii glubinnykh gazov v atmosferu* [The problem of deep gas emission to the atmosphere]. *Kriosfera Zemli*, 1998, vol. II, no. 4, pp. 42–50. (in Russian)
5. Badu, Yu.B. *Kriogennaya tolshcha gazonosnykh struktur Yamala. O vliyanii gazovykh zalezhei na formirovanie i razvitie kriogennoi tolshchi* [Cryogenic strata of gas-bearing structures in Yamal. The influence of gas deposits on the formation and development of cryogenic strata]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2018, 232 p. (in Russian)
6. Bembel, R.M., Bembel, S.R., Kashin, A.E., Laskovets, E.B. *Svyaz' ochagov aktivnogo neftegazonakopleniya i glubinnykh kriogennykh istochnikov* [Relationship of active oil and gas accumulation foci and deep

cryogenic sources]. *Itogi fundamental'nykh issledovanii kriosfery Zemli v Arktike i Subarktike*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1997, pp. 193–199. (in Russian)

7. Bespalova, S.N. *Otsenka perspektiv neftegazonosnosti neokomskikh otlozhenii severa Zapadnoi Sibiri po geokhimicheskim pokazatelyam* [Assessment of the prospects for the oil and gas potential of the Neocomian deposits in the north of Western Siberia by geochemical indicators]. *Geologiya nefti i gaza*, 1984, no. 12, pp. 22–26. (in Russian)
8. Bondarev, V.L., Mirotvorskii, M.Yu., Oblekov, G.I. et al. *Geokhimicheskie metody pri obnaruzhenii i lokalizatsii zalezhei uglevodorodnykh gazov (UVG) v nadproduktivnykh otlozheniyakh gazokondensatnykh mestorozhdenii poluostrova Yamal* [Geochemical methods for the detection and localization of hydrocarbon gas (HCG) deposits in the overproductive deposits of gas condensate fields in the Yamal Peninsula]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii*. 2005, no. 11, pp. 17–22. (in Russian)
9. Valyaev, B.M. *Pripoverkhnostnyi interval neftegazonakopleniya: spetsifika i masshtaby utilizatsii uglevodorodnykh flyuidov* [Near-surface interval of oil and gas accumulation: specificity and scale of utilization of hydrocarbon fluids]. *Geologiya morei i okeanov: Materialy XVII Mezhdunar. nauch. konf. (shkoly) po morskoi geologii* [Geology of seas and oceans. Proc. XVII Internat. Sci. Conference (School) on marine geology]. Moscow, GEOS, 2007, vol. 1, pp. 92–95. (in Russian)
10. Vasil'ev, A.A., Streletskaya, I.D., Mel'nikov, V.P., Oblogov, G.E. *Metan v podzemnykh l'dakh i merzlykh chetvertichnykh otlozheniyakh Zapadnogo Yamala* [Methane in underground ice and frozen Quaternary sediments of Western Yamal]. DAN, 2015, vol. 465, no. 5, pp. 604–607. (in Russian)
11. *Gornaya entsiklopediya* [Encyclopedia of mining]. Moscow, Sovetskaya entsklopediya Publ., vol. 2, 1986, 575 p. (in Russian)
12. Durmish'yan, A.G. *Znachenie anomal'no vysokikh plastovykh davlenii pri poiske gazovykh i gazokondensatnykh zalezhei* [The value of abnormally high reservoir pressures in the search for gas and gas condensate deposits]. *Gazovaya promyshlennost'*, 1961, no. 7, pp. 1–3. (in Russian)
13. Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Kotov, P.I., Sobin, R.V. *Dinamika vydeleniya gaza iz merzlykh gruntov pri izmenenii temperatury i davleniya* [Dynamics of gas release from frozen soils under temperature and pressure changes]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2020, no. 4, pp. 15–20. (in Russian)
14. Kraev, G.N. *Zakonomernosti rasprostraneniya metana v mnogoletnemyorzlykh porodakh na Severo-Vostoke Rossii i prognoz ego postupleniya v atmosferu* [Regularities of methane distribution in permafrost rocks in the North-East of Russia and forecast of its entry into the atmosphere]. Extended abstract of Cand. Sci. (Geography) Dissertation. Moscow, TsEPL RAN, 2010, 20 p. (in Russian)
15. Kraev, G.N., Schulze, E.D., Rivkina, E.M. *Kriogenez kak faktor raspredeleniya metana v gorizontakh merzlykh porod* [Cryogenesis as a factor of methane distribution in the horizons of frozen rocks]. *Doklady Akademii Nauk*, 2013, vol. 451, no. 6, pp. 684–687. (in Russian)
16. Kraev, G.N., Rivkina, E.M. *Nakoplenie metana v promerzayushchikh i merzlykh pochvakh kriolitozony* [Accumulation of methane in freezing and frozen soils of the permafrost zone]. *Arctic Environmental Research,* 2017, vol. 17, no. 3, pp. 173–184. (in Russian)
17. Kurasov, I.A., Stupakova, A.V. *Tektonicheskoe stroenie severnoi chasti Zapadno-Sibirskogo neftegazonosnogo basseina* [Tectonic structure of the northern part of the West Siberian oil and gas basin]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Geologiya*, 2014, no. 4, pp. 56–64. (in Russian).
18. Kurchikov, A.R. *Gidrogeotermicheskii rezhim uglevodorodnykh skoplenii Zapadnoi Sibiri* [Hydrogeothermal regime of hydrocarbon accumulations in Western Siberia]. *Geologiya i geofizika*, 2001, vol. 42, no. 11–12, pp. 1846–1853. (in Russian)
19. Mel'nikov, P.I., Mel'nikov, V.P., Tsarev, V.P., Degtyarev, B.V., Mizulina, N.B., Popov, A.P., Bereznyakov, A.I., Svechnikov, A.M. *O generatsii uglevodorodov v tolshchakh mnogoletnemerzlykh porod* [On the generation of hydrocarbons in strata of permafrost rocks]. *Izvestiya AN SSSR, Seriya geologicheskaya*, 1989, no. 2, pp. 118–128. (in Russian)
20. Mironyuk, S.G, Otto, V.P *Gazonasyshennye morskie grunty i estestvennye gazovydeleniya uglevodorodov: zakonomernosti rasprostraneniya i opasnost' dlya inzhenernykh sooruzhenii* [Gas-saturated marine soils and natural gas release of hydrocarbons: distribution patterns and danger for engineering structures]. *Georisk*, 2014, no. 2, pp. 8–18. (in Russian)
21. Obzhirov, A.I., Telegin, Yu.A., Okulov A.K. *Gazogeokhimicheskie polya i raspredelenie prirodnykh gazov v dal'nevostochnykh moryakh* [Gas geochemical fields and distribution of natural gases in the Far Eastern seas]. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika*, 2018, no. 1 (25), pp. 66–74. (in Russian)
22. Popov, A.I. *Kriolitologiya* [Cryolithology]. Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 1985, 239 p. (in Russian).
23. Sergienko, V.I., Lobkovskii, L.I., Semiletov, I.P. et al. *Degradatsiya podvodnoi merzloty i razrushenie gidratov shel'fa morei vostochnoi Arktiki kak vozmozhnaya prichina "metanovoi katastrofy": nekotorye rezul'taty kompleksnykh issledovanii 2011 goda* [Degradation of submarine permafrost and destruction of hydrates on the shelf of the East Arctic seas as a potential cause of the methane catastrophe: some results of complex studies in 2011]. *Doklady Akademii Nauk*, 2012, vol. 446, no. 1, pp. 1132–1137. (in Russian)
24. Streletskaya, I.D., Vanshtein, B.G., Vasil'ev, A.A., Oblogov, G.E. *Soderzhanie i genezis metana v merzlykh otlozheniyakh i podzemnykh l'dakh na poberezh'e i shel'fe Karskogo morya* [Content and genesis of methane in frozen sediments and underground ice on the coast and shelf of the Kara sea]. *Aktual'nye problemy nefti i gaza*, 2018, no. 4 (23), pp. 67–72 (in Russian)
25. Khimenkov, A.N. *Geosistemnyi podkhod v geokriologii* [Geosystem approach in geocryology]. *Kriosfera Zemli*, 2013, vol. 17, no. 2, pp. 74–82. (in Russian)
26. Khimenkov, A.N., Stanilovskaya, Yu.V. *Fenomenologicheskaya model' formirovaniya gazovogo vybrosa na primere Yamal'skogo kratera* [Phenomenological model of the formation of gas outburst craters by the example of the Yamal crater]. *Arktika i Antarktika*, 2018, no. 3,

pp. 1–25.
https://doi.org/10.7256/2453-8922.2018.3.27524 (in Russian).

27. Khimenkov, A.N., Vlasov, A.N., Volkov-Bogorodskii, D.B., Sergeev, D.O., Stanilovskaya, Yu.V. *Flyuidodinamicheskie geosistemy v kriolitozone. Ch. 2. Kriolitodinamicheskie i kriogazodinamicheskie geosistemy* [Fluidynamic geosystems in cryolithozone. Part2. Cryolithodynamic and cryogasodynamic geosystems]. *Arktika i Antarktika*, 2018, no. 2, pp. 48–70. https://doi.org/10.7256/2453-8922.2018.2.26377 (in Russian)

28. Khimenkov, A.N., Koshurnikov, A.V., Sobolev, P.A. *Laboratornoe modelirovanie fil'tratsii gaza v mnogoletnemerzlykh porodakh* [Laboratory modeling of gas filtration in permafrost rocks]. *Arktika i Antarktika*, 2019, no. 4, pp. 52–73. (in Russian)

29. Shakhova, N.Ye. *Metan v moryakh Vostochnoi Arktiki* [Methane in the Eastern Arctic seas]. Extended abstract of Cand. Sci. (Geol.-Min.) Dissertation.. Moscow, IO RAN, 2010, 44 p. (in Russian)

30. Shumskii, P.A. *Osnovy strukturnogo ledovedeniya* [Fundamentals of structural ice science]. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1955, 492 p. (in Russian)

31. Yakushev, V.S. *Prirodnyi gaz i gazovye gidraty v kriolitozone* [Natural gas and gas hydrates in the cryolithozone]. Moscow, VNIIGAZ, 2009, 192 p. (in Russian)

32. *Kraev, G., Schulze, E., Yurova, A., Kholodov, A., Chuvilin, E., Rivkina, E.* Cryogenic displacement and accumulation of biogenic methane in frozen soils. *Atmosphere,* 2017, no 8(6).

33. *Leibman, M.O., Hubberten, H.W., Lein, A.Yu., Streletskaya, I.D., Vanshtein, B.G.*Tabular ground ice origin in the Arctic coastal zone: cryolithological and isotope-geochemical reconstruction of conditions for its formation. In: Proc. of the 8th Int. Conf. on Permafrost (Zurich, Switzerland). Lisse, Netherlands, A.A. Balkema Publishers, 2003, vol. 1, pp. 645–650.

ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2021, № 2, с. 17–26

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 504.(054+058)/662.99

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

© 2021 г. С. В. Черкасов[1,*], А. М. Фархутдинов[2], И. М. Фархутдинов[1]

[1] *ФГБУН Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН, ул. Моховая, д. 11, стр. 11, Москва, 125009 Россия*

[2] *ФГБОУ Башкирский государственный университет, ул. Заки Валиди, д. 32, Уфа, 450076, Россия*

**E-mail: s.cherkasov@sgm.ru*

Поступила в редакцию 07.12.2020 г.
После доработки 11.01.2021 г.
Принята к публикации 20.01.2021 г.

Геоэкологические аспекты геотермальной энергетики связаны с существующими технологиями использования тепла Земли, как прямого (использование теплоэнергетических вод для получения тепловой энергии – гидротермальные системы), так и с производством электроэнергии (искусственные/усовершенствованные геотермальные системы – Enhanced geothermal system (EGS) и геотермальные системы на природных пароводяных смесях, петро- и гидротермальные системы, соответственно). С позиций геоэкологии рассматриваются преимущества использования геотермальных ресурсов по сравнению с другими источниками энергии, а также геоэкологические риски, связанные с эксплуатацией геотермальных природно-техногенных систем. На качественном уровне анализируется вероятность негативного воздействия объектов геотермальной энергетики на окружающую среду в результате возможного химического загрязнения при утечках на поверхности минерализованных подземных вод, техногенного нарушения гидродинамического равновесия резервуара теплоэнергетических вод и его истощения, а также – понижения температуры подземных вод в результате обратной закачки охлажденного теплоносителя. Минимизация перечисленных рисков осуществляется посредством полной обратной закачки и мониторинга утечек теплоносителя, мониторинга микросейсмической активности в районе эксплуатации петротермальных ресурсов, прогнозированием негативных процессов методами математического моделирования и оптимизацией циркуляционных систем теплоотбора. Рассматривается опыт минимизации геоэкологических рисков на предпроектной стадии создания Ханкальской опытно-промышленной геотермальной станции. На основе качественного анализа геоэкологических рисков геотермальной энергетики и существующих технологий теплоотбора делается вывод о преимуществе гидротермальных природно-техногенных систем перед петротермальными при современном уровне развития технологий бурения и теплоотбора. Устанавливается, что месторождения теплоэнергетических вод при полной обратной закачке отработанного флюида являются наиболее экологически чистым возобновляемым источником энергии, не зависящим от погодных условий. Отмечается, что технологии, разрабатываемые для гидротермальных природно-техногенных систем, создают основу как для повышения эффективности гидротермальной, так и для развития петротермальной энергетики.

Ключевые слова: *геоэкологические риски*, *геотермальные подземные воды*, *геотермальные ресурсы*, *гидротермальные ресурсы*, *возобновляемая энергетика*

DOI: 10.31857/S0869780921020028

ВВЕДЕНИЕ

Геотермальная энергетика представляет собой одну из наиболее экологически чистых отраслей энергетики, а среди возобновляемых источников энергии геотермальные ресурсы выделяются отсутствием зависимости от погодных факторов. Технологии извлечения глубинного тепла Земли на поверхность основаны на транспорте по скважинам разогретого теплоносителя, в качестве которого могут выступать как природные подземные термальные воды или пароводяные смеси (гидротермальные ресурсы), так и флюид, закачиваемый в область развития горячих сухих пород для использования петротермальных ресурсов. Любая реализация этих технологий представляет собой сложную природно-техногенную систему, в которую входит природный или искусственный резервуар и, в общем случае, – система водозаборных и нагнетательных скважин, насосное и теплообменное оборудование. Многие исследователи относят к геотермальной энергетике технологии тепловых насосов, но эти технологии относятся, скорее, к энергосберегающим, поскольку не производят энергию как таковую, но повышают эффективность отопительных систем. Данная работа ограничивается рассмотрением

Таблица 1. Характеристика геотермальных ресурсов по использованию в энергетике

Использование	Вид ресурсов	Теплоноситель	Температура теплоносителя, °С
Прямое	Гидротермальные	Вода	50–95
Бинарные технологии		Пароводяная смесь	95–150
Производство электроэнергии	Гидро- и петротермальные	Пар	Более 150

геоэкологических аспектов петро- и гидротермальных природно-техногенных систем. При этом решаются задачи сравнения с позиций геоэкологии как геотермальной энергетики с другими отраслями энергетики, так и петротермальных систем с гидротермальными.

Вопросы взаимодействия геотермальных природно-техногенных систем с окружающей средой широко обсуждаются в литературе, однако авторы редко пытаются оценить геоэкологические аспекты геотермальной энергетики в целом [13, 14], и публикации касаются, как правило, частных вопросов, например, вопросов наведенной сейсмичности для петротермальных систем [11]. Приведенный ниже сравнительный анализ геоэкологических рисков обеспечивает определение приоритетных направлений развития геотермальной энергетики.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ СИСТЕМ

Энергетические геотермальные ресурсы по способу их использования делятся на три основных класса: ресурсы для прямого использования теплоэнергетических вод с целью получения тепловой энергии, пригодной для целей отопления; ресурсы, позволяющие использовать бинарные технологии (система Калины и органический цикл Ренкина) производства электроэнергии; ресурсы, обеспечивающие производство электроэнергии с использованием паровой турбины и электрогенератора (табл. 1).

Собственно геотермальные природно-техногенные системы решают задачу транспортировки флюида из природного или искусственного резервуара на поверхность, а также, для петротермальных систем и гидротермальных с обратной закачкой – задачу закачки флюида в резервуар. Таким образом, в настоящее время в практике геотермальной энергетики используются три типа природно-техногенных систем:

1) гидротермальные без обратной закачки;

2) гидротермальные с обратной закачкой;

3) петротермальные.

Согласно российской классификации, гидротермальные ресурсы представлены месторождениями теплоэнергетических вод – частный случай месторождений подземных вод, определяемых как пространственно ограниченная часть водоносной системы, в пределах которой под влиянием комплекса геолого-экономических факторов создаются благоприятные условия для отбора подземных вод в количестве, достаточном для их целевого использования.

На сегодняшний день в Российской Федерации разведано 66 гидротермальных месторождений, запасы термальных вод и пара которых оцениваются в 307 тыс. м^3/сут и 40.7 тыс. м^3/сут соответственно, но только 50% из этих запасов используется для производства 1.5 млн гигакалорий тепла, что эквивалентно сжиганию около 300 тыс. т условного топлива [2].

Последние исследования позволили в глобальном масштабе провести анализ перспективности территорий на прямое использование гидротермальных ресурсов [19]. При анализе рассматривались: мощность осадочного чехла, как индикатор вероятности существования резервуара подземных вод; температурный градиент, определяющий глубину локализации гидротермальных ресурсов, и потенциальный спрос на обогрев или охлаждение жилых и производственных (в частности – тепличных) помещений. В результате исследований построены карты технической возможности прямого использования гидротермальных ресурсов в различных целях. Также установлено, что в настоящий момент эти возможности используются менее чем на 0.1%.

Петротермальные ресурсы имеются в любой точке планеты, поскольку температура горных пород растет с глубиной, однако возможность их использования при существующих технологиях теплоотбора осложняется, во-первых, необходимостью глубокого бурения для достижения комплексов горных пород с температурой более 220–250°С, и во-вторых– сложностью прогноза характеристик искусственного резервуара на этих глубинах.

Реальных работ по использованию петротермальных ресурсов в Российской Федерации не ведется, а за рубежом такие работы наиболее развиты в Австралии [18], США [25] и Франции [21], носят экспериментальный и опытно-промышленный характер.

Таблица 2. Геоэкологические аспекты энергетики (по источникам энергии)

Источник энергии		Горючие материалы			Атом	Солнце	Вода		Ветер	Геотермы	
		Водород	Углеводороды	Другие			Поток	Прилив		Теплоэнергетические воды	Тепло горных пород
Преобразование	1) в утилизируемое тепло	Реакции окисления			Ядерные реакции	Нагревание теплоносителя	–		–	Прямое использование	Прокачка теплоносителя через искусственный резервуар
	2) в электроэнергию	Паровая турбина и электрогенератор				Фотоэлектрическое преобразование	Кинетическая энергия потока, турбина, электрогенератор		Кинетическая энергия ветра, электрогенератор	Паровая турбина или турбина бинарной системы и элетрогенератор	Паровая турбина и электрогенератор
Геоэкологические аспекты		Аспекты, связанные с производством водорода	Выделение CO_2 и других продуктов горения, воздействие добычи углеводородов и угля на окружающую среду		Воздействие на окружающую среду добычи и обогащения радиоактивного сырья, и утилизации отходов, риски	Производство и утилизация панелей	Изменение естественных потоков		Изменение ландшафта	–	Негативные последствия гидроразрыва

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Любое производство энергии воздействует на окружающую среду (табл. 2). При производстве энергии используются три основные схемы: получение тепловой энергии (реакции окисления, ядерные реакции, нагревание теплоносителя за счет солнечного или геотермального тепла); преобразование тепловой энергии в электрическую с применением турбинного и генераторного оборудования; прямое получение электрической энергии (гидроэлектростанции и ветрогенераторы – посредством преобразования кинетической энергии в электрическую, солнечные панели – посредством фотоэлектрического преобразования энергии фотонов).

При этом возникающие геоэкологические аспекты связаны со следующими процессами:

1) получение энергетического сырья и производство оборудования для получения энергии (добыча и переработка углеводородов и радиоактивного сырья, получение чистого водорода, производство солнечных панелей и т.д.);

2) получение и преобразования энергии (химические и ядерные реакции, изменение физико-химических характеристик природных объектов и процессов, в том числе – водных потоков, ландшафта, массивов горных пород);

3) образование отходов производства энергии (например, продукты сжигания горючих материалов, в том числе – золошлаковые отходы и углекислый газ, отработанное оборудование).

Как видно из табл. 2, только гидротермальная энергетика в целом характеризуется отсутствием явного негативного воздействия на окружающую среду. Тем не менее, и в гидротермальной, и, в

большей степени – в петротермальной энергетике существуют геоэкологические риски, которыми нельзя пренебрегать. Эти риски связаны:

– с возможным химическим загрязнением в результате разлива на поверхности подземных вод, часто – минерализованных;

– с техногенным изменением гидродинамического равновесия и, соответственно, поля напряжений как в резервуаре подземных вод, так и в массиве сухих горячих пород при прокачке через них теплоносителя;

– с истощением резервуара и понижением температуры подземных вод в результате обратной закачки охлажденного теплоносителя.

Минимизация перечисленных рисков осуществляется посредством мониторинга утечек теплоносителя, микросейсмической активности в районе эксплуатации петротермальных ресурсов, прогнозированием негативных процессов методами математического моделирования, и оптимизацией циркуляционных систем (ЦС) теплоотбора. На эффективность гидротермальных природно-техногенных систем, кроме этого, могут воздействовать вызванные минерализацией подземных вод процессы коррозии оборудования и осаждения минералов. Воздействие минерализованных вод на оборудование ЦС может регулироваться посредством ввода в ЦС ингибиторов.

Вопрос химического загрязнения территорий связан как с утилизацией отработанных теплоэнергетических вод, так и с их аварийными разливами. Практически полную гарантию отсутствия такого загрязнения дает реализация схемы теплоотбора с полной обратной закачкой отработанных вод. Такая схема представляет собой первичный контур геотермальной станции и предусматривает создание “дублетной” циркуляционной системы, в которую входят, в общем случае, сеть водозаборных и нагнетательных скважин, насосное оборудование, обеспечивающее стабильный дебит системы и обратную закачку, и теплообменник, передающий тепло во вторичный (потребительский) контур.

На практике проблема решается по-разному. В большинстве европейских стран обратная закачка является обязательной для геотермальных проектов. Так, во Франции, где около 500 тысяч жителей Парижского региона обеспечены геотермальным отоплением, все (более 25) тепловые станции построены по “дублетной” схеме (одна водозаборная и одна нагнетательная скважина). Однако таких требований нет в законодательствах, например, Исландии и Китая. В Исландии в течение долгого времени считалось, что при низкой минерализации термальных вод и покрывающей их расход подпитке, обратная закачка не требуется [10]. Работы по закачке начались в этой стране только в начале XXI в., и до сих пор значительная доля отработанных вод сливается в океан.

В Российской Федерации требования к обратной закачке отработанного флюида практически отсутствуют, причем нормативными документами допускается сброс отработанных вод на рельеф [4], а критерии необходимости обратной закачки не определены. Более того, в государственном стандарте РФ “Геотермальная энергетика” полностью отсутствует понятие обратной закачки [3].

Обратная закачка решает проблему химического загрязнения при работе геотермальных установок, но минерализация термальных вод влияет и на оборудование станций. Высокотемпературные минерализованные растворы вызывают коррозию скважинного, насосного, трубопроводного и теплообменного оборудования, а низкотемпературные – осаждение минералов на стенках оборудования [9]. На рис. 1 показаны результаты коррозии устьевого оборудования на одной из старых скважин Ханкальского месторождения теплоэнергетических вод.

Проблема минерализации решается вводом ингибиторов, замедляющих коррозию, на призабойную зону водозаборной скважины [22], и ингибиторов, препятствующих осаждению минералов – в циркуляционную систему после теплообменника [26].

При эксплуатации гидротермальных систем встречаются проблемы с эмиссией сероводорода, метана, и углекислого газа при дегазации теплоносителя на поверхности [17], однако они полностью решаются при обеспечении герметичности наземного оборудования первичного контура ЦС.

В мировой практике исследовались риски, связанные с присутствием радиоактивных газов в природных термальных водах [23, 24] и в теплоносителе петротермальных систем [12], но на настоящий момент примеры сколько-нибудь опасного содержания радиоактивных элементов неизвестны.

Петротермальная энергетика, с точки зрения геоэкологии, характеризуется рисками, связанными с наведенной сейсмичностью при стимуляции искусственного резервуара в результате гидродинамического и температурного воздействия на поле напряжений в массиве пород [20].

Так, петротермальный проект в Базеле, Швейцария, был закрыт после того, как при стимуляции резервуара на глубине около 5 км в период с декабря 2006 г. по март 2007 г. было зарегистрировано около 200 сейсмических колебаний с амплитудой от 0.7 до 3.4 балла, все – с эпицентрами в радиусе 1 км от забоя нагнетательной скважины [11].

Работы по минимизации наведенной сейсмичности проводятся во всем мире, наиболее представительные результаты в этом направлении получены в рамках проекта по искусствен-

Рис. 1. Влияние минерализации теплоэнергетических вод на оборудование геотермальной станции. Скважина № 27–32 Ханкальского месторождения, Чеченская Республика.

ным геотермальным системам в Сольце (Soultz-sous-Forêts), Франция, где с 1988 по 2007 г. 15 раз проводилась стимуляция трех искусственных резервуаров [21]. Также появляются успехи в изучении механизма наведенной сейсмичности с использованием математического моделирования [20].

В табл. 3 сведены геоэкологические риски геотермальной энергетики и способы их минимизации. Из таблицы видно, что самой низкой вероятностью реализации геоэкологических рисков характеризуются гидротермальные природно-техногенные системы с обратной закачкой теплоносителя. При этом риски возможного влияния химического состава природных подземных вод на оборудование и окружающую среду относительно легко поддаются минимизации: в настоящее время разработаны и успешно используются технологии борьбы с коррозией оборудования и осаждением минералов. Математическое моделирование температурного режима резервуара позволяет при проектировании системы определить оптимальное расстояние между забоями скважин и режим работы циркуляционной систе-

Таблица 3. Вероятность реализации геоэкологических рисков использования геотермальных ресурсов и способы ее минимизации

Ресурсы / Риски	Гидротермальные		Петротермальные	Способы минимизации рисков
	без обратной закачки	с обратной закачкой		
Химическое загрязнение на поверхности	средняя	низкая	низкая	Теплоотбор с полной обратной закачкой теплоносителя, мониторинг исправности оборудования
Коррозия оборудования и осаждение минералов	средняя	средняя	низкая	Ввод ингибиторов, замедляющих коррозию и осаждение минералов
Выбросы CO_2, метана и других газов	средняя	низкая	низкая	Герметичность первичного контура при полной обратной закачке теплоносителя
Истощение резервуара или понижение температуры теплоносителя	средняя	низкая	низкая	Математическое моделирование изменения свойств резервуара и оптимизация режима работы циркуляционной системы
Наведенная сейсмичность	низкая	низкая	высокая	Мониторинг наведенной сейсмической активности и оптимизация режима работы циркуляционной системы

мы, обеспечивающие необходимый срок службы станции [16]. Остальные значимые риски гидротермальных систем связаны только с возможными неисправностями оборудования и практически полностью элиминируются при корректном проектировании систем контроля и управления геотермальной станции. Для минимизации геоэкологических рисков в масштабе месторождения теплоэнергетических вод, для разработки которого может использоваться несколько гидротермальных природно-техногенных систем, необходима организация мониторинга эксплуатации месторождения, например – с использованием инфракрасной аэросъемки [15].

МИНИМИЗАЦИЯ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ НА ПРИМЕРЕ ХАНКАЛЬСКОЙ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЙ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ТЕПЛОВОЙ СТАНЦИИ

Задачи минимизации геоэкологических рисков решались, в основном, на предпроектной стадии создания опытно-промышленной станции и включали в себя:

– выбор типа гидротермальной природно-техногенной системы (изначально определен как дублетный с полной обратной закачкой),

– выбор продуктивного пласта,

– локализацию дублетной системы на месторождении,

– определение значимых геоэкологических рисков и способов их минимизации с учетом геологических, гидрогеологических, гидродинамических и теплофизических параметров Ханкальского месторождения теплоэнергетических вод.

Ханкальское месторождение теплоэнергетических вод представляет собой часть Восточно-Предкавказского артезианского бассейна, который является гидрогеологической структурой II порядка площадью 250 тыс. км^2. В пределах бассейна на территории Ханкальского месторождения выделяется 23 песчаных пласта, из которых 10 приурочены к отложениям чокракского возраста, 13 – караганского (средний миоцен) [7].

Выбор типа гидротермальной природно-техногенной системы определен, исходя из необходимости минимизации геоэкологических рисков. На основе анализа французского опыта использования термальных подземных вод [5] (близкий по параметрам с Восточно-Предкавказским Парижский артезианский бассейн разрабатывается уже более 50 лет) выбран дублетный тип циркуляционной системы с полной обратной закачкой флюида в резервуар.

Для выбора продуктивного ресурса дублетной ЦС на Ханкальском месторождении рассматривались несколько вариантов. Наиболее благоприятными для реализации циркуляционной схемы теплоотбора являются имеющие максимальный дебит при самоизливе и наилучшие фильтрационные параметры продуктивные пласты IV–VII, XIII, XVI и XXII. Поскольку добыча воды из XXII пласта запрещена Госгортехнадзором для защиты Серноводских источников от истощения, при выборе продуктивного пласта рассматривались только пласты IV–VII, XIII и XVI.

XIII пласт караганского горизонта – один из самых продуктивных на территории Ханкальского месторождения термальных подземных вод с довольно выдержанной по площади мощностью (в среднем 47 м) и низкой минерализацией (0.7–1.8 г/л). Наряду с гидрогеологическими характеристиками выбор XIII пласта обусловлен наличием сравнительно большого количества данных, позволивших включить его в 3D-геологическую модель Ханкальского месторождения, а также положительным опытом обратной закачки вод в пласт в 1980-е годы [1].

XIII пласт в пределах Ханкальского месторождения теплоэнергетических вод расположен на глубине 750–900 м благодаря антиклинальной складке, погружающейся в юго-восточном направлении и двум взбросам, формирующим дислокацию типа горст, севернее и южнее которых продуктивные пласты погружаются на большие глубины (до 2500–3000 м). Определение положения водозаборной и нагнетательной скважин на основе построенной трехмерной геологической модели месторождения производится таким образом, чтобы, с одной стороны, глубина скважин была минимальной, т.е. скважины расположены в ядре складки, а с другой – чтобы забои скважин располагались на максимально возможном удалении от взбросов (на рис. 2 – Разлом 1 и Разлом 2).

На предпроектной стадии также было установлено, что благодаря низкой минерализации теплоэнергетических вод XIII пласта принятие дополнительных мер борьбы с рисками коррозии оборудования и осаждения минералов не требуется.

Для предотвращения температурной деградации резервуара и на предпроектной стадии работ, и в процессе эксплуатации Ханкальской опытно-промышленной геотермальной станции осуществлялся прогноз изменений температурного режима на забое водозаборной скважины. Методами математического моделирования также оценивалось влияние на изменение температуры таких параметров как: дистанция между забоями продуктивной и нагнетательной скважин, общий региональный поток подземных вод, возможная непроницаемость разломов [16, 6].

Кроме этого, выполнено моделирование использования эффекта остаточного дебита [8], когда при отключенном насосном оборудовании циркуляция воды продолжается. Результат моделирования показывает (рис. 3), что если при

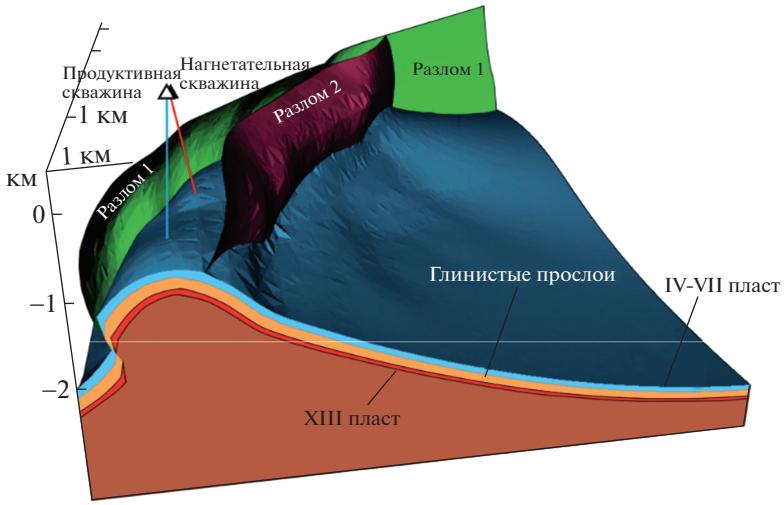


Рис. 2. Выбор положения водозаборной (продуктивной) и нагнетательной скважин с использованием построенной 3-мерной геологической модели Ханкальского месторождения теплоэнергетических вод.

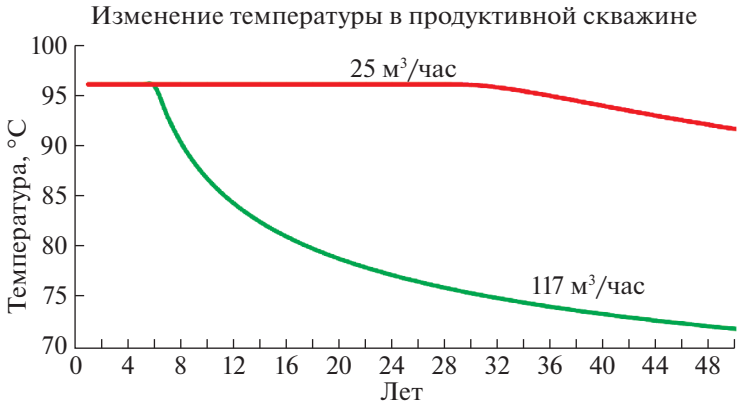


Рис. 3. Изменение температуры на забое продуктивной скважины для принудительной (нижняя линия) и самопроизвольной (верхняя линия) циркуляции.

принудительном дебите ГЦС через 15 лет эксплуатации температура флюида в зоне забоя продуктивной скважины понижается на 15°С, то при использовании эффекта остаточного дебита, когда самопроизвольная циркуляция составляет 25 м^3/час, незначительное снижение температуры начинает наблюдаться только через 30 лет эксплуатации.

Тепловая мощность станции составляет до 10 МВт и до 1.3 МВт для принудительной и самопроизвольной циркуляции соответственно. При этом для принудительной циркуляции необходима работа нагнетательного насоса мощностью 250 Вт, что эквивалентно примерно 3 МВт тепловой мощности, если производить электроэнергию с использованием бинарной установки на флюиде Ханкальской станции. Также необходимо учитывать, что при принудительной циркуляции за 15 лет тепловая мощность Ханкальской станции понизится на 16–18%.

Таким образом, эффективная тепловая мощность (за вычетом мощности, расходуемой на принудительную циркуляцию) изменяется от 7 до 1.3 МВт в зависимости от режима работы ГЦС, и управление режимом может осуществляться в соответствии с потребностью в тепловой энергии.

Таким образом, основные геоэкологические риски минимизируются на предпроектной стадии создания объекта геотермальной энергетики, и в дальнейшем сводятся к вопросам исправности оборудования геотермальной станции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геотермальные ресурсы представляют собой наиболее экологически чистый неиссякаемый

источник энергии, не зависящий от климатических факторов. Тем не менее, для разных типов геотермальных природно-техногенных систем характерны различные геоэкологические риски, которые необходимо учитывать при создании и эксплуатации геотермальных станций.

Основными геоэкологическими рисками в геотермальной энергетике являются: для гидротермальных систем – риски, связанные с минерализацией теплоэнергетических вод, а для петротермальных – риски наведенной сейсмичности при стимуляции и эксплуатации искусственного резервуара.

Риски гидротермальных систем минимизируются и практически полностью исключаются при исправном оборудовании станций за счет обратной закачки (исключаются разливы теплоносителя на поверхности) и ввода ингибиторов, нейтрализующих компоненты теплоносителя, негативно влияющих на оборудование геотермальных станций.

Для петротермальных систем минимизация рисков наведенной сейсмичности осуществляется при помощи математического моделирования и последующего подбора наиболее безопасного режима эксплуатации, полное исключение этих рисков невозможно.

Анализ геоэкологических аспектов геотермальной энергетики демонстрирует (при современном уровне развития технологий теплоотбора) преимущества гидротермальных природно-техногенных систем с обратной закачкой флюида как перед гидротермальными системами без обратной закачки, так и перед петротермальными системами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аветисьянц А.А., Крылов В.Б.* Опыт строительства циркуляционной системы на Ханкальском геотермальном меторождении // Физические процессы при разработке геотермальных месторождений. Л.: ЛГИ, 1983. С. 85–88.
2. *Алхасов А.Б.* Возобновляемая энергетика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 256 с.
3. ГОСТ Р 56909-2016. Нетрадиционные технологии. Геотермальная энергетика. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 12 с.
4. Правила разработки месторождений теплоэнергетических вод ПБ 07-599-03. М.: Государственное унитарное предприятие “Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России”, 2003. 8 с.
5. *Фархутдинов А.М., Исмагилов Р.А., Фархутдинов И.М., Черкасов С.В., Минцаев М.Ш.* Перспективы использования теплоэнергетических вод Чеченской республики на базе опыта аналогичных работ во Франции (Парижский бассейн) // Вестник Томского государственного университета. 2015. № 398. С. 257–264.
6. *Фархутдинов А.М., Фархутдинов И.М., Черкасов С.В., Исмагилов Р.А., Хайрулина Л.А.* Применение компьютерного моделирования для устойчивой эксплуатации термальных подземных вод Ханкальского месторождения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 12. С. 7–17.
7. *Фархутдинов А.М., Черкасов С.В., Минцаев М.Ш., Шаипов А.А.* Термальные подземные воды Чеченской Республики: новый этап использования // Природа. 2017. № 3 (1219). С. 28–35.
8. *Черкасов С.В., Фархутдинов А.М., Шаипов А.А.* Об эффекте остаточного дебита геотермальной циркуляционной системы теплоотбора // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки, 2020. Т. 491. С. 90–92.
9. *Черкасов С.В., Чурикова Т.Г., Бекмурзаева Л.Р., Гордейчик Б.Н., Фархутдинов А.М.* Состояние и перспективы использования геотермальных ресурсов в Российской Федерации / GEOENERGY. Матер. Междунар. научно-практ. конференции. Грозный: Изд-во ГГНТУ, 2015. С. 303–322.
10. *Axelsson G.* Role and management of geothermal reinjection. Short Course on Geothermal Development and Geothermal Wells. Santa Tecla, Salvador: UNU-GTP. 2012. 21 p.
11. *Baisch S., Carbon D., Dannwolf U., Delacou B., Devaux M., et al.* Deep Heat Mining Basel – Seismic Risk Analysis. Basel: SERIANEX, 2009. 21 p.
12. *Battye D.L., Ashman P.J.* Radiation associated with Hot Rock geothermal power. Australian Geothermal Energy Conference, 2009. https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/AGEC/2009/Battye__Ashman_2009.pdf
13. *Bošnjaković M., Stojkov M., Jurjević M.* Environmental Impact of Geothermal Power Plants // Technical Gazette. 2019. V. 26 (5). P. 1515–1522. https://doi.org/10.17559/TV-20180829122640
14. *Brown K., Webster-Brown J.* Environmental impacts and mitigation. In Geothermal energy: utilization and technology. Dickson M.H., Fanelli M. (ed.) Routledge. 2013. P. 155–171. https://doi.org/10.4324/9781315065786
15. *Cherkasov S.V., Farkhutdinov A.M., Rykovanov D.P., Shaipov A.A.* The use of unmanned aerial vehicle for geothermal exploitation monitoring: Khankala field example // J. of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. 2018. T. 6. № 2. P. 351–362.
16. *Farkhutdinov A., Goblet P., de Fouquet C., Cherkasov S.* A case study of the modeling of a hydrothermal reservoir: Khankala deposit of geothermal waters // Geothermics. 2016. V. 59. Part A. P. 56–66. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.10.005
17. *Gunnarsson I., Aradóttir E.S., Sigfússon B., Gunnlaugsson E., Júlíusson B.M.* Geothermal Gas Emission From Hellisheiði and Nesjavellir Power Plants, Iceland // GRC Transactions. 2013. V. 37. P. 785–789.
18. *Holl H.-G.* What did we learn about EGS in the Cooper Basin? Milton, Australia: Geodynamics Limited, 2015. 79 p. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33547.49443

19. *Limberger J., Boxemb T., Pluymaekers M., Bruhn D., Manzella A., et al.* Geothermal energy in deep aquifers: a global assessment of the resource base for direct heat utilization // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. № 82. P. 961–975.
20. *Parisio F., Vilarrasa V., Wang W., Kolditz O., Nagel Th.* The risks of long-term re-injection in supercritical geothermal systems // Nature Communications. 2019. V. 10. P. 4391. https://doi.org/10.1038/s41467-019-12146-0
21. *Schill E., Genter A., Cuenot N., Kohl T.* Hydraulic performance history at the Soultz EGS reservoirs from stimulation and long-term circulation tests // Geothermics. 2017. V. 7. P. 110–124.
22. *Tomarov G., Kolesnikov D., Semenov V., Podverbny V., Shipkov A.* Prevention of Corrosion and Scaling in Geothermal Power Plants Equipment // Proc. World Geothermal Congress 19–25 April 2015. Melbourne, Australia, 2015, 6 p. https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/27032.pdf
23. *Vengosh A., Hirschfeld D., Vinson D., Dwyer G., Raanan H., et al.* High Naturally Occurring Radioactivity in Fossil Groundwater from the Middle East. Environ // Sci. Technol. 2009. V. 43. № 6. P. 1769–1775.
24. *Walczak K., Olszewski J., Zmyślony M.* Estimate of radon exposure in geothermal SPAs in Poland // J. of Environmental and Occupational Health. 2016. V. 29 (1). P. 161–166.
25. *Zemach E., Drakos P., Spielman P., Akerley J.* Desert Peak East enhanced geothermal systems (EGS) project. Draft Final Report. Reno, NV, USA: Ormat Technologies, Inc. 2017. 87 p.
26. *Zotzmann J., Regenspurg S.* Evaluating the Efficiency of Scaling Inhibitors in Geothermal Fluids at High Pressures and High Temperatures // Proc. World Geothermal Congress 19–25 April 2015. Melbourne, Australia, 2015, 5 p. https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/item_1267890

GEOECOLOGICAL ASPECTS OF GEOTHERMAL POWER ENGINEERING

S. V. Cherkasov[a,#], A. M. Farkhutdinov[b], and I. M. Farkhutdinov[a]

[a] *Vernadsky State Geological Museum RAS, ul. Mokhovaya, 11, bld. 11, Moscow, 125009 Russia*
[b] *Bashkir State University, ul. Zaki Validi, 32, Ufa, 450076 Russia*
[#] *E-mail: s.cherkasov@sgm.ru*

Geoecological aspects of geothermal power engineering are related to the existing technologies in using the Earth's heat. It is both the direct use (the use of hot groundwater for heat production, i.e., hydrothermal systems), and the production of electricity (enhanced geothermal systems, EGS, as well as geothermal systems based on natural steam-water mixtures, i.e., petro- and hydrothermal systems, respectively). The advantages of using geothermal resources in relation to other energy sources are considered in geoecological respect. Geoecological risks associated with the operation of geothermal natural and man-made systems are considered. These risks are related to possible chemical contamination resulting from the mineralized groundwater spills on the surface, with technological change in hydrodynamic equilibrium, with the depletion of the reservoir and lowering the temperature of underground waters caused by reinjection of the cooled heat-transfer fluid. These risks could be minimized by full reinjection of the used fluid, monitoring of heat-transfer fluid leaks, microseismic activity monitoring in the area of operation of petrothermal resources, predicting negative processes using computer mathematical modeling methods, and optimizing circulation systems for heat extraction.The experience of minimizing geoecological risks by the example of the Khankala experimental industrial geothermal station is considered in the article. The advantage of hydrothermal natural and technogenic systems over petrothermal ones at the current level of development of drilling and heat extraction technologies is proved proceeding from the qualitative analysis of geoecological risks and existing heat extraction technologies. It is determined that the deposits of geothermal water with full reinjection of the used fluid is the most environmentally friendly renewable energy source that does not depend on weather conditions. At the same time, it is noted that the technologies created for hydrothermal natural and human-made systems form the basis for both improving the efficiency of hydrothermal and petrothermal energy development.

Keywords: *geoecological risks*, *geothermal groundwater*, *geothermal resources*, *hydrothermal systems*, *renewable energy*

REFERENCES

1. Avetisyantz, A.A., Krylov, V.B. *Opyt stroitel'stva tsirkulyatsionnoi sistemy na Khankal'skom geotermal'nom mestorozhdenii* [Experience in the construction of a circulation system at the Khankala geothermal field]. *Fizicheskie protsessy pri razrabotke geotermal'nykh mestorozhdenii* [Physical processes in the exploitation of geothermal deposits]. Leningrad, LGI Publ., 1983, pp. 85–88. (in Russian)
2. Alkhasov, A.B. *Vozobnovlyaemaya energetika* [Renewable energy]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012, 256 p. (in Russian)
3. *GOST P 56909-2016. Netraditsionnye tekhnologii. Geotermal'naya energetika. Terminy i opredeleniya* [State

Standard *P 56909-2016*. Nontraditional technologies. Geothermal energy. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 12 p. (in Russian)

4. *Pravila razrabotki mestorozhdenii teploenergeticheskikh vod PB 07-599-03* [Rules for the exploitation of thermal energy water deposits 07-599-03]. Moscow. State unitary enterprise "Scientific and technical center for industrial safety of Gosgortekhnadzor of Russia". 2003, 8 p. (in Russian)
5. Farkhutdinov, A.M., Ismagilov, R.A., Farkhutdinov, I.M., Cherkasov, S.V., Mintsaev, M.Sh. *Perspektivy ispol'zovaniya teploenergeticheskikh vod Chechenskoi Respubliki na baze opyta analogichnykh rabot vo Frantsii (Parizhskii bassein)* [Prospects for the use of geothermal waters of the Chechen Republic on the basis of the experience of similar works in France (Paris basin)]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 398, pp. 257–264. (in Russian)
6. Farkhutdinov, A.M., Farkhutdinov, I.M., Cherkasov, S.V., Ismagilov, R.A., Khairulina, L.A. *Primenenie komp'yuternogo modelirovaniya dlya ustoichivoi ekspluatatsii termal'nykh podzemnykh vod Khankal'skogo mestorozhdeniya* [Use of computer modeling for sustainable exploitation of the Khankala geothermal water]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov.* 2019, vol. 330, no. 12, pp. 7–17. (in Russian)
7. Farkhutdinov, A.M., Cherkasov, S.V., Mintsaev, M.Sh., Shaipov, A.A. *Termal'nye podzemnye vody Chechenskoi Respubliki: novyi etap ispol'zovaniya* [Geothermal waters of the Chechen Republic: a new stage of use]. *Priroda*, 2017, no. 3 (1219), pp. 28–35.
8. Cherkasov, S.V., Farkhutdinov, A.M., Shaipov, A.A. *Ob effekte ostatochnogo debita geotermal'noi tsirkulyatsionnoi sistemy teplootbora* [On residual flow effect in a geothermal loop]. *Doklady Rossiiskoi Akademii Nauk. Fizika, tekhnicheskie nauki,* 2020, vol. 491, pp. 90–92. (in Russian)
9. Cherkasov, S.V., Churikova, T.G., Bekmurzaeva, L.R., Gordeichik, B.N., Farkhutdinov, A.M. *Sostoyanie i perspektivy ispol'zovaniya geotermal'nykh resursov v Rossiiskoi Federatsii* [State-of-art and prospects for the use of geothermal resources in the Russian Federation]. GEOENERGY. Proc. International Scientific and Practical Conference, 2015, pp. 303–322. (in Russian)
10. Axelsson, G. Role and management of geothermal reinjection. Short course on geothermal development and geothermal wells. Santa Tecla, Salvador, UNU-GTP Publ., 2012, 21 p.
11. Baisch, S., Carbon, D., Dannwolf, U., Delacou, B., Devaux, M., Dunand, F., Jung, R., Koller, M., Martin, C., Sartori, M., Secanell, R., Vör, R. Deep heat mining Basel – seismic risk analysis. Basel, SERIANEX Publ., 2009, 21 p.
12. Battye, D.L., Ashman, P.J. Radiation associated with Hot Rock geothermal power. Australian Geothermal Energy Conference, 2009. https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/AGEC/2009/Battye_Ashman_2009.pdf
13. Bošnjaković, M., Stojkov, M., Jurjević, M. Environmental impact of geothermal power plants. *Technical Gazette,* 2019, vol. 26 (5), pp. 1515–1522. https://doi.org/10.17559/TV-20180829122640
14. Brown, K., Webster-Brown, J. Environmental impacts and mitigation. In: Geothermal energy: utilization and technology. Dickson M.H., Fanelli M. (eds.) Routledge. 2013. P. 155–171. https://doi.org/10.4324/9781315065786
15. Cherkasov, S.V., Farkhutdinov, A.M., Rykovanov, D.P., Shaipov, A.A. The use of unmanned aerial vehicle for geothermal exploitation monitoring: Khankala field example. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 2018, vol. 6, no 2, pp. 351–362.
16. Farkhutdinov, A., Goblet, P., de Fouquet, C., Cherkasov, S. A case study of the modeling of a hydrothermal reservoir: Khankala deposit of geothermal waters. *Geothermics*, 2016, vol. 59, part A, pp. 56–66. http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.10.005
17. Gunnarsson, I., Aradóttir, E. S., Sigfússon, B., Gunnlaugsson, E., and Júlíusson, B. M. Geothermal gas emission from Hellisheiði and Nesjavellir power plants, Iceland. GRC Transactions. 2013, vol. 37, pp. 785–789.
18. Holl, H.-G. What did we learn about EGS in the Cooper Basin? Milton, Australia: Geodynamics Limited, 2015, 79 p. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33547.49443
19. Limberger, J., Boxemb, T., Pluymaekers, M., Bruhn, D., Manzella, A., Calcagno, P., Beekman, F., Cloetingh, S., Van Wees, J.D. Geothermal energy in deep aquifers: a global assessment of the resource base for direct heat utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2018, no. 82, pp. 961–975.
20. Parisio, F., Vilarrasa, V., Wang, W., Kolditz, O., Nagel, Th. The risks of long-term re-injection in supercritical geothermal systems. *Nature Communications*, 2019, vol. 10, pp. 4391. https://doi.org/10.1038/s41467-019-12146-0
21. Schill, E., Genter, A., Cuenot, N., Kohl, T. Hydraulic performance history at the Soultz EGS reservoirs from stimulation and long-term circulation tests. *Geothermics*, 2017, vol. 7, pp. 110–124.
22. Tomarov, G., Kolesnikov, D., Semenov, V., Podverbny, V., Shipkov, A. Prevention of corrosion and scaling in geothermal power plants equipment. Proc. World Geothermal Congress 19-25 April 2015. Melbourne, Australia, 2015, 6 p. https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/27032.pdf
23. Vengosh, A., Hirschfeld, D.,Vinson, D., Dwyer, G., Raanan, H., et al. High naturally occurring radioactivity in fossil groundwater from the Middle East. *Environ. Sci. Technol.,* 2009, vol. 43, no. 6, pp. 1769–1775.
24. Walczak, K., Olszewski, J., Zmyślony, M. Estimate of radon exposure in geothermal SPAs in Poland. *Int J Occup Med Environ Health*. 2016, vol. 29(1), pp.161–166.
25. Zemach, E., Drakos, P., Spielman, P., Akerley, J. Desert Peak East enhanced geothermal systems (EGS) project. Draft Final Report. Reno, NV, USA: Ormat Technologies, Inc. 2017, 87 p.
26. Zotzmann, J., Regenspurg, S. Evaluating the efficiency of scaling inhibitors in geothermal fluids at high pressures and high temperatures. Proceedings World Geothermal Congress 19–25 April 2015. Melbourne, Australia, 2015. 5 p. https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/item_1267890

ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2021, № 2, с. 27–40

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 550.34.013.2

ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМОГРАВИТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗОНАХ АКТИВНОГО ПРОЯВЛЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ (НА ПРИМЕРЕ ТЕРРИТОРИИ УЗБЕКИСТАНА)

© 2021 г. Н. Г. Мавлянова[1,*], Р. С. Ибрагимов[2,], Т. Л. Ибрагимова[2], Х. Х. Рахматуллаев[3,***]**

[1] Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН), Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

[2] Институт сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН РУз, ул. Зулфияхоним, 3, г. Ташкент, 100128 Узбекистан

[3] Государственное учреждение "Институт гидрогеологии и инженерной геологии" при Университете геологических наук Государственного комитета по геологии и минеральным ресурсам РУз, ул. Олимлар, 64, г. Ташкент, 100041 Узбекистан

**E-mail: georisk2015@mail.ru*

*** E-mail: ibrroma@yandex.com*

**** E-mail: khikmat@mail.ru*

Поступила в редакцию 15.01.2021 г.
После доработки 20.01.2021 г.
Принята к публикации 25.01.2021 г.

Центральная Азия – один из самых сейсмически активных регионов в мире, где известны исторические землетрясения с магнитудой более 8. Многочисленные людские жертвы и значительные ущербы экономикам стран Центрально-Азиатского региона (ЦАР) наносят сейсмогравитационные процессы, эффект которых считается вторичным по отношению к колебаниям грунта, вызванным непосредственно самими землетрясениями. Однако примеры изучения последствий землетрясений во многих странах мира показали, что их разрушительный потенциал может превосходить прямой ущерб от сейсмических воздействий в несколько раз. В статье на примере территории Узбекистана, анализируются основные факторы, определяющие формирование сейсмогравитационных процессов на территории ЦАР. К их числу отнесены следующие: сейсмотектонические, морфологические, геолого-структурные, прочностные характеристики грунтов, атмосферные осадки, подземные воды, техногенные воздействия. Сильные землетрясения ЦАР (с магнитудой $M > 5.0$) происходят в достаточно узких протяженных зонах, направление которых совпадает с простиранием крупных глубинных разломов, разграничивающих блоки земной коры. Полученные на основе зависимости Гутенберга–Рихтера оценки повторяемости сильных землетрясений в сейсмоактивных зонах Узбекистана могут служить косвенным показателем средней долговременной оползневой активности этих зон. Помимо локальных сейсмических воздействий от землетрясений, происходящих непосредственно в пределах сейсмоактивных структур, на оползневую активность могут влиять сильнейшие (с магнитудой $M > 7.0$) землетрясения всего ЦАР, происходящие на значительном удалении от этих структур. Отдаленные сейсмические события характеризуются низкочастотным составом и высокой продолжительностью сейсмических колебаний и происходят в основном в Гиндукушской фокальной зоне, на территории Памира, в пределах Таласо-Ферганской, Северо-Тянь-Шаньской, Южно-Тянь-Шаньской сейсмоактивных зон и в районе Копетдага. Механизмы формирования и развития крупных оползней, вызванных землетрясениями, для Центральной Азии имеют свои особенности, связанные с тем, что зоны с высокой сейсмической активностью часто совпадают с зоной распространения лессовых пород. В естественных условиях лессовые породы обладают значительной устойчивостью. Но при увеличении естественной влажности несущие свойства этих отложений резко снижаются, что создает благоприятные условия для возрастания оползневой активности при внешних воздействиях.

Ключевые слова: *сейсмическая опасность*, *сейсмогравитационные процессы*, *Центральная Азия*, *Узбекистан*

DOI: 10.31857/S0869780921020053

ВВЕДЕНИЕ

Землетрясения сопровождаются многочисленными вторичными процессами и явлениями, ущерб от которых может быть весьма значительным. Результаты изучения последствий землетрясений, произошедших в Центральной Азии (ЦА) и различных странах мира, показывают, что наи-

более опасный сейсмогравитационный процесс, который в результате сейсмического воздействия может привести к большим человеческим жертвам, – оползни.

Оползни приводят к гибели людей и разрушениям важных социальных объектов, включая жилые дома, здания, транспортную инфраструктуру, пахотные и орошаемые земли. Изучение условий формирования, механизма развития и прогноза активизации оползней в результате сейсмического воздействия является важной проблемой при оценке сейсмического риска. Известны случаи, когда вторичные процессы стали основной причиной жертв и колоссальных убытков. Например, в результате образования обвалов и оползней, вызванных землетрясением 08.10.2005 г. в Пакистане, погибли 26500 человек [27]. Сейсмическое воздействие 12.05.2008 г. в Китае вызвало более 15000 оползневых процессов, погибли 20 тыс. человек – почти треть жертв, связанных с землетрясением [31]. По данным Новозеландского центра исследований геологических опасностей [18], землетрясение 14.11.2016 г. и его афтершоки вызвали от 80000 до 100000 смещений грунта и привели к образованию около 150 естественных плотин.

Среди основных факторов формирования сейсмогравитационных процессов на территории ЦА выделяются: сейсмотектонические, морфологические, геолого-структурные, прочностные характеристики грунтов, атмосферные осадки, подземные воды и техногенное воздействие.

Сейсмогравитационные процессы могут иметь эффекты двух типов:

– прямые последствия: потери в результате разрушения зданий, столкновения транспортных средств со смещенной массой горных пород, повреждения или разрушения нефте- и газопроводов в результате движения грунта, разрушения систем жизнеобеспечения, коммуникаций, линий связи и т.д.;

– косвенные последствия: образование завалов в руслах рек, перекрытие автомобильных дорог, железнодорожных путей грунтовыми массами, изменение рельефа местности, уничтожение сельскохозяйственных угодий.

Крупные оползни, вызванные землетрясениями в ЦА, имеют особенности, связанные с тем, что зоны с высокой сейсмической активностью совпадают с зоной распространения лессовых пород. В естественных условиях лессовые породы обладают значительной устойчивостью. Но при увеличении естественной влажности несущие свойства этих отложений резко снижаются. Наложение на карту лессовых пород местоположения зон возможных очагов землетрясения (ВОЗ) показывает, что районы широкого распространения различных генетических типов лессовых пород расположены именно в этих зонах или в непосредственной близости от них. Поэтому высокая сейсмичность лессовых территорий определяет приоритет исследований при сейсмическом микрорайонировании.

Согласно оценке вероятности возникновения оползней и лавин во всем мире [24], на основе морфологических, геологических, метеорологических и сейсмологических данных определено, что “горячие точки” образования оползней расположены в сейсмически активных горных массивах. Опасность образования оползней для территории ЦА оценивается от средней до очень высокой. Наиболее известные оползни связаны с землетрясениями в горных районах Тянь-Шаня и Памира: Кеминское (M = 8.2) 1911 г., Сарезское (M = 7.8) 1911 г., Хаитское (M = 7.4) 1949 г., Гиссарское (M = 5.5) 1989 г. и Суусамырское (M = 7.3) 1992 г.

Кеминское землетрясение 03.01.1911 г. в Казахстане одно из самых сильных событий, когда-либо зарегистрированных на Тянь-Шане, вызвавшее обширные оползни вдоль активного разлома протяженностью 200 км. Самыми крупными массовыми движениями были: каменная лавина из известнякового материала (около 15106 м^3) вдоль Кеминского разлома примерно в 60 км к западу от эпицентра; оползень “Ананьево” (Кыргызстан) к северу от оз. Иссык-Куль (примерно в 80 км к востоку от предполагаемого эпицентра) [19].

Сарезское землетрясение 18.02.1911 на Памире (Таджикистан), вероятно, вызвало сотни сейсмогравитационных процессов, но из-за труднодоступности высокогорного района только одно из них хорошо задокументировано – гигантский Усойский оползень в долине р. Мургаб. Этот оползень является крупнейшим в мире невулканическим оползнем, когда-либо зарегистрированным в исторические времена. Усойский оползень перекрыл р. Мургаб и образовал плотину высотой 567 м, в результате возникло Сарезское озеро длиной 60 км, содержащее более 17 км^3 воды [29].

В июле 1949 г. Хаитское землетрясение спровоцировало сотни оползней недалеко от южной границы гор Тянь-Шаня в центральном Таджикистане. Сейсмогравитационные процессы включали широко распространенное обрушение скальных склонов, а также большое количество оползней в лессах, покрывающих склоны горных хребтов. В долине р. Ясман сотни оползней слились в массивный лессовый поток (объем 245 млн м^3), который продвинулся на 20 км по склону с уклоном всего 2°. В соседней долине оползень Хаит был связан с преобразованием каменного оползня, вызванного землетрясением, в очень быстрый поток за счет вовлечения в его движение водонасыщенного лесса. Он прошел

7.41 км со средней скоростью ~30 м/с. Авторы [17] оценивают его объем в 75 млн м^3, что на порядок меньше ранее опубликованных оценок. Число жертв оползней, вызванных землетрясением, в эпицентральном регионе было значительным. Около 7000 человек погибли, из них около 4000 в лессовом потоке Ясманской долины, 20 кишлаков были завалены.

Примером сейсмической катастрофы на участках распространения увлажненных лессовых пород стало Гиссарское землетрясение 23.01.1989 г., вызвавшее серию оползней разжижения. Эпицентральная зона располагалась на расстоянии 15–20 км к востоку от г. Душанбе (Таджикистан) в Гиссарской долине и охватывала плато Уртабоз, покрытое лессовыми грунтами мощностью до 100 м. Орошение территории около 100 га для выращивания хлопка началось в 1970 г. Оросительные каналы строились в лессовых грунтах без гидроизоляционных слоев. Объем используемой для орошения воды составлял 12–15 млн м^3 [2], это привело к увеличению влажности пород до 24–28% вплоть до глубин 20–30 м. Под влиянием землетрясения на площади 8 км^2 образовалось несколько оползней разжижения, которые стали причиной гибели более 200 человек [2].

Одно из последних катастрофических сейсмических событий, проявившееся в ЦА – Суусамырское землетрясение 19.08.1992 г., вызвавшее многочисленные сейсмогравитационные процессы: камнепады, оползни, грязевые/селевые потоки, а также большое количество разнообразных гравитационных трещин в Северо-Центральном Тянь-Шане, которые подробно описаны в работе [22].

Наиболее крупные остаточные деформации земной коры произошли в 9-балльной зоне Чаткальского землетрясения 1946 г. (M = 7.5), особенно в районе оз. Сары-Челек, где образовались крупные трещины, простирающиеся на 200–300 м к западному склону водораздела рек Карасу и Ходжата. Местами (между озером и долиной р. Афлатун) возникли крупные оползни в суглинках. В результате Чаткальского землетрясения на водоразделах между оз. Сары-Челек и долиной р. Афлатун возникли крупные сейсмотектонические зияющие трещины, способствующие образованию оползней в лессовых породах [4].

Основные признаки сейсмической природы оползней и обвалов:

– связь с известными землетрясениями в современный период;

– одновременность образования на больших территориях;

– связь и тесные парагенетические ассоциации с разрывами и другими сейсмодислокациями.

Особенно наглядно это подтверждают округлые сейсморвы отрыва и вершинные грабены на водоразделах, которые формируют ниши отрыва оползней, определяют их размеры и объемы. Основоположник палеосейсмического метода в сейсмотектонике В.П. Солоненко [9] еще в 1976 г. подчеркнул надежность этого признака. В этой связи, оценка повторяемости сильных землетрясений для орогенных территорий может служить косвенным показателем их средней долговременной оползневой активности.

Ниже приводится описание основных сейсмоактивных зон территории Узбекистана с указанием основных тектонических нарушений, с которыми они ассоциированы, и перечислением сильнейших землетрясений, произошедших в их пределах. Для каждой из сейсмоактивных зон по графикам повторяемости землетрясений определены средние периоды повторения сильных (с $M > 5$) землетрясений. Для некоторых сильных землетрясений дается описание вызванных ими вторичных эффектов. Информационной основой анализа сейсмичности являлись региональный каталог инструментальных землетрясений территории Узбекистана, начиная с 1955 г. [5], каталог землетрясений Центральной Азии с исторических времен [23] (последнее обновление декабрь 2017 г.), база макросейсмических данных сильных землетрясений территории Центральной Азии [13] (последнее обновление декабрь 2019 г.). В качестве сейсмотектонической основы использовалась электронная версия схемы активных разломов земной коры территории Евразии [1].

СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАВИТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Территория Узбекистана располагается в центральной части Западного Тянь-Шаня между Центрально-Казахстанским щитом и Туранской плитой Урало-Сибирской платформы на севере и западе, Таримским блоком на востоке и Индийской платформой на юге. Восточная часть исследуемого района включает в себя горные системы Тянь-Шаня, Алая и Памира. К юго-западу от Узбекистана расположен Копетдагский горный массив Туркмено-Хорасанской горной системы (рис. 1). Геологические структуры Западного Тянь-Шаня существенно различаются по рельефу, геологическому строению, возрасту и истории геологического развития. На востоке они представлены высокими горными складчатыми сооружениями, состоящими из палеозойских образований, и межгорными и предгорными впадинами, покрытыми мезозойскими и кайнозойскими отложениями. На западе эти отложения, с меньшей мощностью, охватывают обширные равнины эпипалеозойской Туранской плиты, а

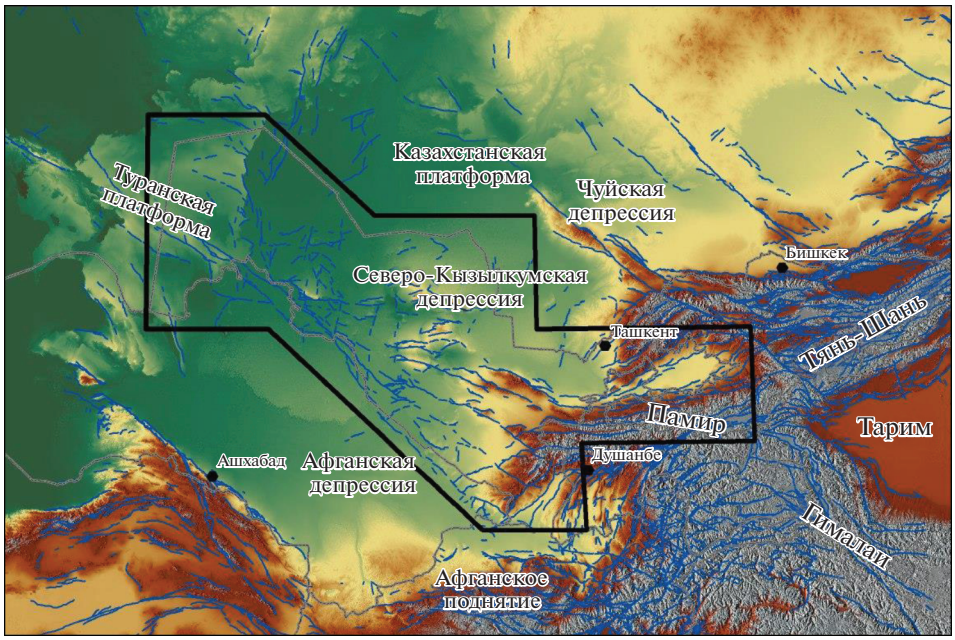


Рис. 1. Расположение района исследований в общей структуре района Высокой Азии и активные разломы земной коры по [1].

палеозойские породы местами выступают в виде возвышенностей небольшого размера в пределах Кызылкумов.

Проявления сейсмичности на территории Узбекистана неразрывно связаны с сейсмической активностью всего Центрально-Азиатского региона (ЦАР) [11, 14]. Большинство сильных землетрясений происходит в достаточно узких протяженных зонах, направление которых совпадает с простиранием крупных глубинных разломов, разграничивающих блоки земной коры. В пределах ЦАР выделяют несколько высокопотенциальных сейсмоактивных зон, где достаточно часто происходят землетрясения с магнитудой $M > 7$ (рис. 2). Это зоны глубокофокусных землетрясений Гиндукуша (I), зона Памира (II), Таласо-Ферганская сейсмоактивная зона (III), Северо-Тянь-Шаньская (IV) и Южно-Тянь-Шаньская (V) сейсмоактивные зоны, сейсмоактивный район Копетдаг (VI).

Несколько крупных сейсмоактивных зон, способных генерировать сильные землетрясения, расположены непосредственно на территории Узбекистана. Они выделены на основе сейсмологических и сейсмотектонических данных [3, 11, 14–16]. Это следующие девять сейсмоактивных зон (см. рис. 2 врезка), связанных с крупными тектоническими структурами: Ташкентская (1), Южно-Ферганская (2), Восточно-Ферганская (3), Нурекатино-Ангренская (4), Северо-Ферганская (5), Южно-Узбекистанская (6), Амударьинская (7), Газли-Каратагский фрагмент Южно-Тянь-Шаньской сейсмоактивной зоны (8) и Северо-Тамдынская зона (9). Все выделенные сейсмоактивные зоны территории Узбекистана расположены восточнее 63° в.д.

К западу от этого меридиана (район Приаралья) территория считается практически асейсмичной, хотя по историческим данным здесь также происходили сильные землетрясения, наиболее известным из которых является разрушительное землетрясение в районе г. Ургенча в 1208 г. с магнитудой $M = 6.1$.

О современной сейсмической активности территории Узбекистана можно судить по графику повторяемости землетрясений (зависимость Гутенберга–Рихтера). Рассчитанные по этому графику (рис. 3а) периоды повторения землетрясений различных магнитуд приведены в табл. 1. Основная масса сильных (с $M_W \geq 5.0$) землетрясений исследуемой территории расположена в пределах сейсмоактивного слоя глубиной до 30 км (см. рис. 3б).

В качестве основной характеристики для классификации землетрясений по величине в региональном каталоге землетрясений территории Узбекистана длительное время использовался энергетический класс землетрясений K, введенный в сейсмологическую практику в [13]. Энергетический класс землетрясения K определяется по сумме амплитуд объемных P и S волн и связан с высвобожденной сейсмической энергией (E) зависимостью:

$$K = \lg E \text{ (дж)}.$$

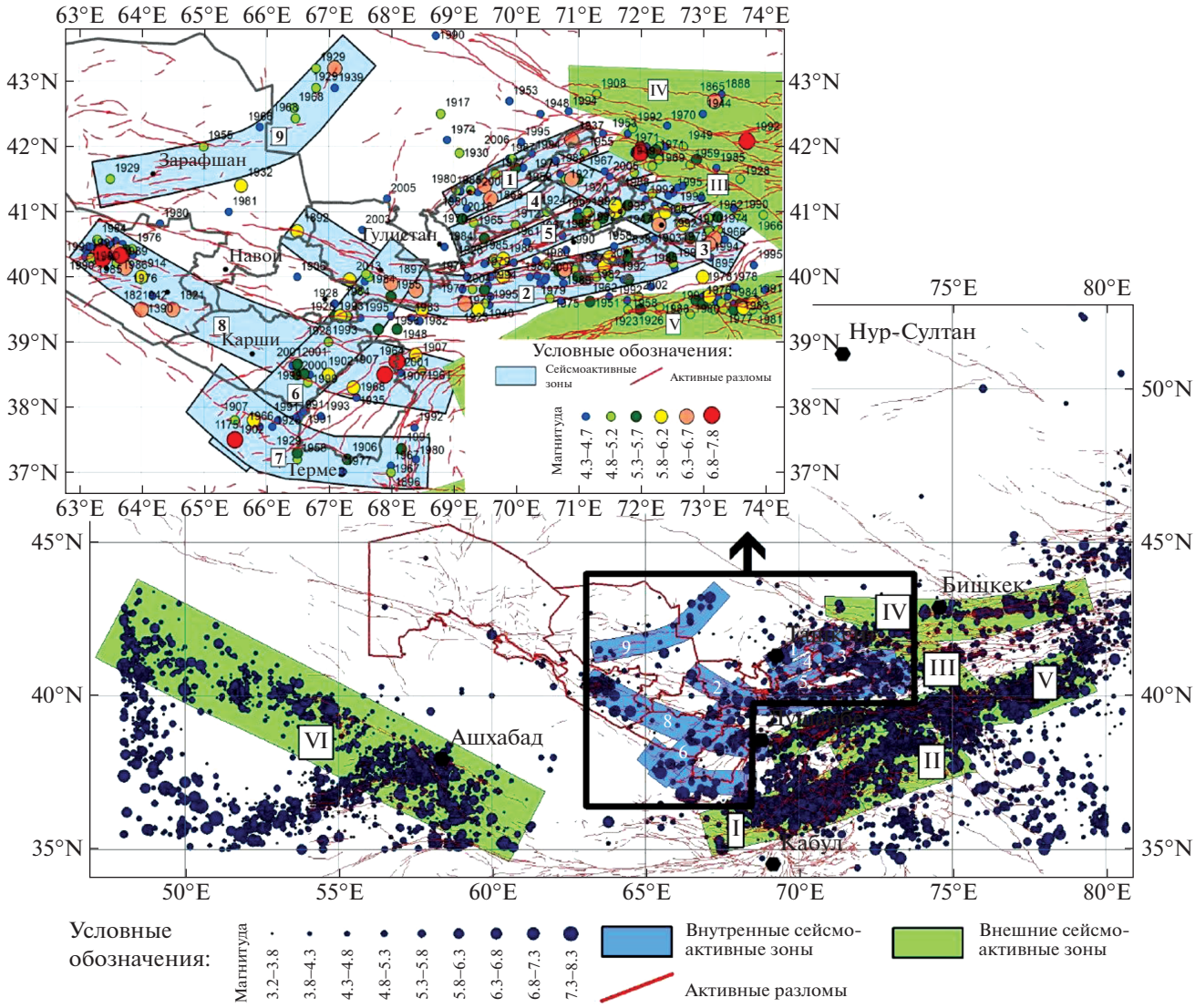


Рис. 2. Карты эпицентров землетрясений территории Центральной Азии и Узбекистана (по каталогу EMCA [23]) с исторического периода времени по 2017 г. с указанием основных сейсмоактивных зон региона.

Для различных сейсмических событий, содержащихся в Центрально-Азиатском каталоге землетрясений EMCA [23], приводятся различные типы магнитуд M_S, mb, MLH. При оценке сейсмической опасности территории Узбекистана в значениях максимальных ускорений колебаний грунта [8] для выбора надлежащего уравнения движения грунта (GMPE) использовалась моментная магнитуда M_W. Уравнения связи между энергетическим классом землетрясения K и различными типами магнитуд для землетрясений Центральной Азии были заимствованы из работы [7]. Как правило [12, 28], при описании сейсмических воздействий в баллах макросейсмической шкалы и при нахождении законов затухания интенсивности сотрясений с удалением от эпицентра для характеристики величины землетрясения используется магнитуда M_S, определяемая по поверхностным волнам. Поэтому именно этот тип магнитуды указан нами далее при перечислении

Таблица 1. Средние периоды повторяемости землетрясений с различной магнитудой на территории Узбекистана

Магнитуда, M_W	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
Период, Т	2–3 мес	9–10 мес	2.5–3 года	10–11 лет	35–40 лет	130–140 лет

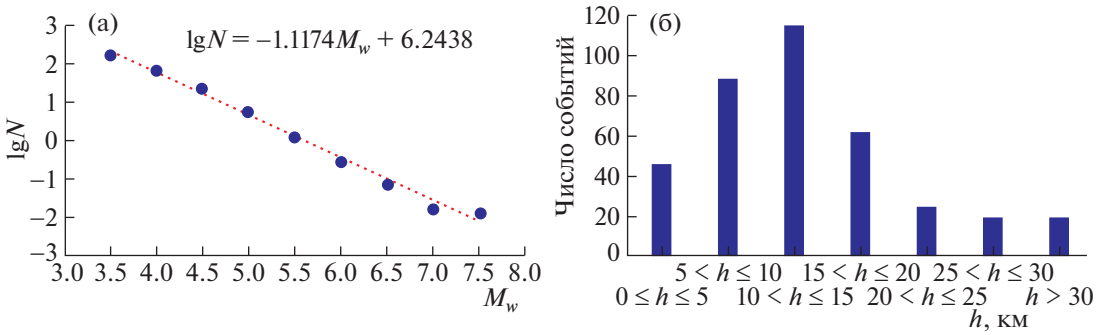


Рис. 3. Количественные характеристики сейсмичности территории Узбекистана: а – график повторяемости землетрясений территории Узбекистана; б – распределение сильных землетрясений по глубинам.

наиболее сильных землетрясений, произошедших в каждой сейсмоактивной зоне территории Узбекистана, и описания средней частоты их повторения.

Ташкентская сейсмоактивная зона (1) протяженностью порядка 240 км и шириной 30–40 км вытянута с СВ на ЮЗ. Сейсмические проявления в ее пределах определяются современной геодинамической активностью Каржантауского разлома в северо-восточной части и Ташкентской флексурно-разрывной зоны в юго-западной части [3]. Наиболее сильными из известных землетрясений в этой зоне считаются исторические землетрясения 1868 и 1886 гг., произошедшие на расстоянии порядка 30–40 км от г. Ташкента, а также Пскемское землетрясение 1937 г. Магнитуда каждого из этих событий была выше 6.5, а интенсивность сотрясений в эпицентре достигала $I = 8$ баллов по шкале MSK-64. За инструментальный период наблюдений в пределах этой зоны был также отмечен ряд сильных землетрясений: Бурчмулинское 1959 г. $M = 5.9$, Ташкентское 1966 г. $M = 5.3$, Таваксайское 1977 г. $M = 5.3$, Назарбекские 1980 г. $M = 5.1$, Алтынтюбинское 1987 г. $M = 5.1$. Последняя активизация сейсмоактивной зоны проявилась землетрясениями с магнитудами $M = 4.8$ и $M = 4.6$ в 2008 и 2010 гг. Средний период повторяемости сильных землетрясений в Ташкентской сейсмоактивной зоне составляет 12–15 лет. В результате изучения последствий исторических землетрясений в этой зоне выделены древние сейсмогенные оползни [4] (Ачикульский, Нурекатинский, Хумсанский, Ходжикенский, Газакентский и др.).

Южно-Ферганская сейсмоактивная зона (2) в восточной части объединяет систему Южно-Ферганских разломов и одноименную флексурно-разрывную зону, а в западной части охватывает область динамического влияния Бесапанского разлома [3]. На востоке эта зона протягивается в субширотном направлении по северным склонам Алайского и Туркестанского хребтов. Длина зоны порядка 700 км, ширина – 20–30 км. В пределах Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны произошло множество землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$: Ура-Тюбинские землетрясения 1897 г., Кыркольское 1907 г., Хайдарканское 1977 г., Исфара-Баткенское 1977 г., Чимионское 1982 г., Каннское 2011 г. и ряд других землетрясений. Согласно графику повторяемости землетрясений, сейсмические события с магнитудой $M \geq 5$ здесь происходят каждые 2–3 года. В пределах этой зоны произошло множество землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$. К наиболее сильным землетрясениям западной части данной зоны относятся следующие сейсмические события: историческое землетрясение 1892 г. с $M = 6.1$ в районе пос. Нурата и два Ура-Тюбинских землетрясения 1897 г. с $M = 6.6$ и $M = 6.7$, произошедшие с интервалом в 2 часа на расстоянии порядка 50 км друг от друга. Наиболее сильные землетрясения в центральной части данной зоны, произошедшие за последние 50 лет следующие: Исфара-Баткенское 1977 г. с $M = 6.4$, Костакозское 1988 г. $M = 6.2$, Чимионское 1982 г. с $M = 5.8$ и Канское 2011 г. с $M = 6.1$. Наиболее сильными землетрясениями восточной части Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны считаются два Куршабских землетрясения 1924 г. с $M = 6.4$ и $M = 6.5$, произошедшие в области сочленения данной зоны с восточным окончанием Восточно-Ферганской сейсмоактивной зоной (3). Макросейсмический эффект от этих всех землетрясений составлял 7–8 баллов по шкале MSK-64. Согласно графику повторяемости землетрясений, сейсмические события с магнитудой $M \geq 5$ в пределах Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны происходят в среднем каждые 2–3 года. Сейсмическая активность на уровне слабых и умеренных землетрясений в данной зоне уменьшается с продвижением с востока на запад.

Восточно-Ферганская сейсмоактивная зона (3) длиной около 300 и шириной 30–40 км, уверенно выделяется по эпицентрам сильных землетрясений и охватывает область динамического влия-

ния Восточно-Ферганского разлома, который впервые был выделен А.И. Суворовым [10]. За пределами Узбекистана эта зона протягивается далее на северо-запад, отделяя Чаткальский мегаблок от Кураминского вдоль Кумбельской зоны разломов. Наиболее сильные землетрясения Восточно-Ферганской сейсмоактивной зоны – Андижанское 16.12.1902 г. с $M = 6.4$, упомянутые выше Куршабские землетрясения, произошедшие 6 и 12 июля 1924 г., Избаскентское 1992 г. с $M = 5.9$. По макросейсмическим данным, большая ось изосейст Андижанского землетрясения располагалась ортогонально к простиранию Восточно-Ферганской зоны и совпадала с простиранием Южно-Ферганской флексурно-разрывной зоны. Период повторяемости землетрясений с $M > 5$ в Восточно-Ферганской сейсмоактивной зоне составляет 5–6 лет.

Нурекатино-Ангренская сейсмоактивная зона (4) имеет протяженность порядка 300 км и ширину 20–30 км, простирается с СВ на ЮЗ. Сейсмические проявления данной зоны обусловлены динамическим влиянием Нурекатинского разлома в западной части и Северо- и Южно-Ангренских разломов в южной своей части [3]. В пределах зоны известны Коштепинское землетрясение 1965 г. $M = 5.5$; Букинское 1967 г. и Пскентское 1970 г. с $M = 5.0$ Последняя активизация в данной зоне проявилась Туябугузским землетрясением 2013 г. $M = 5.6$. Период повторяемости сильных землетрясений в данной зоне составляет 12 лет.

Северо-Ферганская сейсмоактивная зона (5) представляет собой область, охваченную влиянием Северо-Ферганского разлома и одноименной флексурно-разрывной зоны [4], а также оперяющих их разрывных нарушений более низкого ранга. Длина зоны порядка 350 км, ширина 15–20 км. Зона характеризуется высокой сейсмической активностью. Как за исторический период времени, так и в период инструментальных наблюдений, здесь произошло множество землетрясений с $M \geq 5.0$, вызвавших на поверхности сотрясения с интенсивностью $I \geq 7$–8 баллов. Наиболее известные сейсмические события из них: Ленинабадское землетрясение с $M = 5.2$ 1972 г.; Папское с $M = 5.5$ 1984 г.; Кайраккумское землетрясение с $M = 5.9$ 1985 г.; Шамолдысайское землетрясение с $M = 5.1$ 1988 г.; Избасканское с $M = 5.9$ 1992 г.; Уйчинское землетрясение с $M = 5.3$ 1995 г. Избасканское землетрясение отнесено к выделенной группе несколько условно, так как произошло на незначительном удалении от рассматриваемой системы разломов, и простирание изосейст этого землетрясения существенно отличалось от направления выделенной структуры. Сильные землетрясения в пределах зоны происходят каждые 2–3 года.

Трещинообразование во влажных лессовых почвах наблюдалось во время Папского землетрясения 1984 г. на левом берегу р. Сырдарьи на поверхности I и II надпойменных террас, где развиты аллювиальные лессовидные почвы, подстилаемые галькой (уровень грунтовых вод 0.5–2 м). Здесь образовалась серия прерывистых трещин, в основном направленных вдоль долины. Длина трещин варьировала от 5 до 20 м, ширина от 3 до 15 см, а глубина достигала 1.5 м. В этом случае образование трещин также связано со сдвиговыми процессами. Полевые работы проводились с целью изучения сейсмических свойств лессовых пород и влияния факторов, влияющих на их изменение. В результате Кайракумского землетрясения 1985 г. на левом берегу Кайракумского водохранилища (в 0.6 км от плотины) произошло разжижения лесса на пологом склоне (4°–6°), образовались два оползня объемом до 200 тыс. м^3. Вдоль берега водохранилища параллельно береговой линии образовалась серия трещин длиной до 200 м.

Южно-Узбекистанская сейсмоактивная зона (6) юго-западного простирания, выделена как по сильным, так и по умеренным землетрясениям. По сейсмотектоническим данным юго-западная часть Южно-Узбекистанской зоны соответствует простиранию Кызылдарьинской и Лянгар-Караильской систем разломов [3]. В северо-восточной части своего простирания она пересекает Южно-Тянь-Шаньскую и Южно-Ферганскую сейсмоактивные зоны, практически примыкая к Ташкентской сейсмоактивной зоне. Протяженность зоны порядка 400 км, ширина около 40 км. Наиболее сильным из известных землетрясений этой зоны считается историческое Керкинское землетрясение 1175 г. с $M = 7.1$. Четыре землетрясения вблизи Ургута ($M = 5.0$–6.0) датируются 1490, 1799, 1817–1818 и 1880 гг. По летописным данным, их макросейсмический эффект в эпицентре оценивается от 7 до 9 баллов. К югу от них в 1902, 1907 гг. произошли землетрясения, ощущавшиеся на поверхности интенсивностью сотрясений 6–7 баллов. Средний период повторяемости землетрясений с $M \geq 5.0$ в данной зоне составляет 13–15 лет.

Положение *Амударьинской сейсмоактивной зоны* (7) совпадает с восточным окончанием глубинного Амударьинского разлома, который прослеживается в направлении с северо-запада на юго-восток вдоль р. Амударья через города Чарджоу, Фароб, Ургенч. Протяженность зоны в пределах территории Узбекистана порядка 350 км, ширина порядка 50 км. За исторический период времени в пределах зоны происходили весьма сильные землетрясения ($M \geq 6.0$). Они датируются 1175 и 1907 гг. Известны также инструментальные землетрясения умеренной силы ($M \geq 4.5$),

произошедшие в 1959, 1977 и 1980 гг. Сейсмическая активность по слабым землетрясениям в зоне очень низкая, распределена по площади неравномерно и уменьшается с продвижением с востока на запад. Период повторяемости сильных (с $M \geq 5$) землетрясений в зоне составляет 25–30 лет.

Наибольшую сейсмическую опасность в Западном Узбекистане представляет Газли-Каратагский фрагмент *Южно-Тянь-Шаньской сейсмоактивной зоны* (8) протяженностью порядка 550 км и шириной порядка 50–60 км, линейно связывающий очаги сильнейших (с $M > 7$) Каратагских землетрясений 1907 г. и Газлийских землетрясений 1976 и 1984 гг. Сейсмическая активность в пределах этой зоны распределена крайне неравномерно. На западном ее участке кроме упомянутых сильнейших платформенных Газлийских землетрясений, известны разрушительные исторические землетрясения в районе г. Бухары, где последняя сейсмическая активизация на уровне землетрясений с $M \geq 5.0$ отмечалась в 2005 г. В восточной части, кроме сильнейших Каратагских, произошло Лянгарское землетрясение 1971 г., а также рой Камашинских землетрясений 1999–2003 гг. с $M \geq 5$. Средний период повторяемости сильных землетрясений в пределах Газли-Каратагского сегмента Южно-Тянь-Шаньской сейсмоактивной зоны составляет около 10 лет. По данным инструментальных наблюдений сейсмическая активность центральной части зоны на порядок ниже, чем западной и восточной части.

Северо-Тамдынская сейсмоактивная зона (9) соответствует простиранию одноименной системы разломов [3]. Зона имеет протяженность порядка 400 км, ширину 25–30 км и вытянута в северо-восточном направлении. Наиболее сильное из землетрясений, произошедших в пределах Северо-Тамдынской зоны – Чиилийское 1929 г., имевшее магнитуду $M = 6.4$. В 1969 г. в восточной части зоны произошел рой Кызылкумских землетрясений с $M = 5–5.5$. Сейсмическая активность по слабым землетрясениям в зоне весьма низкая; период повторяемости сильных землетрясений составляет 40–50 лет.

Особого внимания заслуживают исследования, связанные с изучением длительности и спектрального состава сейсмических колебаний, вызывающих оползневую активность. Зачастую активизация оползней связана с проявлением сильнейших землетрясений, происходящих на значительном удалении от мест формирования оползней, где от них ощущаются сотрясения умеренной силы интенсивностью $I = 5–7$ баллов по шкале MSK-64, вызванные продолжительными низкочастотными колебаниями дневной поверхности.

В исследовании [14] изучено инициирующее влияние катастрофических землетрясений Центрально-Азиатского региона на активизацию сейсмичности в сейсмоактивных зонах Узбекистана. Методами статистического анализа временных рядов землетрясений с магнитудой $M \geq 5.0$, произошедших в период с 1901 по 2013 гг., установлены сейсмоактивные зоны на территории Узбекистана, в которых наиболее вероятно проявление сейсмической активизации в случае возникновения сильного землетрясения в различных частях ЦАР (рис. 4). Ярко красным цветом на рисунке отмечены зоны, для которых связь с периодами сейсмической активизации выделяется с высоким уровнем статистической значимости ($\Phi(\xi) \geq 0.95$), розовым цветом на этом же рисунке показаны связи с несколько меньшим уровнем значимости ($0.8 \leq \Phi(\xi) < 0.95$).

Логично предположить, что возникновение сильнейших землетрясений (с $M > 7.0$) в Центральной Азии вызывает в этих же сейсмоактивных зонах Узбекистана не только активизацию сейсмичности на уровне землетрясений с магнитудой $M > 5.0$, но и рост оползневой активности.

Исследования взаимосвязи глубокофокусных *Памиро-Гиндукушских* землетрясений с возникновением крупных оползней и формированием грязевых потоков на значительных расстояниях (340–650 км от эпицентра) в горных районах Средней Азии [6] проведены на основе анализа 200 крупных оползневых смещений за период с 1964–2014 гг. Из них 130 случаев произошли во время землетрясений и 70 случаев спустя некоторое время после них во влажные годы, для которых достоверно известны дата, тип и объем их образования. За данный период в весеннее время произошло более 700 землетрясений $M > 4.5$ в координатах 36°–38° с.ш. и 69°–72° в.д. Минимальная магнитуда, при которой происходили оползни, – $M = 4.4$, чаще оползни происходили при землетрясениях с $M > 4.5–5.0$. Все оползни отмечались во влажные годы, а в сухие, несмотря на частые землетрясения $M > 4.5$ в весеннее время, проявление оползней не отмечено. Расстояние от гипоцентра до места проявления оползня изменяется от 350 до 650 км при глубине гипоцентров 180–250 км [25]. Необходимо отметить, что оползни наблюдались во влажные годы и при отсутствии землетрясений. Авторы рассматривают Гиндукушские землетрясения как “спусковой крючок” для начала образования оползней разжижения, когда накопление количественно измененных характеристик условий достигают критического значения и необходим толчок, чтобы произошел качественный переход пород из влажного состояния к разжижению.

Величина интенсивности сейсмических воздействий, влияющих на устойчивость оползневого склона, варьирует по различным источникам от 5 до 9 баллов (MSK-64) и зависит от изначальной прочности пород, а также от влияния факто-

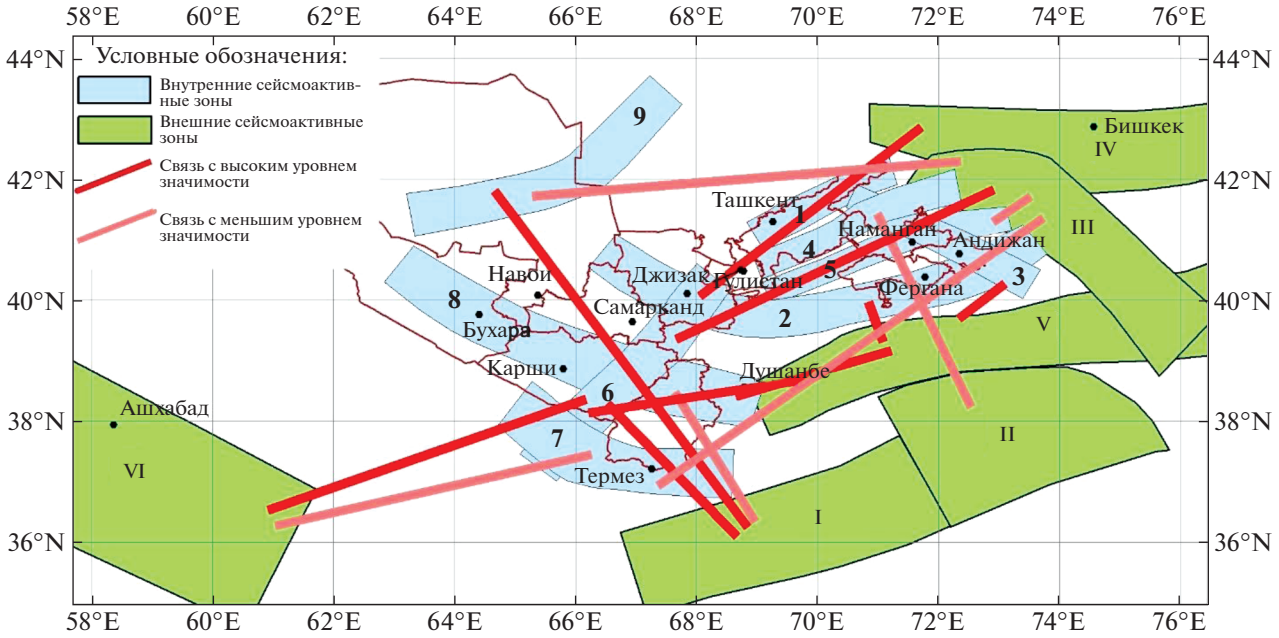


Рис. 4. Схема сейсмоактивных зон на территории Узбекистана, в которых наиболее вероятна сейсмическая активизация в случае, если произошло сильное землетрясение в одной из внешних по отношению к Узбекистану сейсмоактивных зон Центральной Азии.

ров, нарушающих стабильность грунтов (обводнение, подрезка склонов, дополнительная нагрузка от сооружений и т.д.).

До сих пор нет единого мнения о пороговом значении магнитуды землетрясений, вызывающих оползни. Согласно [20, 21], оползни могут быть вызваны землетрясениями с магнитудой, равной или превышающей 4, другие авторы предполагают этот порог равным $M = 5.3$ [26]. Возникновение сейсмогравитационных процессов сильно зависит от близости расположения зоны разлома. Например, в Ташкентской сейсмоактивной зоне оползни формировались не хаотически, а упорядоченно и последовательно вокруг эпицентров сильных землетрясений. Они распространяются по линии крупных надвигов и разломов с благоприятными для их формирования структурно-тектоническими, геолого-геоморфологическими и инженерно-геологическими условиями (обводненность, раздробленность, расчлененность и т.д.). Пространственное распределение крупных оползневых участков в районах Бричмуллы, Нурекаты, Хумсана, Газалкента, Гальвасая свидетельствуют, что плейстосейстовые области происшедших здесь сильных землетрясений, вероятно, имеют большую зону разрушения [4]. В 1959 г. в этой зоне произошло три землетрясения (M = 5.5–5.7), первое с эпицентром вдоль Тешикташского надвига, второе по Сюреньата-Майгашканскому разлому и третье у сел. Хумсан по Каржантаускому надвигу. В результате по сильно обводненным разломам зафиксированы многочисленные оползни в долинах рек Нурекатасая и Угам. Изучение мест возникновения гигантских сейсмических оползней в Китае также показало, что большинство из них находятся очень близко к основным зонам разломов [30].

Морфология склона. Одним из основных факторов, обусловливающих специфику оползней Средней Азии, является рельеф, так как именно от высоты и крутизны склонов зависит распределение напряжений в них. Наибольшее количество оползней характерно для склонов крутизной от 30° до 40°. Этот угол наклона наиболее опасен для образования оползня. Глубина захвата приблизительно около 15 м. Но при этом необходимо отметить, что сейсмооползни в увлаженных лессовых породах возникали и при склоне крутизной 4° (Гиссарское землетрясение). На такое же различие в образовании оползней обращают внимание исследователи из Китая [32]. Они отмечают, что оползни, вызванные атмосферными осадками, происходили, в основном, на крутых склонах, в то время как оползни в лессовых грунтах, вызванные землетрясениями, – на относительно более пологих склонах, что свидетельствует о том, что механизмы образования этих двух типов оползней различны.

Угол наклона поверхности оказывает влияние на сейсмическую устойчивость склонов в глобальном масштабе; в частности, гребни холмов, более высокие части склонов особо подвержены сейсмическому разрушению. Но большая часть оползней разжижения возникает при динамиче-

ском воздействии на увлажненные лессовые грунты на пологих склонах. Поэтому при оценке вероятности их возникновения необходимо учитывать комбинированное влияние рельефа, геологического строения и тектонических условий.

Влажность пород. Большая часть оползней на территории ЦА, вызванных землетрясениями, произошла в весенне-осенний период, когда поверхностные отложения были сильно переувлажнены. Многолетними наблюдениями установлены критерии накопления осадков осеннее-зимнего периода, определяющие начало массовой активизации оползневых процессов: для южных районов территории Узбекистана 300–350 мм, для северных – 500–600 мм [6]. Оползни в Узбекистане чаще происходят в аномально многоводные годы, где пусковым механизмом начала их образования могут быть интенсивное таяние снежного покрова в сочетании с большим количеством ливневых осадков; увеличение расходов родников и резкий подъем уровня подземных вод; сейсмические колебания и резонансное воздействие на склон динамических нагрузок.

Основными результатами влияния атмосферных осадков на активизацию оползней является увеличение естественной влажности и уменьшение прочности грунтов. В результате исследований установлено, что единица объема грунта до глубины 3.5 м увеличивает свой вес в весенний период на 7–9% и более [6]. Даже в тех случаях, когда атмосферные осадки вносят обратимые изменения в степень устойчивости склона, чередующиеся увлажнения и высыхания пород вызывают нарушение водноколлоидных и структурных связей и, в некоторой степени, выщелачивание солей в лессах, что приводит к необратимому снижению их прочности. Весной в период выпадения наибольшего количества атмосферных осадков средние показатели естественной влажности увеличиваются до глубины 2.5–3.0 м для склонов крутизной более 35°; в зоне сезонного промачивания наблюдается максимальная величина влажности 24–27%.

Гидрогеологический фактор. Близость областей питания, формирования и разгрузки в горной и предгорной частях обусловливает тесную связь режима подземных вод с количеством и распределением атмосферных осадков и таянием снега. Весной (март–май) происходит наибольшая инфильтрация поверхностных вод по глубине склонов. В области разгрузки в горной части на склонах появляется большое количество временных источников, а дебит постоянных увеличивается. Наибольшая обводненность в горных и предгорных частях исследуемой территории характерна для зон тектонических разломов, отмеченных в пределах образования крупных оползней.

Техногенное воздействие. В последние годы стали активизироваться уже существующие оползневые процессы и проявляться новые в зонах Чаткальских и Кураминских гор Узбекистана. Причиной их является возрастающая техногенная нагрузка на геологическую среду в результате освоения территории под строительство гидротехнических, транспортных и ирригационных сооружений. Источники техногенного воздействия на геологическую среду, вызывающие образование оползней в горных районах Узбекистана, подразделены на три вида: линейные транспортные сооружения (автомобильные и железные дороги), гидротехнические сооружения и горнодобывающие объекты.

Крупные оползни часто связаны с освоением горнопромышленных районов. Ангренский горнопромышленный район, расположенный в сейсмически активной зоне, отличается высокой концентрацией предприятий угледобывающей и горнорудной промышленности, стройиндустрии и электроэнергетики, объектов промышленно-гражданского строительства и ирригационных систем. Здесь на площади 200 км^2 расположены Ангренский угольный разрез глубиной до 300 м, Джигиристанский карьер, угольные карьеры Наугарзан и Апартак. Выше по долине над угольным разрезом расположено водохранилище объемом 200 млн м^3. Кроме того, Ангренский горнопромышленный район пересекает скоростная автомобильная дорога Ташкент–Ош. На фоне такой высокой техногенной нагрузки за последние 50 лет здесь образовались более 20 крупных оползней объемом от 400 тыс. до 800 млн м^3. Оползни представляют разную степень риска для социальных, хозяйственных объектов и инженерных сооружений [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение условий формирования, механизма развития и прогноза активизации оползней в результате сейсмического воздействия – важная проблема при оценке рисков, связанных с природными геологическими процессами. Оценка повторяемости сильных землетрясений орогенных территорий может служить косвенным показателем их средней долговременной оползневой активности.

Для основных сейсмоактивных зон территории Узбекистана период повторяемости сильных землетрясений (с $M > 5.0$) варьирует от 2–3 лет до 25–30 лет. Помимо локальных сейсмических воздействий, на оползневую активность исследуемой территории влияют отдаленные сейсмические события, характеризующиеся низкочастотным составом и высокой продолжительностью сейсмических колебаний.

Для эффективного прогноза активизации оползней, наряду с сейсмотектоническими факторами, необходимо учитывать также морфологию склона, геолого-структурный фактор, литологический состав пород, степень их водонасыщенности и фильтрационные показатели, влияние источников техногенного воздействия.

Комплексная инженерно-геологическая оценка развития возможных вторичных процессов при сейсмическом районировании территории позволит более качественно прогнозировать место и интенсивность развития склоновых процессов, оценить устойчивость склона и выбрать необходимые меры защиты.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую признательность М.А. Мирзаеву, старшему научному сотруднику лаборатории "Региональной сейсмичности и сейсмического районирования" Института сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН РУз, за подготовку графических материалов к данной статье.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания и плана НИР ИГЭ РАН по теме № г.р. АААА-А19-119021190077-6 и *государственного бюджетного финансирования грантов Академии наук Республики Узбекистан.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г.* База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика, 2017. Т. 8. № 4. С. 711–736. https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0314
2. *Зеркаль О.В., Калинин Э.В., Панасян Л.Л.* Влияние обводнения массива лессовых пород на устойчивость склонов // Геоэкология. 1996. № 4. С. 87–94.
3. *Ибрагимов Р.Н., Нурматов У.О., Ибрагимов О.Р.* Сейсмотектонический метод оценки сейсмической опасности и вопросы сейсмического районирования // Сейсмическое районирование и прогноз землетрясений в Узбекистане. Ташкент: Гидроингео, 2002. С. 59–74.
4. *Касымов С.М., Менглибаев М., Юнусов В.* Влияние землетрясений на оползни в лессовых грунтах // Узбекский геологический журнал. 1982. № 5. С. 27–30.
5. Каталог землетрясений Узбекистана и прилегающих территорий. https://rcsm.fvv.uz/ru/catalog_col. (дата обращения 20.11.2020)
6. *Ниязов Р.А.* Оползни, вызванные Памиро-Гиндукушскими землетрясениями. Ташкент: ГП "Ин-т ГИДРОИНГЕО", 2015. 224 с.
7. *Мукамбаев А.С., Михайлова Н.Н.* Решение проблемы неоднородности магнитуд в работах по сейсмическому зондированию территории республики Казахстан // Вестник НЯЦ РК. 2014. Вып. 4. С. 86–92.
8. *Раутиан Т.Г.* Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 75–114. (Тр. ИФЗ РАН, 9(176): 75-114).
9. *Солоненко В.П.* Сейсмогенные деформации и палеосейсмогеологический метод // Сейсмичность и сейсмогеология Восточной Сибири. М.: Наука, 1977. С. 83–131.
10. *Суворов А.И.* Закономерности строения и формирования глубинных разломов. М.: Наука, 1968. 316 с.
11. *Уломов В.И.* Динамика земной коры Средней Азии и прогноз землетрясений. Ташкент: Фан, 1974. 216 с.
12. *Шебалин Н.В.* Методы использования инженерно-сейсмологических данных при сейсмическом районировании // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 95–111.
13. *Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A.* Models of the macroseismic field earthquakes and their influence on seismic hazard assessment values for Central Asia // Geodynamics & Tectonophysics. 2020. V. 11 (3). P. 606–623. https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0494
14. *Artikov T.U., Ibragimov R. S, Ibragimova T.L, Mirzaev M.A., Artikov M.T.* Revealing of seismic activation interrelationships in various seismoactive zones // Geodesy and Geodynamics. 2015. V. 5 (6). P. 351–360. https://doi.org/10.1016/j.geog.2015.03.007
15. *Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A.* Identification of expected seismic activity areas by forecasting complex seismic-mode parameters in Uzbekistan // Geodesy and Geodynamics, 2018. V. 9 (2). P. 121–130. https://doi.org/10.1016/j.geog.2017.11.005
16. *Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L, Mirzaev M.A.* Complex of general seismic zoning maps OSR-2017 of Uzbekistan // Geodesy and Geodynamics. 2020. V. 11 (4). P. 273–294. https://doi.org/10.1016/j.jeog.2020.03.004
17. *Evans S.G., Roberts N.J., Ischuk A., Delaney K.B., Morozova G.S., Tutubalina O.* Landslides triggered by the 1949 Khait earthquake, Tajikistan, and associated loss of life // Engineering Geology. 2009. V. 109. Is. 3–4. P. 195–212. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.08.007
18. GeoNet, Geological hazard information for New Zealand. URL: https://www.geonet.org.nz (accessed 24.10.2020)
19. *Havenith H.B., Bourdeau C.* Earthquake-induced hazards in mountain regions: a review of case histories from Central Asia // Geologica Belgica. 2010. V. 13. P. 135–150.
20. *Keefer D.K.* Landslides Caused by Earthquakes // Geological Society of America Bulletin. 1984. № 95. P. 406–421.
21. *Keefer D.K.* Earthquake-induced Landslides and Their Effects on Alluvial Fans // Journal of Sedimentary Research. 1999. № 69. P. 84–104.
22. *Korjenkov A.M., Mamyrov E., Omurlaev M., Kovalenko V.A., Usmanov S.F.* Rock Avalanches and Landslides Formed in Result of Strong Suusamyr (1992, M = 7.4) Earth-

quake in the Northern Tien Shan. Test Structures for Mapping of Paleoseismic Deformations by Satellite Images // Proc. of the 7th Int. Symp. on High Mountain Remote Sensing Cartography. M.F. Buchroithner (ed.), Dresden, Kartographische Bausteine. 2004. V. 23. P. 117–135.

23. *Mikhailova N., Mukambayev A., Aristova I., Kulikova G., Ullah Sh., Pilz M., Bindi D.* Central Asia earthquake catalogue from ancient time to 2009 // Annals of Geophysics, Spesial Iss. 2015. V. 58. № 1. S0102. https://doi.org/10.4401/ag-6681
24. *Nadim F., Kjestad O., Peduzzi P., Herold C., Jaedicke C.* Global landslide and avalanche hotspots // Landslides. 2006. № 3. P. 159–173.
25. *Niyazov R.A., Nurtaev B.* Evaluation of Landslides in Uzbekistan Caused by the Joint Impact of Precipitation and Deep-focus Pamir-Hindu Earthquakes // Landslides: Global Risk Preparedness. Sassa K., Rouhban B., Briceño S., McSaveney M., He B. (eds.), Springer, Berlin, Heidelberg. 2013. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22087-6_17
26. *Papadopulos G.* Magnitude-distance relations for earthquakes-induced landslides in Greece // Engineering Geology. 2000. V. 58. P. 377–386.
27. *Petley D., Dunning S., Rosser N. & Kausar A.B.* Incipient landslides in the Jhelum Valley, Pakistan following the8th October 2005 earthquake // SAARC Workshop on Landslide Risk Management in South Asia. 2006. https://www.semanticscholar.org/paper/Incipient-Landslides-in-the-Jhelum-Valley-%2C-the-8-Petley-Dunning/187c3d94cb5f47e72e6286491a43dd6225833b0a
28. *Shebalin N.V.* Macroseismic data as information on source parameters of large earthquakes // Phys. Earth Planet Inter. 1972. V. 6 (4). P. 316–323. https://doi.org/10.1016/0031-9201(72)90016-7
29. *Strom A.* Usoi landslide and lake Sarez (Case studies) // Encyclopedia of natural hazards, T. Boborowsky (ed.). Springer Science+Business Media Dordrecht, 2013.
30. *Wen B., Wang S., Wang, E., Zhang J.* Characteristics of rapid giant landslides in China // Landslides. 2004. V. 1. P. 247–261.
31. *Yin Y., Wang F., Sun P.* Landslide hazards triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. Landslides. 2009. № 6. P. 139–151.
32. *Zhang D., Wang G.* Study of the 1920 Haiyuan earthquake-induced landslides in loess (China) // Engineering Geology. 2007. V. 94. P. 76–88.

SPECIFIC FEATURES OF EARTHQUAKE-INDUCED GROUND FAILURE IN THE SEISMICALLY ACTIVE ZONES OF CENTRAL ASIA (BY THE EXAMPLE OF UZBEKISTAN)

N. G. Mavlyanova[a,#], R. S. Ibragimov[b,##], T. L. Ibragimova[b], and Kh. Kh. Rakhmatullaev[c,###]

[a] *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13 bld. 2, Moscow, 101000 Russia*
[b] *Mavlyanov Institute of Seismology, Uzbekistan Academy of Sciences, ul. Zul'fiyakhonim, 3, Tashkent, 100128 Uzbekistan*
[c] *Institute of hydrogeology and engineering geology, University of Geological Sciences, Uzbekistan State Committee on Geology and Mineral Resources, ul. Olimlar, 64, Tashkent, 100041 Uzbekistan*
[#] *E-mail: georisk2015@mail.ru*
[##] *E-mail: ibrroma@yandex.com*
[###] *E-mail: khikmat@mail.ru*

Central Asia is one of the most seismically active regions in the world, where historical earthquakes with a magnitude > 8 are known. Earthquake-induced ground failures cause numerous human casualties and significant economic damage to the Central Asian region (CAR). This process is considered to be secondary in respect to ground vibrations caused by earthquakes proper. However, the experience in earthquake study gained in many countries of the world proves that the destructive effect of seismically induced ground failure can exceed manifold the direct damage from seismic impacts. The paper analyzes the principal factors that control the earthquake-triggered ground failure in CAR by the example of Uzbekistan territory. They are the following: seismic-tectonic, morphological and geological-structural factors, as well as strength characteristics of soils, precipitation, groundwater, and anthropogenic impacts. Strong earthquakes in CAR countries (with a magnitude of $M > 5.0$) occur in rather narrow extended zones, stretching along the strike of large deep faults between tectonic blocks in the Earth's crust. The estimated recurrence rate of intense earthquakes in the seismically active zones of Uzbekistan (obtained from the Gutenberg-Richter formula) can serve as an indirect index of the average long-term landslide activity in these zones. The recurrence period of intense earthquakes (magnitude $M > 5.0$) ranges from 2–3 to 25–30 years in Uzbekistan. In addition to local seismic effects caused by the earthquakes that take place directly within these seismically active structures, the landslide activity can be triggered by the strongest (with a magnitude $M > 7.0$) regional distant earthquakes, occurring in CAR countries far away from these structures. Remote seismic events are characterized by low-frequency and long-lasting seismic vibrations; they occur mainly in the Hindu Kush focal zone, in the Pamir, Talas–Fergana, North Tien Shan, and South Tien Shan seismically active zones, as well as in the Kopetdag region. In Central Asia, the specific mechanisms of formation and development of major seismically induced landslides result from the fact that the zones of high seismic activity are often confined to the areas covered by loess soils. Loess is known to be a rather stable ground under natural conditions; however, its load-bearing

capacity falls abruptly on moistening, which favors landslide intensification upon the external impact. The study of formation conditions, development mechanisms and the prediction of landslide intensification by seismic impacts appears to be an important aspect in the assessment of natural geologic risks.

Keywords: *seismic hazard*, *earthquake-induced ground failure*, *Central Asia*, *Uzbekistan*

REFERENCES

1. Bachmanov, D.M., Kozhurin, A.I., Trifonov, V.G. *Baza dannykh aktivnykh razlomov Evrazii* [Database of active faults in Eurasia]. *Geodinamika i tektonofizika,* 2017, vol. 8, no. 4, pp. 711–736. (in Russian)
2. Zerkal, O.V., Kalinin, E.V., Panas'yan L.L. *Vliyanie obvodneniya massiva lessovykh porod na ustoichivost' sklonov* [Influence of moistening loess ground massif on the stability of slopes]. *Geoekologiya,* 1996, no. 4, pp. 87–94. (in Russian)
3. Ibragimov, R.N., Nurmatov, U.O., Ibragimov, O.R. *Seismotektonicheskii metod otsenki seismicheskoi opasnosti i voprosy seismicheskogo raionirovaniya* [Seismotectonic method of seismic hazard assessment and seismic zoning issues]. *Seismicheskoe raionirovanie i prognoz zemletryasenii v Uzbekistane* [Seismic zoning and earthquake forecast in Uzbekistan]. Tashkent, Gidroingeo Publ., 2002, pp. 59–74. (in Russian)
4. Kasimov, S.M., Menglibaev, M., Yunusov, V. *Vliyanie zemletryasenii na opolzni v lessovykh gruntakh* [Influence of earthquakes on landslides in loess soils]. *Uzbekskii geologicheskii zhurnal,* 1982, no. 5, pp. 27–30.(in Russian)
5. *Katalog zemletryasenii Uzbekistana i prilegayushchikh territorii* [Catalogue of earthquakes in Uzbekistan and adjacent territories]. https://rcsm.fvv.uz/ru/catalog_col. (accessed 20.11.2020) (in Russian)
6. Niyazov, R.A. *Opolzni, vyzvannye Pamiro-Gindukushskimi zemletryaseniyami* [Landslides triggered by Pamir - Hindu Kush earthquakes]. Tashkent, Gidroingeo Publ., 2015, 224 p. (in Russian)
7. Mukambaev, A.S., Mikhailova, N.N. *Reshenie problemy neodnorodnosti magnitud v rabotakh po seismicheskomu zondirovaniyu territorii respubliki Kazakhstan* [Solving problem of magnitude heterogeneity in the publications on seismic sounding in the territory of the Republic of Kazakhstan]. *Vestnik NYaTs RK*, 2014, vol. 4, pp. 86–92. (in Russian)
8. Rautian, T.G. *Energiya zemletryasenii* [The Energy of earthquakes]. *Metody detal'nogo izucheniya seismichnosti. Trudy GeoFIAN* [Methods of detail study of seismicity. Proc. GeoFIAN]. Moscow, AN SSSR Publ., 1960, issue 9 (176), pp. 75–114. (in Russian)
9. Solonenko, V.P. *Seismogennye deformatsii i paleoseismogeologicheskii metod* [Seismogenic deformations and paleoseismogeological method]. *Seismichnost' i seismogeologiya Vostochnoi Sibiri* [Seismicity and seismic geology of Eastern Siberia]. Moscow, Nauka Publ., 1977, pp. 83–131. (in Russian)
10. Suvorov, A.I. *Zakonomernosti stroeniya i formirovaniya glubinnykh razlomov* [Regularities of the structure and formation of deep faults]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 316 p. (in Russian)
11. Ulomov, V.I. *Dinamika zemnoi kory Srednei Azii i prognoz zemletryasenii* [Dynamics of the Earth's crust in Central Asia and earthquake forecast]. Tashkent, Fan Publ., 1974, 216 p. (in Russian)
12. Shebalin, N.V. *Metody ispol'zovaniya inzhenerno-seismologicheskikh dannykh pri seismicheskom raionirovanii* [Methods of using engineering seismological data in seismic zoning]. *Seismicheskoe raionirovanie SSSR*. Moscow, Nauka Publ., 1968, pp. 95–111. (in Russian)
13. Artikov, T.U., Ibragimov, R.S., Ibragimova, T.L., Mirzaev, M.A. Models of the macroseismic field earthquakes and their influence on seismic hazard assessment values for Central Asia. *Geodynamics & Tectonophysics.* 2020, no. 11(3), pp. 606–623. https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0494
14. Artikov, T.U., Ibragimov, R.S, Ibragimova, T.L, Mirzaev, M.A., Artikov, M.T. Revealing of seismic activation interrelationships in various seismoactive zones. *Geodesy and Geodynamics,* 2015, no. 5(6), pp. 351–360. https://doi.org/10.1016/j.geog.2015.03.007
15. Artikov, T.U., Ibragimov, R.S., Ibragimova, T.L., Mirzaev, M.A. Identification of expected seismic activity areas by forecasting complex seismic-mode parameters in Uzbekistan. *Geodesy and Geodynamics*, 2018, no. 9(2), pp. 121–130. https://doi.org/10.1016/j.geog.2017.11.005
16. Artikov, T.U., Ibragimov, R.S., Ibragimova, T.L, Mirzaev, M.A. Complex of general seismic zoning maps OSR-2017 of Uzbekistan. *Geodesy and Geodynamics*, 2020, no. 11(4), pp. 273–294. https://doi.org/10.1016/j.jeog.2020.03.004
17. Evans, S.G., Roberts, N.J., Ischuk, A., Delaney, K.B., Morozova, G.S., Tutubalina, O. Landslides triggered by the 1949 Khait earthquake, Tajikistan, and associated loss of life. *Engineering Geology,* 2009, vol. 109, is. 3–4, pp. 195–212. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.08.007
18. GeoNet, Geological hazard information for New Zealand (Available at: https://www.geonet.org.nz) (accessed 24.10.2020)
19. Havenith, H.B.; Bourdeau, C. Earthquake-induced hazards in mountain regions: a review of case histories from Central Asia. *Geologica Belgica*. 2010, no. 13, pp. 135–150.
20. Keefer, D.K. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, 1984, no. 95, pp. 406–421.
21. Keefer, D.K. Earthquake-induced landslides and their effects on alluvial fans. *Journal of Sedimentary Research,* 1999, no. 69, pp. 84–104.
22. Korjenkov, A.M., Mamyrov, E., Omurlaev, M., Kovalenko, V.A., Usmanov, S.F. Rock avalanches and landslides formed in result of strong Suusamyr (1992, M = 7.4) earthquake in the Northern Tien Shan. Test structures for mapping of Paleoseismic deformations by sat-

ellite images. *Proc. of the 7th Int. Symp. on High Mountain Remote Sensing Cartography.* M.F. Buchroithner, Ed., Dresden, Kartographische Bausteine, 2004, vol. 23, pp. 117–135.

23. Mikhailova, N., Mukambayev, A., Aristova, I., Kulikova, G., Ullah, Sh., Pilz, M., Bindi, D. Central Asia earthquake catalogue from ancient time to 2009. *Annals of Geophysics*, Special issue, 2015, vol. 58, no. 1, S0102. https://doi.org/10.4401/ag-6681
24. Nadim, F., Kjestad, O., Peduzzi, P., Herold, C., Jaedicke, C. Global landslide and avalanche hotspots. *Landslides,* 2006, no. 3, pp. 159–173.
25. Niyazov, R.A., Nurtaev, B. Evaluation of landslides in Uzbekistan caused by the joint impact of precipitation and deep-focus Pamir-Hindu Earthquakes. In: Landslides: Global risk preparedness. Sassa K., Rouhban B., Briceño S., McSaveney M., He B., Eds., Springer, Berlin, Heidelberg. 2013. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22087-6_17
26. Papadopulos, G. Magnitude-distance relations for earthquakes-induced landslides in Greece. *Engineering Geology*, 2000, vol. 58, pp. 377–386.
27. Petley, D., Dunning, S., Rosser, N., Kausar, A.B. Incipient landslides in the Jhelum Valley, Pakistan following the 8th October 2005 earthquake. SAARC Workshop on Landslide Risk Management in South Asia. 2006. https://www.semanticscholar.org/paper/Incipient-Landslides-in-the-Jhelum-Valley-%2C-the-8-Petley-Dunning/187c3d94cb5f47e72e6286491a43dd6225833b0a
28. Shebalin, N.V. Macroseismic data as information on source parameters of large earthquakes. *Phys. Earth Planet Inter.*, 1972, 6 (4), pp. 316–323. https://doi.org/10.1016/0031-9201(72)90016-7
29. Strom, A. Usoi landslide and lake Sarez (Case studies). In: Encyclopedia of natural hazards, T. Boborowsky, Ed. Springer Science + Business Media Dordrecht, 2013.
30. Wen, B., Wang, S., Wang, E., Zhang J. Characteristics of rapid giant landslides in China. *Landslides*, 2004, vol. 1, pp. 247–261.
31. Yin Y., Wang F., Sun P. Landslide hazards triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. *Landslides,* 2009, no. 6, pp. 139–151.
32. Zhang, D., Wang, G. Study of the 1920 Haiyuan earthquake-induced landslides in loess (China). *Engineering Geology,* 2007, vol. 94, pp. 76–88.

ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2021, № 2, с. 41–48

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.3;624.13

ДИССИПАТИВНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОБРАЗОВАНИЯ И МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ

© 2021 г. Г. П. Постоев*

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН), Уланский пер., д. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

**E-mail: opolzen@geoenv.ru*

Поступила в редакцию 25.12.2020 г.
После доработки 19.01.2021 г.
Принята к публикации 19.01.2021 г.

Под подошвой фундамента любого инженерного сооружения в локальной зоне грунтового основания образуются диссипативные геологические структуры (ДГС), параметры которых согласуются с шириной фундамента. Возникающие ДГС взаимодействуют с фундаментом, воспринимая и передавая давление от него на граничные оболочки, с учетом исходного распорного давления в точках массива и в соответствии с законом Кулона–Мора. В оболочках концентрируются главные напряжения ДГС, определяя процесс допредельного деформирования грунтового основания и подготовки предельного состояния. Получены уравнения предельного состояния грунтового основания для ленточного и круглого фундаментов. Определены критические значения давления и осадки фундамента.

Ключевые слова: *ленточный фундамент*, *круглый фундамент*, *уравнения предельного состояния*, *критические давление и деформация*, *грунтовое основание*, *диссипативные геологические структуры*

DOI: 10.31857/S0869780921020077

ВВЕДЕНИЕ

Существующие расчеты несущей способности грунтового основания под фундаментами базируются на использовании аппарата теории упругости, линейной зависимости между напряжениями и деформациями и закономерностях уплотнения грунта под нагрузкой. Вместе с тем известно, что под подошвой фундамента возникает ядро так называемого уплотненного грунта, а при нарушении устойчивости фундамента образуются в грунтовом основании зоны выпора. Однако нередко считается, что упомянутые структуры формируются только при предельных нагрузках на грунтовое основание, когда исчерпывается его несущая способность. Опыт изучения закономерностей развития оползневого процесса и подготовки разрушительных деформаций грунтовых массивов показывает, что в геологической среде, как и в других средах (воздушной и водной), действуют общие законы трансформации исходного напряженно-деформированного состояния (НДС) при внешнем локальном воздействии [7].

В данной статье рассматривается новый подход к анализу состояния грунтового основания и расчетам предельных нагрузок на фундамент с учетом формирования в грунтах специфических геологических структур, определяющих его несущую способность.

Исходные положения. Новые структуры, возникающие в геологической среде, называются диссипативными. Их образование соответствует теории диссипативных структур, разработанной И.Р. Пригожиным применительно к процессам, изучаемым в физике и химии [8], функционирование которых связано с диссипацией энергии силового воздействия в локальной зоне. Новые диссипативные структуры называются геологическими (ДГС), хотя их проявление и может быть обусловлено техногенным воздействием. Почему? Потому что это новые геологические образования. Исходное напряженно-деформированное состояние геологической среды (с распределением давления в точках) преобразуется в НДС замкнутого крупного объема – ДГС. Проявление и развитие ДГС происходит во взаимодействии сооружения с геологической средой и приводит к деформациям и разрушению грунтов посредством смещения крупных блоков, изменению строения массива и рельефа поверхности. В работах [5, 6] показано, что при локальном силовом воздействии на массив в нем происходят преобразования с формированием новых структур в виде возникновении ограниченной зоны разгрузки напряжений и развития пластических деформаций (оползневых, карстовых). Эти структуры в итоге регламентируют развитие геологических процессов, разрушительные смещения в виде

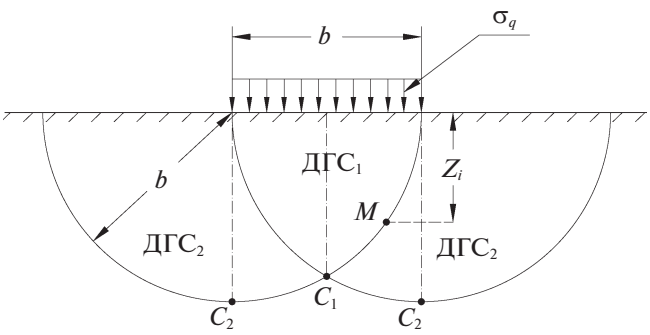


Рис. 1. Схема расположения диссипативных структур в грунтовом основании под нагрузкой от ленточного фундамента шириной b. σ_q – давление на грунтовое основание под подошвой фундамента; ДГС$_1$ и ДГС$_2$ – диссипативные геологические структуры в грунтовом основании.

оползневых блоков, провалов земной поверхности. Фундамент сооружения также оказывает локальное силовое воздействие на геологическую среду. В грунтовом основании возникают структуры, которые известны в механике грунтов как зоны выпора. Они свидетельствуют о геологических преобразованиях в грунтовом основании, имеющих прямое отношение к расчетным оценкам его несущей способности в соответствии с параметрами фундамента.

ЛЕНТОЧНЫЙ ФУНДАМЕНТ. ПЛОСКОЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ

Характеристика напряженно-деформированного состояния грунтового основания ленточного фундамента

В грунтовом массиве под ленточным фундаментом происходит преобразование исходного НДС с возникновением двух одинаковых диссипативных геологических структур (ДГС$_2$), симметричных относительно оси, каждая в виде полуокружности (на разрезе) радиусом b, равным ширине фундамента. Диаметры полуокружностей находятся на уровне подошвы фундамента, а центры – в краевых точках подошвы фундамента (рис. 1).

Основной параметр, определяющий размеры диссипативных структур, – ширина b ленточного фундамента. Данный параметр локализует зону силового воздействия на массив, от которой происходит диссипация энергии влияния фундамента на грунтовое основание в виде образования и распространения диссипативных геологических структур.

При этом в центральной части грунтового основания под фундаментом, в зоне пересечения указанных диссипативных геологических структур, образуется ядро (ДГС$_1$) в виде клина, в котором боковые образующие – дуги окружности радиусом, равным b. Соответственно нижняя точка ядра является вершиной равностороннего треугольника со стороной b, а осевая часть имеет значение $b\sin 60° = 0.866b$.

Таким образом, осуществляется самоорганизация грунтового массива с проявлением защитных функций (по сохранению исходного НДС и ограничению его изменений в локальной зоне воздействия). Нагрузка от фундамента воспринимается новыми крупными структурными элементами грунтового массива, в которых происходит концентрация главных напряжений по граничным поверхностям (оболочкам) указанных структур, рост их значений по мере увеличения давления на грунтовое основание до предельных нагрузок, с последующим проявлением защитной функции геологической среды – развитием локальных разрушительных деформаций в виде смещений блоков образовавшихся геологических структур (проседания ДГС$_1$ и выпора ДГС$_2$).

Исходное состояние грунтового массива до приложения нагрузки от фундамента организуется по схеме компрессионного сжатия с формированием НДС по закону Кулона–Мора в главных напряжениях. То есть в каждой точке массива действующие напряжения и прочность грунта связаны зависимостью:

$$\frac{\sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_{str}} = \mathrm{tg}^2(45 - \varphi/2), \qquad (1)$$

где σ_1 и σ_3 – главные напряжения, наибольшее (вертикальное) и наименьшее (распорное давление) соответственно; φ – угол внутреннего трения грунта.

От давления в точке (элементарном объеме грунта):

$$\sigma_{1i} = \gamma Z_i,$$

где γ – среднее значение удельного веса грунтов основания; Z_i – глубина рассматриваемой точки в массиве; $\sigma_{str,i}$ – структурная прочность грунта в данной i-й точке (предельное давление при испытании образца грунта на одноосное сжатие), аналитически $\sigma_{str} = 2c\mathrm{tg}(45 + \varphi/2)$, где c – сцепление грунта); на глубине Z_i возникает распорное давление p, в соответствии с (1), т.е. и промежуточное напряжение σ_2 в точке массива равно p:

$$p = \sigma_3 = \sigma_2 = (\sigma_1 - \sigma_{str})\mathrm{tg}^2(45 - \varphi/2). \qquad (2)$$

Подобные ДГС ранее были выявлены при образовании протяженного оползневого блока [5]. Для таких локально не замкнутых объектов (оползневой блок, ленточный фундамент) характерно, что объем образуемой диссипативной новой геологической структуры формируется радиусом по значению основного параметра, опре-

деляющего зону внешнего воздействия. У оползневого блока основной параметр – глубина до базиса оползания (и одновременно **ширина блока на плато**, где создается наибольшая нагрузка на горизонт базиса оползания), у ленточного фундамента – **ширина фундамента**, определяющая глубину захвата геологической среды (вниз и в стороны) внешним воздействием – давлением фундамента в границах его ширины.

Вывод уравнения предельного состояния грунтового основания (для ленточного фундамента)

Модель 1. В ядре ДГС$_1$ под фундаментом формируется распорное давление p_{1i} под воздействием техногенной нагрузки (σ_q) и веса грунта с учетом прочности грунта в данном структурном элементе ($\gamma Z_i - \sigma_{stri}$):

$$p_{1i} = (\gamma Z_i - \sigma_{stri} + \sigma_q)\mathrm{tg}^2(45 - \varphi_i/2), \qquad (3)$$

где Z_i – глубина от подошвы фундамента до i-го горизонта в ядре.

Распорные давления от точек каждого горизонта создают в оболочке ДГС результирующие усилия и соответственно главные напряжения на глубине Z_i, значительно превышающие значение p_{1i} в i-й точке. Для определения напряжений в оболочке ДГС$_1$ можно использовать технологию расчета тонкостенных осесимметричных оболочек с применением уравнения Лапласа [4, 5]:

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_t}{\rho_t} = \frac{p}{h}, \qquad (4)$$

где σ_m и σ_t – соответственно меридиональное (по длине ДГС) и широтное (по окружности вертикального сечения, перпендикулярного к оси) нормальные напряжения в оболочке; ρ_m и ρ_t – соответственно меридиональный и широтный радиусы кривизны; p – внутреннее распорное давление на оболочку; h – толщина оболочки ДГС.

Круговое (широтное) напряжение в оболочке ядра по данному разделу, как фрагмента диссипативных геологических структур, на i-ом горизонте составит, при $\rho_m = \infty$ и соответственно $\sigma_{mi}/\rho_m = 0$ [5]:

$$\sigma_{ti} = bp_i/h = b(\gamma Z_i - \sigma_{str,i} + \sigma_q)m/h, \qquad (5)$$

где $m = \mathrm{tg}^2(45 - \varphi_i/2)$.

То есть напряжения в оболочке в b раз выше, чем распорное давление в произвольной точке рассматриваемого горизонта. Соответственно в нижней точке C_1 ядра, где концентрируются наибольшие значения напряжений в оболочке, получим, учитывая, что радиус изгиба диссипативной структуры по длине линейного фундамента равен бесконечности и $Z_{C1} = 0.866b$:

$$\sigma_{t,C1} = b\,(0.866\gamma b - \sigma_{strC1} + \sigma_q)m/h. \qquad (6)$$

Взаимодействие диссипативных геологических структур в процессе изменения НДС от давления фундамента происходит следующим образом. **Ядро оказывает активное давление на грунтовый массив, создавая в оболочке диссипативной геологической структуры ДГС$_1$ напряжение σ_{tC1},** вызывая сжатие оболочки и соответствующие напряжения, воспринимающие на каждом горизонте давление распора.

Грунты ДГС$_1$ оседают массивом, вызывая рост напряжений в оболочке, в том числе по граничным поверхностям ДГС$_2$. При этом принимается, что в ДГС$_2$, которая в итоге может прийти в движение в виде блокового выпора, действует внутреннее давление q с обратным знаком, компенсирующее вес грунтовых масс в объеме структуры. Данное внутреннее давление, которое трансформируется во внешнее, становится наибольшим главным напряжением по Кулону–Мору, в соответствии с (1), создавая в оболочке главные меридиональное (по длине фундамента) и широтное (по его ширине) напряжения, взаимодействующие с давлением ядра ДГС$_1$. То есть давление на оболочку боковой диссипативной структуры ДГС$_2$ определяется в соответствии с (1), как давление $p_2 = -q$:

$$p_{2i} = -(\gamma Z_i/m + \sigma_{stri}), \qquad (7)$$

где по Кулону–Мору (1) наибольшее напряжение $p_2 = -\sigma_1$ и наименьшее напряжение $\sigma_3 = \gamma Z_i$; Z_i – глубина в ДГС$_2$ до i-го сечения оболочки, $Z_i = b\cos\alpha_i$; α_i – угол отклонения от вертикали на i-е сечение оболочки.

Также по формуле (4) при $\sigma_{mi}/\rho_m = 0$ получаем, что $\sigma_{t2i} = bp_{2i}/h$.

Наибольшее значение широтного напряжения в оболочке получается в нижней точке C_2, где $Z_{C2} = b$:

$$\sigma_{tC2} = bp_2/h = b(\gamma b/m + \sigma_{strC2})/h. \qquad (8)$$

Уравнение предельного состояния грунтового основания устанавливается по равенству напряжений из выражений (6) и (8), в итоге принимает вид:

$$(\gamma b/m + \sigma_{strC2})/m = 0.866\gamma b - \sigma_{strC2} + \sigma_{q,cr}. \qquad (9)$$

Отсюда получено уравнение для определения предельного давления под подошвой ленточного фундамента:

$$\sigma_{q,cr} = \gamma b(1/m^2 - 0.866) + \sigma_{str}(1/m + 1). \qquad (10)$$

То есть, если давление по (7) считать внутренним, то под предельным давлением под подошвой ленточного фундамента понимается давление, которое необходимо преодолеть, чтобы сдвинуть и вытолкнуть вверх ДГС$_2$.

Модель 2. Внутри ДГС$_2$ давление p_2 отсутствует. Максимальное значение напряжения в оболочке в вертикальной плоскости получается в нижней точке C_2 и определяется только от веса $Q_ж$ вертикального сечения, нормального к оси фундамента, в виде полукруга в ДГС$_2$. Вес сечения ДГС$_2$ (в виде полукруга) шириной, равной единице, определится по формуле:

$$Q_{жC2} = \gamma S_2 1 = \gamma\pi b^2/2, \quad (11)$$

где S_2 – площадь сечения ДГС$_2$ в вертикальной плоскости.

Принимаем, что вес $Q_{жC2}$ сосредоточен в оболочке-арке единичного сечения толщиной, равной единице. Значение широтного (кругового) напряжения по внутреннему контакту оболочки единичной арки ДГС$_2$ в точке C_2 определяется с учетом равновесия зоны для упомянутой точки [4], принимая, что внутреннее давление $p_2 = 0$:

$$\sigma_{1C2} = \gamma\pi b^2/4h. \quad (12)$$

Согласно уравнению (4) Лапласа, напряжению σ_{1tC2} (по схеме активного предельного равновесия) соответствует в точке C_2 внешнее давление q_{C2a}:

$$q_{C2a} = h\sigma_{tC2}/b = \gamma\pi b/4, \quad (13)$$

где q_{C2a} – внешнее давление на оболочку в точке C_2, учитывающее вес ДГС$_2$ с образованием в оболочке главного напряжения σ_{tC2}.

В уравнении (13) напряжения в оболочке σ_{tC2} – наибольшие, а q_{C2a} – наименьшие, в соответствии с зависимостью (1) Кулона-Мора (индекс a определяет **активное предельное равновесие**). Давление ядра в предельном состоянии должно вызвать такое внешнее давление q_{cr} на оболочку ДГС$_2$, чтобы оно стало наибольшим напряжением (по Кулону–Мору, соответствуя σ_1), определяя функцию **пассивного отпора**, как в уравнении (8).

$$q_{cr} = q_{C2a}/m + \sigma_{strC2} = \gamma\pi b/4m + \sigma_{strC2}. \quad (14)$$

Отсюда также по уравнению (4) Лапласа определяется значение напряжения в оболочке толщиной h от давления q_{cr}, при $\sigma_{mC2}/\rho_m = 0$:

$$\sigma_{tC2} = bq_{cr}/h = b(\gamma\pi b/4m + \sigma_{strC2})/h. \quad (15)$$

Из равенства напряжений σ_{tC1} и σ_{tC2} по (6) и (15) находим:

$$\sigma_{q,cr} = \gamma b(\pi/4m^2 - 0.866) + \sigma_{strC2}(1/m + 1). \quad (16)$$

Разница в расчетном уравнении (16) по сравнению с (10) только в коэффициенте перед множителем $1/m^2$. Численно эта разница в множителе составляет 0.2146, т.е. около 20%, но в результирующем значении $\sigma_{q,cr}$, с учетом того, что остальные численные значения совпадают, это различие не превысит 10%.

Модель 3 (с допущением внешнего давления в ДГС$_2$). Принимаем, что в ДГС$_2$ внутреннее давление отсутствует, т.е. $p_2 = -q_a$ (индекс a указывает на состояние активного предельного равновесия). В соответствии с этим главные напряжения представлены внешним давлением q_a (соответствующим σ_3 в уравнении 1) и двумя напряжениями в оболочке ДГС$_2$. При этом, как и в условии модели 2, полагается, что вес грунтовой массы в ДГС$_2$ концентрируется в виртуальной оболочке (арка – полукруг единичного сечения), определяя в ней сжимающие напряжения. Рассмотрим в ДГС$_2$ горизонт точки M (см. рис. 1). В оболочке напряжения сжатия создаются от веса грунтовых масс, залегающих выше указанного горизонта. Виртуальное давление q_a на оболочку в точке M от веса вышележащих грунтовых масс определяется интегрированием при изменении центрального угла α от $\alpha_i = 0$ до $\alpha_i = \alpha_M$ (на точку M):

$$q_{aM} = \int \gamma Z_i \sin\alpha b\alpha d\alpha, \quad (17)$$

где α_i – центральный угол отклонения от горизонтали радиуса на точку M в оболочке в i-м сечении.

Максимальное напряжение в оболочке создается в точке C_2. И круговое напряжение в оболочке σ_{tC2} как и в выражении (13), с учетом, что $\alpha_{C2} = \pi/2$, $Z_i = b$:

$$\sigma_{tC2} = q_{aC2}/2h = \gamma\pi b^2/4h. \quad (18)$$

Далее, как и в модели 2, учитывая уравнение Лапласа и закон Кулона–Мора с переходом на пассивное предельное равновесие, при определении внешнего давления q_{cr} (как в уравнении (14)) на оболочку ДГС$_2$, получаем те же формулы для определения широтного напряжения в оболочке (15) и предельного давления под подошвой ленточного фундамента (16). То есть по моделям 2 и 3 результирующие уравнения совпадают.

Сравнительные расчеты. Принимаем исходные данные: $b = 2$ м; $\gamma = 20$ кН/м^3; $\varphi = 12°$; $c = 36$ кПа. По этим данным $\sigma_{str} = 88.9$ кПа; $m = \mathrm{tg}^2(45 - \varphi/2) = 0.656$.

По формуле (10) получаем:

$$\sigma_{q1,cr} = \gamma b(1/m^2 - 0.866) + \sigma_{str}(1/m + 1) = 282 \text{ кПа}.$$

По формуле (16) значение предельного давления составит:

$$\sigma_{q2,cr} = \gamma b(\pi/4m^2 - 0.866) + \sigma_{str}(1/m + 1) = 262.1 \text{ кПа}.$$

Таким образом, разница в результатах расчетов составляет 7%.

Если ширина фундамента в 2 раза больше (b = = 4 м), то разница в значениях $\sigma_{q,cr}$ (при тех же остальных значениях) возрастет до 11%. То есть при бóльших размерах ширины ленточных фундаментов возрастает вес первого слагаемого в уравнении расчета предельного давления.

КРУГЛЫЙ ФУНДАМЕНТ. ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССИПАТИВНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР В ГРУНТОВОМ ОСНОВАНИИ

Для ленточного фундамента решается плоская задача его устойчивости. Но при этом необходимо отметить, что для грунтового массива – это случай локального силового воздействия на краевую его часть, как и при подготовке оползневого блока на границе со склоном. И поэтому ширина фундамента является основным параметром ДГС.

Круглый фундамент вызывает локальное силовое воздействие на геологическую среду как на полупространство, определяя круговую границу ДГС, по сходству с ДГС при образовании провала над подземной полостью, с основным параметром ДГС в виде радиуса фундамента, т.е. половины его ширины [6]. Это положение подтверждается также результатами исследований ядра под круглым штампом [3], а также оснований и фундаментов резервуаров, в том числе в аварийных ситуациях [2]. Также, как и при воздействии ленточного фундамента в грунтовом основании образуется центральная $ДГС_1$. В вертикальном сечении, проходящем через ось круглого фундамента, – это полукруг радиусом $0.5b$ с центром в точке пересечения оси и подошвы и две боковые $ДГС_2$ также радиусом $0.5b$ с центрами в краевых точках подошвы (рис. 2). У квадратного фундамента основным параметром является 0.5 стороны b квадрата. В плане, на уровне подошвы фундамента, граница основных диссипативных геологических структур, образуемых в грунтовом основании под нагрузкой от круглого фундамента, выглядит как окружность радиусом $1.0b$ (с центром на вертикальной оси).

Предельное давление для круглого фундамента (штампа)

Как указано выше, в данном случае рассматривается пространственная задача. Радиус кривизны оболочки в ядре ($ДГС_1$) $\rho_{m1} = \rho_{t1} = 0.5b = r$ (где r – радиус горизонтального сечения фундамента). Для $ДГС_1$ и круговой, и меридианный значения радиусов равны $b/2$. $ДГС_1$ – ядро в виде полукруга радиусом $b/2$ с центром в срединной точке подошвы фундамента (см. рис. 2). Соответственно уравнение Лапласа (4), с учетом того, что

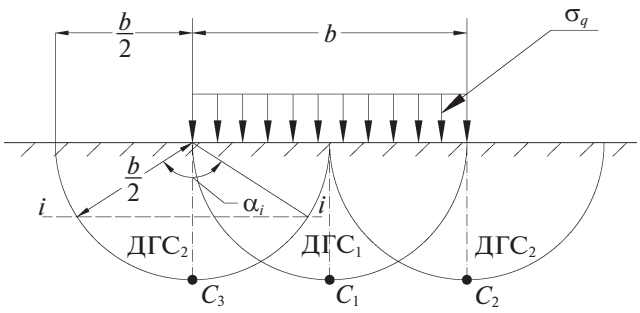


Рис. 2. Схема расположения диссипативных структур в грунтовом основании под нагрузкой от круглого фундамента диаметром b. σ_q – давление на грунтовое основание под подошвой фундамента; $ДГС_1$ и $ДГС_2$ – диссипативные геологические структуры в грунтовом основании.

в горизонтальном сечении радиус кривизны для $ДГС_2$ $\rho_{m2} = b$:

$$2\sigma_{m1}/b + 2\sigma_{t1}/b = p_{ДГС1}/h. \quad (19)$$

Для $ДГС_2$:

$$\sigma_{m2}/b + 2\sigma_{t2}/b = p_{ДГС2}/h. \quad (20)$$

Здесь в вертикальном единичном сечении $ДГС_2$ также представлена полукругом с центром в краевой точке подошвы фундамента. Требуется определить значение кругового (в вертикальной плоскости) напряжения в нижних точках $ДГС_1$ и $ДГС_2$. $ДГС_1$ представляет собой полусферу радиусом $b/2 = r$. Для i-го горизонтального сечения вес сегмента ниже сечения составит $Q_{ж,i} = \gamma p_{1i} S_i$, где p_{1i} – давление на оболочку между i-м сечением (i-ми точками) и нижней точкой C_1, а S_i – площадь оболочки ниже i-й точки $ДГС_1$, $S_i = 0.5b\alpha_i \cdot 1$ (α_i – центральный угол на дугу между точками i). При определении максимального напряжения в оболочке $ДГС_1$ в точке C_1 получаем, что $r_1 = 0.5b$, $\alpha_{C1} = 0$, $Q_{ж,C1} = 0$ и $p_{ДГС1} = (\gamma Z_{C1} - \sigma_{str} + \sigma_q)m$, следовательно при $Z_{C1} = b/2$:

$$\sigma_{tC1} = 0.5bp_{ДГС1}/2h = b(0.5\gamma b - \sigma_{str} + \sigma_q)m/4h. \quad (21)$$

В $ДГС_2$ для определения напряжения в оболочке при рассмотрении вертикального ее сечения необходимо включать в анализ вес грунтовых масс $Q_ж$ выше рассматриваемой i-й точки (создает сжатие в оболочке ниже) и возможно внутреннее давление, если $p_2 \neq 0$.

Принимаем, что в $ДГС_2$ грунт отсутствует, на оболочку действует давление q (внешнее) на подъем $ДГС_2$, учитывающее вес грунта в $ДГС_2$ в наименьшем главном напряжении по Кулону–Мору (пассивное предельное равновесие), в соот-

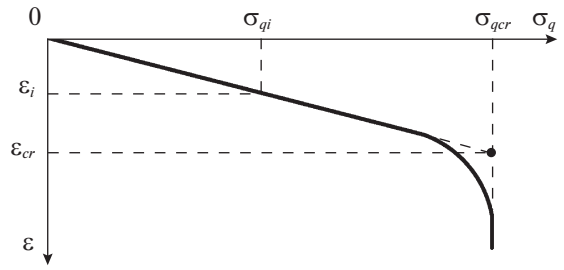


Рис. 3. Характерный график зависимости относительной осадки ε от давления σ_q под подошвой фундамента. ε_{cr} и $\sigma_{q,cr}$ – критические значения (в предельном состоянии), соответственно, осадки и давления; ε_i и σ_i – промежуточные значения осадки и давления.

ветствии с уравнением равновесия зоны по теории расчета напряжений в тонкостенных оболочках, получаем, что на уровне подошвы фундамента радиус кривизны оболочки ДГС$_2$ (в горизонтальном сечении) относительно оси фундамента составляет $\rho_{m2} = r_2 = b$, а радиус кривизны оболочки ДГС$_2$ в вертикальном сечении, $\rho_{t2} = 0.5b$:

$$q_{\text{ДГС2}} = (0.5\gamma b/m + \sigma_{str}). \quad (22)$$

В соответствии с уравнением равновесия зоны для расчета напряжений в осесимметричной оболочке, при $Q_ж = 0$, $r_2 = b$, и учитывая, что рассматриваются в сечении две ДГС и точки C_2, получаем:

$$\sigma_{tC2} = q_{\text{ДГС2}} r_2/2 \cdot 2h = b(0.5\gamma b/m + \sigma_{str})/4h. \quad (23)$$

Соответственно для круглого (квадратного) фундамента (штампа) предельное давление также определяется по равенству выражений, характеризующих максимальные значения главных напряжений широтных (в вертикальном сечении) в диссипативных структурах грунтового основания ДГС$_2$ (зоны выпора) и ДГС$_1$ (ядро под подошвой фундамента).

Из равенства напряжений σ_{tC1} и σ_{tC2} по (21) и (23) находим:

$$b(0.5\gamma b/m + \sigma_{str})/4h = b(0.5\gamma b - \sigma_{str} + \sigma_q)m/4h, \quad (24)$$

$$\sigma_{q,cr} = 0.5\gamma b(1/m^2 - 1) + \sigma_{str}(1/m + 1). \quad (25)$$

Здесь параметры прочности грунтов m, φ, c и σ_{str} – для глубины $Z = 0.5b$, а γ – среднее значение удельного веса грунтов основания до глубины $Z = 0.5b$. ДГС основания, с радиусом кривизны их граничных поверхностей $0.5b$, в значительной мере определяют и седлообразное очертание эпюры осадок круглого фундамента [2].

Допредельные деформации основания, критические и промежуточные значения

По мере роста давления на грунтовое основание происходят допредельные деформации по образуемым граничным поверхностям геологических структурных элементов. К моменту достижения предельного состояния массива в локальной зоне относительное значение критической деформации ε_{cr}, предшествующей началу разрушительных смещений ДГС, например, при анализе подготовки смещений новых оползневых блоков, составляет около 0.09 [1]. Есть определенная связь ε_{cr} с отношением толщины оболочки h к основному параметру ДГС – радиусу ее кругового сечения. Толщина h определяется по наиболее опасному сечению, т.е. в нижней точке ДГС. Получается, что при определении напряжений в оболочке для остальных сечений ДГС отношение h/b = const (для ленточного фундамента) или $2h/b$ = const – для круглого фундамента (штампа).

Результаты теоретических и натурных исследований, анализ масштабного эффекта, показывают, что указанные отношения равны 10^{-2}. С повышением размеров ДГС (т.е. в данном случае b) увеличивается и толщина оболочки h. В соответствии с уравнением предельного состояния ДГС наибольшее значение в изменении НДС имеют прочность грунтов в нижних точках ДГС (точки C). Допредельное деформирование ДГС может иметь место пока $\varepsilon_i < \varepsilon_{cr} = h/b$. А промежуточные значения осадки будут соответствовать значениям $\sigma_{q,i} < \sigma_{q,cr}$ (рис. 3) при линейной зависимости между осадками и давлением до $\varepsilon_i \approx 0.008$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Грунтовое основание является частью геологической среды, и при его взаимодействии с фундаментом проявляются геологические закономерности изменения исходного напряженно-деформированного состояния грунтового массива, его преобразования от локального силового воздействия, как и при возникновении оползневых блоков или провалов над подземными полостями. Для ленточных фундаментов (решение плоской задачи в оценке предельного состояния близко к оползневой проблеме) основным параметром образуемых ДГС является его ширина b. Для круглых фундаментов основным параметром соответствующих ДГС является радиус $0.5b$ фундамента, т.е. половина его ширины (диаметра). Согласно полученным уравнениям, например, для грунтового основания, представленного песчаными грунтами с нулевыми значениями сцепления и структурной прочности, но одинаковыми величинами γ и φ, предельное давление для ленточного фундамента шириной b почти в 2 раза выше, чем для круглого диаметром b. Ядро под

фундаментом также имеет разные очертания: у ленточного в виде клина, а у круглого – полукруг. Но габариты основных ДГС (зон выпора) в вертикальном сечении одинаковые – 2*b*. Размеры ДГС и критическое значение относительной осадки фундамента зависят только от его ширины.

Механизм взаимодействия ДГС и фундамента заключается в следующем. ДГС возникают уже на начальном этапе нагружения фундамента (штампа). С ростом давления σ_q начинаются осадки фундамента с проявлением деформаций по границам центральной ДГС – ядра, в основном в верхней его части у подошвы фундамента. Ядро является составной частью и боковых ДГС, поэтому происходит также рост внешнего давления на их границы, которое при $\sigma_{q,cr}$ становится предельным, а осадка достигает критического значения ε_{cr}, накануне потери несущей способности грунтового основания.

ВЫВОДЫ

При оценке несущей способности грунтового основания необходимо учитывать геологический фактор, который проявляется в образовании под подошвой фундамента диссипативных геологических структур (ДГС).

В грунтовом основании под ленточным фундаментом ДГС по форме подобны тем, которые образуются при подготовке оползневых блоков.

Под круглыми фундаментами формирование ДГС сходно с условиями проявления внешнего воздействия на массив в виде подземной полости.

В уравнении предельного состояния грунтового основания, которое базируется на закономерностях взаимодействия фундамента и ДГС известные исходные данные включают:

– ширину фундамента,

– среднее значение удельного веса грунтов основания,

– значение угла внутреннего трения,

– значение сцепления и структурной прочности грунтов на глубинах нижних точек ДГС.

Из уравнения находится расчетное предельное значение давления фундамента на грунтовое основание, которому соответствует критическое значение относительной осадки фундамента, $\varepsilon_{cr} = 10^{-2}$. Промежуточные значения осадки могут быть определены по линейной зависимости между осадками и давлением до $\varepsilon_i \approx 0.008$.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания и плана НИР по теме № г.р. АААА–А19–119021190077–6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Демин А.М.* Оползни в карьерах: анализ и прогноз. М.: ГЕОС, 2009. 79 с.
2. *Иванов Ю.К., Коновалов П.А., Мангушев Р.А., Сотников С.Н.* Основания и фундаменты резервуаров. М.: Стройиздат, 1989. 223 с.
3. *Ольховатенко В.Е., Тимофеев С.С.* Нелинейная модель грунтового основания // Инженерная геология. 1992. № 6. С. 96–106.
4. *Писаренко Г.С., Агарев В.А., Квитка А.Л., Попков В.Г., Уманский Э.С.* Сопротивление материалов. Изд. третье. Киев: Вища школа, 1973. 672 с.
5. *Постоев Г.П.* Диссипативные структуры в грунтовом массиве на примере формирования глубоких оползней // Инженерная геология. 2018. Т. XIII. № 3. С. 54–61.
6. *Постоев Г.П.* Модели механизма формирования и расчета провалов земной поверхности над подземными полостями // Геоэкология. 2020. № 4. С. 36–47. https://doi.org/10.31857/S0869780920040086
7. *Постоев Г.П., Казеев А.И., Кучуков М.М.* Физические законы распределения давления в геологической среде // Геоэкология. 2020. № 6. С. 22–31. https://doi.org/10.31857/S0869780920060107
8. *Prigogine I., Nicolis G.* Self-Organization in Non-Equilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations. New York: J. Wiley & Sons, 1977.

DISSIPATIVE GEOLOGICAL FORMATIONS AND MODELS FOR ASSESSING THE LIMIT STATE OF GROUND BASES

G. P. Postoev[#]

Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia

[#]*E-mail: opolzen@geoenv.ru*

Dissipative geological structures (DGS) are formed under the basement in the local zone of the ground base, the parameters of which are consistent with the width of the basement. DGS interact with the basement; they receive its pressure and transmit it depending on the initial expansion pressure at the particular soil massif points in accordance with the Coulomb-Mohr law, to the boundary shells of the arising DGS. The development of DGS main stresses occurs in them, controlling the process of pre-limit deformation of the soil base-

ment and preparation of the limit state. The equations of the threshold state of the soil mass' for strip and round foundation are obtained. Critical values of pressure and foundation settlement are calculated.

Keywords: *strip foundation*, *round foundation*, *limit state equations*, *critical pressure and deformation*, *ground foundation*, *dissipative geological structures*

REFERENCES

1. Demin, A.M. *Opolzni v kar'erakh: analiz i prognoz* [Landslides in open-cut mines: analysis and forecast]. Moscow, GEOS Publ., 2009, 79 p. (in Russian)
2. Ivanov, Yu.K., Konovalov, P.A., Mangushev, R.A., Sotnikov, S.N. *Osnovaniya i fundamenty rezervuarov* [Bases and foundations of tanks]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1989, 223 p. (in Russin).
3. Ol'khovatenko, V.E., Timofeev, S.S. *Nelineinaya model' gruntovogo osnovaniya* [Nonlinear model of soil basement]. *Inzhenernaya geologiya*, 1992, no. 6, pp. 96–106. (in Russian)
4. Pisarenko, G.S., Agarev, V.A., Kvitka, A.L., Popkov, V.G., Umanskii, E.S. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Kiev, Vishcha shkola Publ., 1973, 672 p. (in Russian)
5. Postoev, G.P. *Dissipativnye struktury v gruntovom massive na primere formirovaniya glubokikh opolznei* [Dissipative structures in soil massif by the example of deep landslides formation]. *Inzhenernaya geologiya*, 2018, vol. XIII, no. 3, pp. 54–61. (in Russian)
6. Postoev, G.P. *Modeli mekhanizma formirovaniya i rascheta provalov zemnoi poverkhnosti nad podzemnymi polostyami* [Models of formation mechanism and calculation of the surface sinkholes over underground cavities]. *Geoekologiya*, 2020, no. 4, pp. 36–47. (in Russian)
7. Postoev, G.P., Kazeev, A.I., Kuchukov, M.M. *Fizicheskie zakony raspredeleniya davleniya v geologicheskoi srede* [Physical laws of pressure distribution in the geological environment], *Geoekologiya*, 2020, no. 6, pp. 22–31. (in Russian)
8. Nicolis, G., Prigogine, I. Self-organization in non-equilibrium systems: from dissipative sructures to order through fluctuations. New York, J. Wiley & Sons, 1977.

ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2021, № 2, с. 49–56

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.4.042

ОТРАЖЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКЗОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОКАЗАТЕЛЯХ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ЛАНДШАФТОВ

© 2021 г. А. С. Викторов[1,*], Т. В. Орлов[1], В. Н. Капралова[1]

[1] *Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия*

**E-mail: dist@geoenv.ru*

Поступила в редакцию 15.12.2020 г.
После доработки 25.12.2020 г.
Принята к публикации 19.01.2021 г.

Проблема установления взаимосвязей характеристик идущих в ландшафте процессов и его современного облика решалась различными исследователями при индикации процессов, в инженерно-геологических изысканиях и разнообразных ландшафтных исследованиях, когда ставилась и решалась задача отражения процессов во внешнем облике ландшафта. Однако количественный аспект подобных задач как правило не рассматривался. Цель статьи – показать взаимосвязи динамических характеристик экзогенных геологических процессов и количественных показателей морфологической структуры ландшафтов (ландшафтных метрик) одного временного среза, а также факторы их определяющие. Исследования выполнялись на примере одного из наиболее распространенных ландшафтов криолитозоны – эрозионно-термокарстовых равнин. Решение поставленной задачи получено на основании подходов математической морфологии ландшафтов на базе математических моделей морфологической структуры. Выявлены взаимосвязи количественных параметров динамики термокарстовых процессов в пределах эрозионно-термокарстовых равнин – соотношение скоростей генерации новых термокарстовых понижений, с одной стороны, и роста их размеров или дисперсии размеров, с другой, и количественных характеристик морфологической структур. На базе значений метрик, присущих ландшафтам в настоящий момент времени, получены конкретные выражения для параметров динамики термокарстовых процессов, которые по сути являются количественными индикаторами динамических параметров. Данный вывод прошел первичную апробацию в виде определения значений рассматриваемого параметра двумя разными способами. Установленные взаимосвязи являются общими для рассматриваемого рода ландшафта (эрозионно-термокарстовые равнины), но зависят от характера развития процесса (синхронный старт и асинхронный старт) и могут послужить основой для определения необходимых для прогноза и оценки рисков значений динамических параметров процессов без стационарных наблюдений.

Ключевые слова: *математическая морфология ландшафта*, *математические модели морфологических структур*, *ландшафт*, *эрозионно-термокарстовая равнина*, *индикация и отражение процессов*

DOI: 10.31857/S0869780921020107

ВВЕДЕНИЕ

Задача исследования взаимосвязей характеристик процессов, формирующих ландшафт, и морфологических показателей его современного облика решалась различными исследователями. Так одной из ветвей ландшафтной индикации является индикация природных процессов. В индикационной постановке ставились задачи выявления текущего процесса при однократном исследовании, определения стадий процесса, индикации завершившихся процессов (ретроиндикация) и индикации прогнозных оценок процессов [4–6 и др]. В разнообразных ландшафтных исследованиях ставилась и решалась задача отражения процессов во внешнем облике ландшафта [7 и др.]. Проводились многочисленные исследования ландшафтных метрик, но они не были связаны с вопросом определения динамических параметров процессов [8].

В то же время количественный аспект подобных задач как правило не исследовался. Однако вопрос о наличии взаимосвязи количественных характеристик процессов, развивающихся в пределах того или иного ландшафта, и его количественных характеристик в настоящий момент времени представляет значительный интерес. При этом возникают вопросы о реальности подобных связей, механизме их реализации, степени варьирования таких связей при изменении

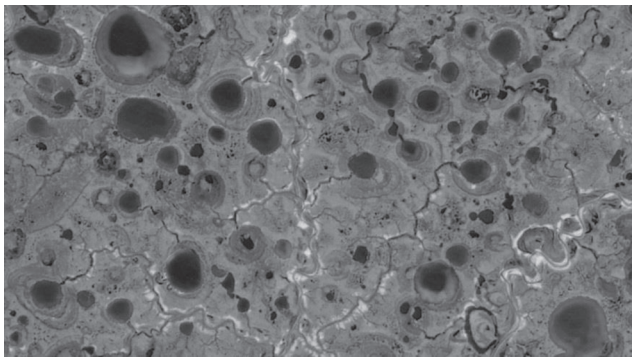


Рис. 1. Пример изображений ландшафта эрозионно-термокарстовой равнины на материалах космической съемки.

физико-географических условий и других факторов.

Цель настоящей статьи – показать взаимосвязи динамических характеристик экзогенных геологических процессов и количественных параметров морфологической структуры ландшафтов (ландшафтных метрик) одного временного среза, а таже факторы их определяющие.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования выполнялись на примере одного из наиболее распространенных ландшафтов криолитозоны – эрозионно-термокарстовая равнина.

Ландшафт эрозионно-термокарстовой равнины представляет собой слабоволнистую субгоризонтальную поверхность с преобладанием тундровой или лесотундровой растительности (пушицевые тундры, осоково-пушицевые тундры и др.), в которую вкраплены озера и хасыреи, а также местами развита нечастая эрозионная сеть (рис. 1). Озера часто имеют округлую форму и беспорядочно разбросаны по равнине. Хасыреи представляют собой плоскодонные и пологосклонные заторфованные понижения, также изометричной формы, занятые луговой или болотной растительностью и аналогично озерам в беспорядке располагающиеся на равнине. Внутри хасыреев могут оставаться мелкие остаточные озерки, а также развиваться новые термокарстовые озера в случае, если продолжается возникновение новых термокарстовых понижений. В соответствии со взглядами большинства исследователей, хасыреи образуются в результате осушения термокарстовых озер, чаще всего в результате эрозионной деятельности водотоков.

Ландшафт эрозионно-термокарстовой равнины находится под влиянием сложно взаимодействующих термокарстовых, термоабразионных и термоэрозионных процессов. Это проявляется в том, что:

– на территории возникают новые первичные термокарстовые понижения (если этот процесс продолжается),

– термокарстовые понижения растут независимо друг от друга как озера за счет термоабразионных процессов,

– в случайный момент времени озеро может быть спущено эрозионными процессами и превратиться в хасырей, при этом рост котловины останавливается из-за отсутствия водной массы.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Решение поставленной задачи – оценка взаимосвязи динамических характеристик экзогенных геологических процессов и количественных характеристик морфологической структуры ландшафтов (ландшафтных метрик) одного временного среза – может быть получено на основании подходов математической морфологии ландшафтов. Рассмотрим два варианта развития эрозионно-термокарстовых равнин:

– асинхронный старт (постоянно продолжается возникновение новых термокарстовых понижений),

– синхронный старт (первичные понижения возникли в начальный момент процесса и далее происходил только рост размеров термокарстовых озер).

Модель морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин в варианте *асинхронного старта* основывается на следующих допущениях:

1. Возникновения первичных термокарстовых понижений (очагов) за непересекающиеся отрезки времени (Δt) и на непересекающихся площадках (Δs) являются независимыми случайными событиями; вероятность возникновения понижения (p_1, p_k) зависит только от величины отрезка и площадки[1], средняя плотность генерации понижений остается постоянной:

$$p_1 = \lambda \Delta s \Delta t + o(\Delta s \Delta t),$$

$$p_k = o(\Delta s \Delta t), \quad k = 2, 3\ldots,$$

где λ – параметр (средняя плотность генерации).

2. Возникновение первичных термокарстовых понижений не происходит на площади существующих термокарстовых озер.

[1] При этом для малых площадок и временных отрезков вероятность возникновения нескольких понижений много меньше, чем вероятность возникновения одного понижения.

3. Изменение радиуса возникшего термокарстового понижения представляет собой случайный процесс; оно происходит независимо от других озер, и его скорость, находясь под воздействием случайных факторов, при этом пропорциональна плотности тепловых потерь через боковую поверхность озерной котловины.

4. В процессе роста озеро может перейти в хасырей при его спуске эрозионной сетью, вероятность этого не зависит от других озер; при этом рост озера прекращается.

5. Возникновения истоков эрозионных форм на непересекающихся площадках являются независимыми случайными событиями, и вероятность их определяется только величиной площадки[2].

Допущение 3, как показано ранее [1, 2], приводит к справедливости следующей закономерности – распределение радиуса свободно растущего термокарстового очага через время t после возникновения данного озера отвечает логнормальному распределению:

$$f_0(x,t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x\sqrt{t}} e^{-\frac{(\ln x - at)^2}{2\sigma^2 t}},$$

где a, σ – параметры.

На основе модели можно выделить следующие основные независимые количественные характеристики процессов, развивающихся в ландшафтах эрозионно-термокарстовых равнин в ситуации асинхронного старта при росте озер пропорциональном плотности тепловых потерь:

• средняя скорость роста числа термокарстовых понижений на единицу площади на свободной поверхности (средняя плотность генерации) λ,

• средняя скорость роста логарифма радиусов термокарстовых озер a,

• средняя скорость роста дисперсии логарифма радиусов термокарстовых озер σ^2.

Именно эти характеристики нужны при прогнозных и аналитических построениях. В силу этого одним из важных динамических параметров, который следует оценить, может являться отношение средней скорости роста числа термокарстовых понижений на единицу площади к средней скорости роста размеров озер (точнее логарифма радиусов термокарстовых озер):

$$\rho = \frac{\lambda}{a}.$$

Знание этого параметра позволит без дополнительных измерений при наличии данных о средней скорости роста размеров озер вычислить среднюю скорость роста числа термокарстовых понижений на единицу площади и наоборот.

Покажем, что значение рассматриваемого динамического параметра может быть получено без длительных повторных наблюдений по значениям ландшафтных метрик одного временного среза.

Анализ математической модели динамики эрозионно-термокарстовых равнин в ситуации асинхронного старта показывает [2, 9], что при весьма общих условиях при значительном времени их развития происходит стабилизация большей части количественных характеристик морфологической структуры, и территория оказывается в состоянии динамического равновесия, характеризующегося рядом закономерностей. Они представляют собой предельные значения и предельные распределения ряда главнейших параметров морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин:

– предельное распределение площади озер (интегрально-экспоненциальное распределение):

$$f(x,\infty) = -\frac{1}{xEi(-\varepsilon\gamma)} e^{-\gamma x}, \quad x \geq \varepsilon, \tag{1}$$

– предельная средняя плотность расположения озер:

$$\tau = -\lambda(1 - P_d^*)\frac{Ei(-\varepsilon\gamma)}{2a}, \tag{2}$$

– предельная средняя площадь озера:

$$s = -\frac{1}{\gamma Ei(-\gamma\varepsilon)} e^{-\gamma\varepsilon}, \tag{3}$$

– предельное распределение площади хасыреев (экспоненциальное распределение):

$$F_h(x,t) = 1 - e^{-\gamma x}, \tag{4}$$

– предельная заозеренность, связанная с предельными значениями средней площади озера и средней плотностью расположения озер:

$$P_d^* = 1 - e^{-\tau s}, \tag{5}$$

где $Ei(-x)$ – интегральная экспоненциальная функция, ε – начальная площадь термокарстового очага, P_d^* – предельное значение заозеренности, γ – средняя плотность расположения истоков эрозионных форм.

Справедливость вывода о реальности состояния динамического равновесия подтверждена эмпирической проверкой части полученных закономерностей на значительном числе участков в пределах эрозионно-термокарстовых равнин на территории Западной и Восточной Сибири и Аляски [3].

Аналогичная проверка, расширенная и уточненная по сравнению с более ранними нашими исследованиями, была проведена для распределений площадей хасыреев и их соответствия экс-

[2] При этом для малых площадок вероятность наличия более, чем одного истока эрозионной формы много меньше, чем вероятность наличия одного истока.

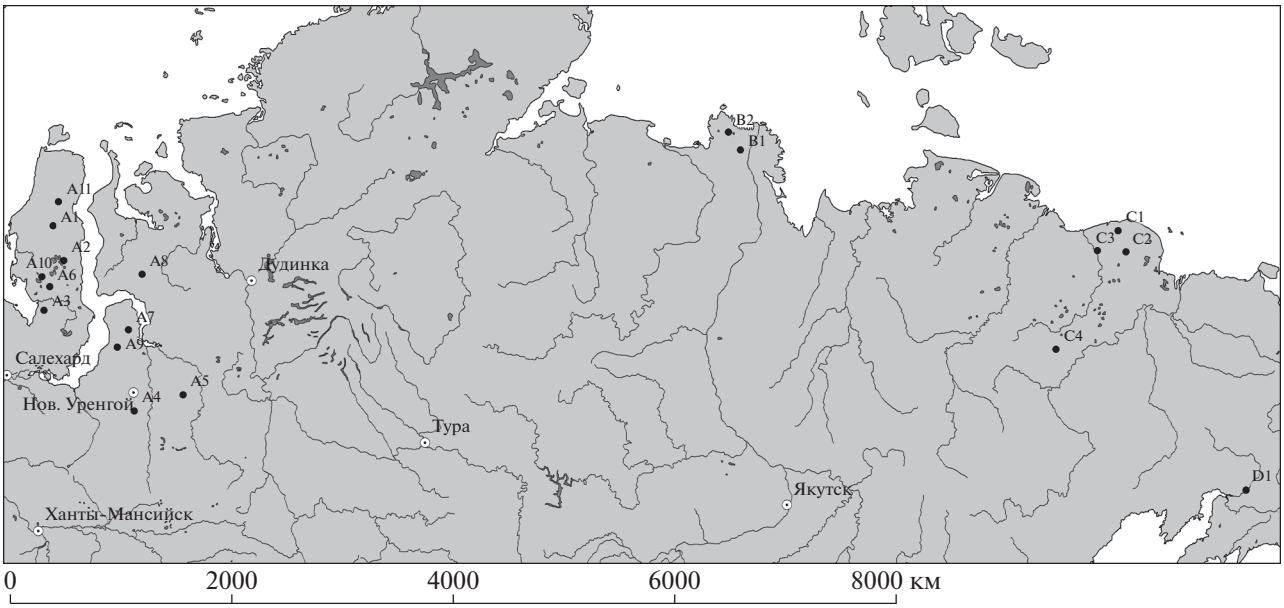


Рис. 2. Схема ключевых участков эрозионно-термокарстовых равнин при проверке распределения площадей хасыреев.

поненциальному распределению (рис. 2). Гипотеза подтверждается на 14 участках из 18 на уровне значимости 0.99 (табл. 1).

Таким образом, экспериментальные данные указывают на реальность и значительную распространенность состоянии динамического равновесия термокарстово-эрозионных равнин.

Математический анализ полученных закономерностей позволил получить выражение для оценки значения рассматриваемого динамического параметра на основе измерения по однократному космическому снимку.

Подставляя в выражение для заозеренности (5) выражения средней плотности расположения озер (2) и их среднюю площадь (3) и упростив, получаем соотношение:

$$P_d^* = 1 - \exp\left[-\frac{\lambda}{2a\gamma}(1 - P_d^*)e^{-\gamma\varepsilon}\right].$$

Преобразуя, получаем искомый параметр ρ:

$$\rho_1 = \frac{\lambda}{a} = -2\gamma e^{\gamma\varepsilon}\frac{\ln[1 - P_d^*]}{[1 - P_d^*]}. \qquad (6)$$

В данном выражении слева стоит искомый динамический параметр, а все переменные в правой части (заозеренность, средняя плотность расположения истоков эрозионных форм, минимальная площадь термокарстового озера) определяются прямым измерением по материалам **однократной** космической съемки. Средняя плотность расположения истоков эрозионных форм может определяться не прямо, так как нередко возникают затруднения из-за неопределенности положения истока, а по значению средней и минимальной площади термокарстового озера, решая относительно γ уравнение

$$s = -\frac{1}{\gamma Ei(-\gamma\varepsilon)}e^{-\gamma\varepsilon}.$$

Таким образом, можно определить соотношение скорости генерации термокарстовых озер и скорости их роста на основе измерения по однократному космическому снимку средней площади озер, минимального размера термокарстового озера и заозеренности.

Таблица 1. Соответствие теоретического (экспоненциального) и эмпирических законов распределения площадей хасыреев по критерию Пирсона*

Участок, объем выборки	B1, 90	B2, 114	A8, 93	A7, 127	C2, 352	C1, 89	A1, 97	A2, 62	A3, 97
Экспоненциальное распределение	0.005	**0.034**	**0.390**	**0.084**	0.000	**0.749**	**0.179**	0.000	**0.539**
Участок, объем выборки	A4, 43	A5, 49	C3, 176	A6, 143	D1, 85	A9, 73	A10, 122	A11, 76	C4, 178
Экспоненциальное распределение	**0.447**	**0.281**	**0.372**	**0.153**	**0.225**	**0.191**	**0.396**	**0.723**	0.001

* В таблице приведены значения *p* – величины дополнительной к квантилю, соответствующему фактическому значению критерия; гипотеза согласуется с выборкой на уровне 0.99, если *p* больше или равно 0.01; жирным шрифтом выделены случаи согласия с проверяемым теоретическим распределением.

Таблица 2. Расчетные значения соотношения скорости генерации термокарстовых озер и параметра роста размеров, определенного по значениям ландшафтных метрик одного временного среза в двух вариантах

Участок	Площадь, км^2	Объем выборки, шт.	ε, км^2	γ, км$^{-2}$	Заозеренность	Средняя площадь хасыреев, км^2	ρ_1	ρ_2
14	420	209	0.005434	3.95	0.22	1.83	2.57	0.76
18	97	62	0.001474	3.62	0.09	1.10	0.75	0.47
19	207	161	0.0005	3.50	0.05	0.46	0.38	0.61
21	1157	405	0.000662	1.69	0.15	1.04	0.65	0.86
22	2867	244	0.006012	0.54	0.05	3.30	0.06	0.08
23	123	257	0.000403	4.82	0.08	0.12	0.88	3.66
24	153	346	0.0002	1.81	0.66	0.19	11.52	47.30
28	1343	264	0.006898	0.26	0.50	2.15	0.71	2.13
30	441	519	0.000147	2.74	0.01	0.30	0.06	0.18
40	670	535	0.000163	5.68	0.03	0.29	0.36	0.57

В табл. 2 приведен пример расчета значений исследуемого динамического параметра ρ_1 описанным методом по материалам однократной космической съемки с использованием выражения (6) для участков, на которых подтвердилось состояние динамического равновесия морфологической структуры.

Значение этого же параметра может быть определено иным способом. Из предельного распределения площади хасырея (4) следует соотношение:

$$s_h = \frac{1}{\gamma},$$

где s_h – средняя площадь хасырея.

Этот вывод был экспериментально проверен на ключевых участках. На рис. 3 отражена теоретическая зависимость средней площади хасырея и средней плотности расположения истоков эрозионных форм и точки, отвечающие эмпирическим данным, относящимся к различным участкам. График показывает соответствие данных теоретическому выводу.

Выражая среднюю плотность расположения истоков эрозионных форм через среднюю площадь хасырея и используя формулу (6), получаем вторым способом другой индикатор, позволяющий определить соотношение скорости генерации термокарстовых озер и скорости их роста на основе измерения по однократному космическому снимку средней площади хасыреев, минимального размера термокарстового озера и заозеренности:

$$\rho_2 = -\frac{2}{s_h}\frac{\ln[1-P_d^*]}{[1-P_d^*]}\exp\left(\frac{\varepsilon}{s_h}\right),$$

где ε – начальная площадь термокарстового очага, P_d^* – предельное значение заозеренности, s_h – средняя площадь хасырея.

В выражении слева стоит искомый динамический параметр, а все переменные в правой части (заозеренность, средняя площадь хасырея) определяются прямым измерением по материалам однократной космической съемки.

Были выполнены первичные эмпирические исследования полученного результата (см. табл. 2). На десяти ключевых участках указанным методом были определены значения динамического параметра ρ, равного отношению плотности генерации термокарстовых озер и скорости роста размеров (точнее логарифма размеров).

Сопоставление значений оцениваемого параметра, полученных первым и вторым способом (за исключением участка 24), показывает:

– значения параметра изменяются в пределах 3.66–0.06,

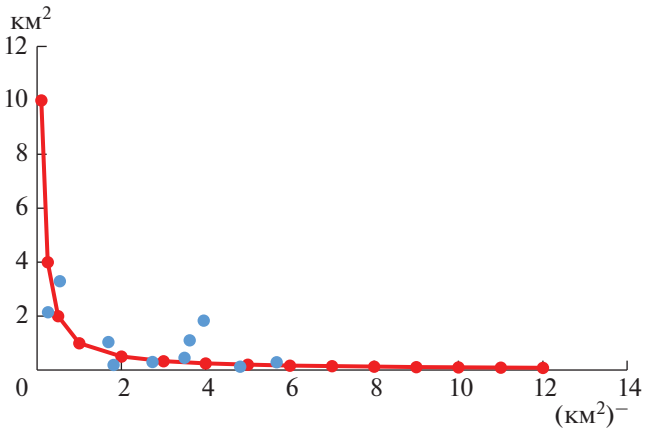


Рис. 3. Соответствие теоретической зависимости (линия) средней площади хасырея (по оси x) и средней плотности расположения истоков эрозионных форм (по оси y) и эмпирических данных (точки).

– отличия значений, рассчитанных первым и вторым методом, нередко совпадают по порядку величин,

– различия значений изменяются в пределах 2.78–0.02,

– коэффициент корреляции между значениями параметра, определенными первым и вторым способом, составляет 0.97.

Таким образом можно сделать вывод, что первичное апробирование осуществлено. В целом, в результате исследований на примере эрозионно-термокарстовых равнин в ситуации асинхронного старта получены по статическим значениям ландшафтных метрик значения динамического параметра – соотношение скорости генерации термокарстовых озер и скорости их роста, и предложены новые индикаторы количественных характеристик динамики опасных экзогенных процессов на основе использования ландшафтных метрик.

Был рассмотрен вариант развития эрозионно-термокарстовых равнин и в ситуации *синхронного* старта. Модель морфологической структуры этого ландшафта базируется на аналогичных допущениях, но второе исключено, а первое заменено на допущение 1а:

1а. Возникновения первичных термокарстовых понижений (очагов) происходили за короткий отрезок времени и на непересекающихся площадках (Δs) и являются независимыми случайными событиями; вероятность возникновения понижения зависит только от величины отрезка и площадки[3]:

$$p_1 = \mu\Delta s + o(\Delta s),$$

$$p_k = o(\Delta s), \quad k = 2,3\ldots,$$

где μ – параметр (средняя начальная плотность расположения понижений).

Одним из существенных параметров динамики термокарстового процесса является соотношение (μ) скорости роста среднего логарифма радиуса термокарстового озера (a) и скорости роста дисперсии логарифма радиуса (σ) при свободном росте озера, не ограниченном эрозией:

$$\mu = \frac{a}{\sigma^2}.$$

Представляет интерес взаимосвязь этого соотношения с ландшафтными метриками территории эрозионно-термокарстовых равнин, которые поддаются прямому определению по материалам дистанционных съемок. Это тем более интересно, так как само соотношение не может быть прямо определено без длительных стационарных наблюдений.

Задача может быть решена на основе разработанных моделей. Как показано нами ранее [2], из допущений модели морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин в варианте синхронного старта вытекает, что по прошествии большого времени распределение площади озер эрозионно-термокарстовых равнин отвечает выражению:

$$f_{sl}(x,\infty) = \frac{x^{\frac{a}{2\sigma^2}-1} e^{-\gamma x}}{\int\limits_0^{+\infty} x^{\frac{a}{2\sigma^2}-1} e^{-\gamma x} dx}, \tag{7}$$

и является гамма-распределением. Найдем математическое ожидание площади озера, используя предельное распределение (7). В соответствии с известными выражениями для гамма-распределения оно равно:

$$M\xi_{sl} = \frac{a}{2\sigma^2\gamma}.$$

Математическое ожидание площади хасырея согласно (2) составляет:

$$M\xi_{sh} = \frac{1}{\gamma}.$$

Соответственно искомое соотношение μ может быть получено на основе ландшафтных метрик средней площади озер ($M\xi_{sl}$) и средней площади хасыреев ($M\xi_{sh}$), получаемых по однократному временному срезу,

$$\mu = \frac{2M\xi_{sl}}{M\xi_{sh}}.$$

Таким образом, для определения соотношения скорости роста среднего логарифма радиуса термокарстового озера и его дисперсии при свободном росте озера достаточно воспользоваться в условиях эрозионно-термокарстовых равнин с синхронным стартом соотношением средней площади термокарстового озера и средней площади хасырея без стационарных наблюдений.

ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования получены следующие выводы.

1. На основе использования математических моделей морфологической структуры выявлены взаимосвязи количественных параметров динамики термокарстовых процессов в пределах эрозионно-термокарстовых равнин – соотношения скорости генерации новых термокарстовых понижений, с одной стороны, и скорости роста их размеров или скорости роста дисперсии разме-

[3] При этом для малых площадок и временных отрезков вероятность возникновения нескольких понижений много меньше, чем вероятность возникновения одного понижения.

ров, с другой, и количественных характеристик морфологической структур.

2. На базе ландшафтных метрик, определенных в текущий момент времени, получены конкретные выражения для параметров динамики термокарстовых процессов, которые по сути дела являются количественными индикаторами динамических параметров.

3. Полученный вывод прошел первичную апробацию в виде определения значений рассматриваемого параметра двумя разными способами.

4. Эмпирически подтверждено, что средняя площадь хасырея и средняя плотность расположения истоков эрозионных форм связаны гиперболической зависимостью.

5. Полученные взаимосвязи являются общими для рассматриваемого рода ландшафта (эрозионно-термокарстовая равнина), но зависят от характера развития процесса (синхронный старт и асинхронный старт).

6. Полученные взаимосвязи могут послужить основой для определения необходимых для прогноза и оценки рисков значений динамических параметров процессов без стационарных наблюдений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-05-00723.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Викторов А.С.* Математическая морфология ландшафта. М.: Тратек, 1998, 191 с.
2. *Викторов А.С., Капралова В.Н., Орлов Т.В., Трапезникова О.Н. и др.* Математическая морфология ландшафтов криолитозоны. М.: РУДН, 2016. 232 с.
3. *Викторов А.С., Трапезникова О.Н., Орлов Т.В., Садков С.А.* Использование подходов математической морфологии ландшафта при дистанционной оценке природных опасностей // Геоэкология. 2019. № 5. С. 61–73.
4. *Викторов С.В., Илюшина М.Т., Кузьмина И.В.* Эколого-генетические ряды растительных сообществ как индикаторы природных процессов // Экология. 1970. № 6. С. 88–94.
5. Методическое руководство по инженерно-геологической съемке масштаба 1 : 200000 (1 : 100000, 1 : 50000). М.: Недра, 1978. 391 с.
6. *Садов А.В., Ревзон А.Л., Чалидзе Ф.Н.* Изучение экзогенных процессов в районах крупных водохранилищ аэроландшафтным методом. М.: Недра, 1976. 49 с.
7. Landscape Patterns in a Range of Spatio-Temporal Scales. Alexander V. Khoroshev & Kirill N. Dyakonov (eds.), Springer, 2020. 439 c.
8. *Ritters K.H., O'Neill R.V., Hunsaker C.T. et al.* A factor of landscape pattern and structure metrics // Landscape Ecology. 1995. V. 10. № 1. P. 23–39.
9. *Victorov A.* Mathematical model of thermokarst and fluvial erosion plains // GIS and Spatial Analysis, Toronto. 2005. V. 1. P. 62–67.

REFLECTION OF THE QUANTITATIVE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF EXOGENOUS PROCESSES IN METRICS OF LANDSCAPE MORPHOLOGICAL PATTERNS

A. S. Victorov[a,#], T. V. Orlov[a], and V. N. Kapralova[a]

[a] *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

[#] *E-mail: dist@geoenv.ru*

Many researchers studied relationships between the characteristics of the processes occurring in a landscape and its modern state aimed at the process indication, engineering-geological research, and various landscape studies. The problem of reflecting processes in the external view of landscapes was posed and solved, but its quantitative aspect as a rule was not studied. The purpose of this paper is to show the relationship between the dynamic characteristics of exogenous geological processes and the quantitative characteristics of the landscape morphological pattern (landscape metrics), taking a single time slice, including their determining factors. As an example of our approach, the research involves one of the most widespread landscapes of the permafrost zone, i.e., thermokarst plains with fluvial erosion. The solution to this problem is obtained based on the mathematical morphology of landscapes and the mathematical models of the morphological pattern. The mathematical models of the morphological patterns reveal the interrelationships between the quantitative parameters of the thermokarst process dynamics within the thermokarst plains with fluvial erosion, such as the ratios between the generation rate and the size growth rate of thermokarst depressions reflected in the quantitative parameters of morphological patterns. Using the up-to-date landscape metrics, we obtained specific expressions for the dynamic parameters of thermokarst process, which, in fact, are the quantitative indicators of the dynamic parameters. The resulting conclusion was initially tested by determining the considered parameter in two different ways. The obtained relationships are universal for the considered landscape, i.e., the thermokarst plains with fluvial erosion; however, they depend on the process peculiarities (e.g., synchronous

or asynchronous start). The obtained relationships can help us to determine the dynamic parameters of processes necessary for risk forecasting and assessing without stationary observations.

Keywords: *mathematic morphology of landscape*, *mathematic models of morphological structures*, *landscape*, *erosional thermokarst plain*, *indication and reflection of processes*

REFERENCES

1. Victorov, A.S. *Matematicheskaya morfologiya landshafta* [Mathematical morphology of landscapes]. Moscow, Tratek Publ., 1998, 191 p. (in Russian)
2. Victorov, A.S., Kapralova, V.N., Orlov, T.V., Trapeznikova, O.N., et al. *Matematicheskaya morfologiya landshaftov kriolitozony* [Mathematical morphology of permafrost landscapes]. Moscow, RUDN Publ., 2016, 232 p. (in Russian)
3. Victorov, A.S., Trapeznikova, O.N., Orlov, T.V., Sadkov, S.A. *Ispol'zovanie podkhodov matematicheskoi morfologii landshafta pri distantsionnoi otsenke prirodnykh opasnostei* [Using approaches of mathematical morphology of the landscape for remote assessment of natural hazards].*Geoekologiya,* 2019, no. 5, pp. 61–73. (in Russian)
4. Victorov, S.V., Ilyushina, M.T., Kuz'mina, I.V. *Ekologo-geneticheskie ryady rastitel'nykh soobshchestv kak indikatory prirodnykh protsessov* [Ecological and genetic series of plant communities as indicators of natural processes]. *Ecologia*, 1970, no. 6, pp. 88–94. (in Russian)
5. *Metodicheskoye rukovodstvo po inzhenerno-geologicheskoi s'emke masshtaba 1 : 200000 (1 : 100000, 1 : 50000)* [Methodical guide for engineering geological survey to a scale of 1 : 200000 (1 : 100000, 1 : 50000)]. Moscow, Nedra Publ., 1978, 391p. (in Russian)
6. Sadov, A.V., Revzon, A.L., Chalidze, F.N. *Izucheniye ekzogennykh protsessov v raionakh krupnykh vodokhranilishch aerolandshaftnym metodom* [Study of exogenous processes in the areas of large reservoirs by the aerolandscape method]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 49 p. (in Russian)
7. Landscape patterns in a range of spatio-temporal scales. Khoroshev, A.V., Dyakonov, K.N., Eds., Springer, 2020, 439 p.
8. Ritters, K.H., O'Neill, R.V., Hunsaker, C.T., et al. A factor of landscape pattern and structure metrics. *Landscape Ecology*, 1995, vol. 10, no. 1, pp. 23–39.
9. Victorov, A. Mathematical model of thermokarst and fluvial erosion plains. *GIS and Spatial Analysis*, Toronto. 2005, vol. 1, pp. 62–67.

ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2021, № 2, с. 57–66

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 574:550.42:662.511:556.3

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДВУХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВОД

© 2021 г. А. И. Гавришин*

Южно-Российский государственный политехнический университет (Новочеркасский политехнический институт) им. М.И. Платова, ул. Просвещения, 132, Новочеркасск, 346428 Россия

**E-mail: agavrishin@rambler.ru*

Поступила в редакцию 04.12.2020 г.
После доработки 20.01.2021 г.
Принята к публикации 21.01.2021 г.

Цель исследований – охарактеризовать эффективность двух наиболее популярных методов оценки степени загрязнения вод, выявить их достоинства и недостатки при решении задач охраны окружающей среды. Сравнение выполнено для двух способов: “Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям” (МКОЗ) и “Оценка качества химического состава вод по суммарному показателю загрязнения” (СПЗ). Эффективность методов показана на примере химического состава вод р. Кадамовка (Восточный Донбасс) выше, в месте и ниже сброса шахтных вод (СШВ) ш. Глубокая по 21 лимитируемому показателю. По методу МКОЗ относительно требований к ПДК для вод рыбохозяйственного водопользования вода реки классифицирована, как экстремально грязная (5 класс в месте СШВ) и очень грязная (4 класс, разряд “г” выше и ниже СШВ). По методу СПЗ и требованиям к питьевым водам ситуация оценена с экологических позиций как “кризис”, по требованиям к рыбохозяйственным водам – как “бедствие”. Сравнение качества вод по СПЗ в соответствии с требованиями России, США и Европейского Союза показало близкие результаты. Метод МКОЗ применим для оценки качества только поверхностных вод рыбохозяйственного назначения. Метод СПЗ применим для любых типов вод по набору любых компонентов загрязнения. Высказаны рекомендации о необходимости совершенствования очистных технологий и проведения реабилитационных мер.

Ключевые слова: *загрязненность вод*, *суммарный показатель*, *рыбохозяйственные и питьевые воды*, *Восточный Донбасс*

DOI: 10.31857/S086978092102003X

ВВЕДЕНИЕ

Существование жизни на Земле постоянно сопровождается поиском компромисса с окружающей средой. Мощное развитие социума привело к широкомасштабному изменению условий жизнеобитания на нашей планете под влиянием антропогенного фактора, который в ряде случаев превосходит природные факторы по силе и масштабам негативных последствий (образование озоновых дыр, кислотные осадки, опустынивание, подтопление территорий и многие другие). Анализ состояния природной среды нашей планеты и построение прогнозов развития цивилизации привели многих ученых к выводу о прогрессирующем ухудшении этого состояния вплоть до полной деградации биосферы и человечества [5, 6].

Широкое развитие получили процессы интенсивного загрязнения воздушной, водной и геологической сред под влиянием промышленности, сельского хозяйства, населенных пунктов, линейных и уникальных объектов. Масштабному загрязнению подвержены не только поверхностные воды на суше, но эти негативные явления характерны также для атмосферных, подземных и техногенных вод [1–5, 7–11].

При решении проблем практического использования вод возникла необходимость изучения и оценки качества их химического состава. Существует множество ведомственных, национальных и международных требований к качеству вод. Прежде всего, это соответствие состава вод требованиям к водам питьевого[1] и рыбохозяйственного[2] водопользования. Однако существует множество важных требований к качеству вод, используемых при мелиорации, в качестве

[1] ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования // Гигиенические нормативы. Минздрав. РФ. Пост. № 78. М. 2003. 152 с. URL: http://docs.cntd.ru/document/901862249

[2] ПДК водных объектов рыбохозяйственного значения // Гигиенические нормативы. М.: Приказ Росрыболовства от 18.01.2010 № 20. 5 с. URL: http://docs.cntd.ru/document/902199367

бутилированных, в различных видах промышленности, сельского хозяйства и т.п. Вместе с тем проводится изучение большого количества различных свойств вод: радиоактивность, изотопный состав, агрессивность, цветность, вкус и другие. В любом случае возникает проблема оценки их качества.

Цель настоящих исследований – охарактеризовать эффективность двух наиболее популярных методов оценки степени загрязнения вод, выявить их достоинства и недостатки при решении задач охраны окружающей среды.

В настоящей работе автор главное внимание уделил двум способам оценки степени загрязнения вод: "Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям" – сокращенное название МКОЗ[3], и "Оценка качества химического состава вод по суммарному показателю загрязнения" – сокращенное название СПЗ [1, 2, 7, 8].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Характеристика эффективности выбранных двух методов оценки степени загрязнения вод МКОЗ и СПЗ выполнена на примере изучения химического состава вод р. Кадамовка, которая протекает в ЮВ части Восточного Донбасса (Ростовская область). Воды реки отобраны выше, ниже и в месте сброса шахтных вод (СШВ) шахты Глубокая, их химический состав приведен в табл. 1.

В качестве первого метода оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям использована интегральная оценка качества поверхностных вод по комплексу загрязняющих веществ, определяемых сетью Государственной службы наблюдений Росгидромета (см. сноску 3). Метод нашел применение в реальных работах как научных, так и практических, в том числе при обобщении данных Росгидромета.

Система относительных показателей включает два вида оценочных характеристик – покомпонентные и комплексные. Все оценочные показатели взаимосвязаны и дополняют друг друга. Основные из них:

– частные и обобщенные покомпонентные оценочные баллы ($S_\alpha ij$, $S_\beta ij$, Sij);

– комбинаторный индекс загрязненности воды – S и его удельное значение – Sj (УКИЗВ);

– критические параметры загрязненности (КПЗ);

– классификация степени загрязненности и качества воды.

Наиболее информативными являются УКИЗВ, КПЗ и классификация качества воды по степени загрязненности.

В качестве второго метода оценки загрязненности вод использована усовершенствованная методика оценки загрязненности, широко применяемая в геохимии и геоэкологии, по методу определения коэффициента концентрации и суммарного показателя загрязнения (СПЗ). Опыт применения указанного метода для оценки качества различных типов вод позволил рекомендовать ряд изменений в традиционную методику. Эти рекомендации частично опубликованы автором в России [1, 2] и за рубежом (в Англии [7] и Канаде [8]). Введены категории степени загрязненности воды и окружающей среды: норма, риск, кризис, бедствие и катастрофа (табл. 2). Для категории "норма" (концентрации загрязняющих компонентов ниже ПДК) значение суммарного показателя меньше 2; далее границы категорий установлены с кратностью 8: $2 \cdot 8 = 16$, $16 \cdot 8 = 128$ и т.д. (см. табл. 2).

Коэффициент концентрации i-го компонента рассчитывается по формуле:

$$K_{iC} = C_i / C_{\text{ПДК}},$$

где C_i – концентрация компонента, $C_{\text{ПДК}}$ – предельно допустимая или фоновая концентрация компонента.

Степень загрязнения окружающей среды по n компонентам оценивается по суммарному показателю загрязнения:

$$Z_C = \sum_i K_{iC} - (n - 1).$$

Компоненты состава вод включаются в название при содержании 20–25%-моль, располагаются в порядке возрастания.

КАЧЕСТВО ВОДЫ ПО МЕТОДУ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ

Для оценки качества воды р. Кадамовка в трех створах (выше, в месте и ниже поступления шахтных сточных вод) осуществлен расчет основных характеристик по указанной выше методике. Полученные результаты представлены в табл. 3.

Устойчивая загрязненность вод характерна в отношении большинства компонентов, что подтверждается наибольшими значениями оценочных баллов по их повторяемости ($S_\alpha = 4$). Согласно этой классификации, загрязненность вод р. Кадамовки во всех створах определяется как "устойчивая". Уровень же загрязненности воды этими ингредиентами различен. Так, для створа выше СШВ по SO_4, Na, Mg, Fe, Be, Cu и Zn он яв-

[3] РД 52.24.643-2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям // Руководящий документ. Разработчики: В.П. Емельянова, Е.Е. Лобченко. Ростов-на-Дону: Гидрохимический институт Росгидромета. 2002. 47 с. URL: https://standartgost.ru/g/%D0%A0%D0%94_52.24.643-2002

Таблица 1. Химический состав вод р. Кадамовка, (мг/л)

Компонент	Воды р. Кадамовка					
	1000 м выше СШВ		в месте СШВ		500 м ниже СШВ	
Дата опробования	15.07.15	22.10.15	15.07.15	22.10.15	15.07.15	22.10.15
pH	8.03	7.78	7	7.93	7.69	8.06
SO_4	2192	1597	2292	3095	2591	2995
Cl	263.8	269.8	288.5	381.0	412.1	404.8
Na	357.5	543.1	483	1352.0	630.5	1181.0
Mg	139.8	152.0	206.7	249.3	218.9	310.1
Fe	0.47	1.23	5.65	0.10	0.95	0.13
M	3896	3060	3964	5772	4852	5968
Al	0.62	0.62	1.16	0.07	1.3	0.07
Be	0.0027	0.0007	0.0037	0.0006	0.0012	0.0006
Cd	0.0003	0.0015	0.0001	0.0039	0.0005	0.0030
K	12.6	44.20	13.3	47.40	14.1	33.80
Co	0.002	0.029	0.039	0.001	0.001	0.001
Li	0.2	0.23	0.29	0.51	0.38	0.45
Cu	0.004	0.005	0.009	0.004	0.001	0.005
Mn	0.933	4.670	1.9	0.274	0.52	0.258
Ni	0.009	0.185	0.088	0.001	0.003	0.001
Pb	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Se	0.033	0.005	0.024	0.005	0.041	0.005
Sr	3.6	2.66	4.13	6.54	5.41	5.81
Cr	0.001	0.001	0.003	0.001	0.001	0.001
Zn	0.018	0.089	0.0131	0.005	0.029	0.005

Примечание: M (минерализация) учтена в расчетах ее составляющих (SO_4, Na, K, Mg и др.) здесь и в таблицах 5–8.

ляется средним. Частный оценочный балл по кратности превышения для этих ингредиентов менее 3, а для Al, Li, Mn, Se он более высокий – до 4. Экстремально высокого уровня загрязненности по этим показателям не наблюдается.

Более высокие значения частного оценочного балла по кратности превышения $ПДК_{р/х}$ наблюдаются в расчетах того же показателя в створах ниже сброса шахтных вод и, особенно, в створе сброса шахтных вод. В результате высокий уровень загрязненности характерен для основного количества ингредиентов. В створе – в месте СШВ – к ним относятся SO_4, Al, Li, Mn, Se, Fe, Be, Cu; а в створе – ниже СШВ – SO_4, Li, Mn, Se, Fe, Mg, что априори указывает на наиболее загрязненный участок реки в месте сброса шахтных вод (табл. 4).

Таким образом, степень загрязненности воды р. Кадамовки (см. табл. 4) оценивается как экстремально грязная – 5 класс (место СШВ), и очень грязная – 4 класс, разряд “r” (выше и ниже СШВ).

КАЧЕСТВО ВОДЫ ПО СУММАРНОМУ ПОКАЗАТЕЛЮ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Расчет суммарного показателя загрязнения вод р. Кадамовка по российским и зарубежным нормативам (табл. 5) свидетельствует, что рос-

Таблица 2. Категории загрязнения вод и окружающей среды

Суммарный показатель	Категории загрязнения вод и окружающей среды
< 2	Норма (удовлетворительная)
≥ 2–16	Риск (напряженная)
≥ 16–128	Кризис (чрезвычайная)
≥ 128–1024	Бедствие
≥ 1024	Катастрофа

Таблица 3. Расчет комбинаторного индекса загрязненности воды р. Кадамовки

Компонент	Выше СШВ			В месте СШВ			Ниже СШВ			ПДК$_{р/х}$
	Частный оценочный балл по:		Обобщенный оценочный балл	Частный оценочный балл по:		Обобщенный оценочный балл	Частный оценочный балл по:		Обобщенный оценочный балл	
	повторяемости, S_α	кратности превышения, S_β		повторяемости, S_α	кратности превышения, S_β		повторяемости, S_α	кратности превышения, S_β		
SO_4	4.00	2.22	8.88	4.00	4.00	16.00	4.00	4.00	16.00	100
Cl	–	–	–	–	–	–	–	–	–	300
Na	4.00	2.03	8.12	4.00	2.32	9.28	4.00	2.32	9.28	120
Mg	4.00	2.21	8.84	4.00	2.46	9.84	4.00	2.83	11.32	40
Fe	4.00	2.81	11.24	4.00	4.00	16.00	4.00	3.02	12.08	0.1
M	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1000
Al	4.00	3.14	12.56	4.00	3.13	12.52	4.00	3.18	12.72	0.04
Be	4.00	2.81	11.24	4.00	3.02	12.08	4.00	2.31	9.24	0.0002
Cd	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.005
K	4.00	1.14	4.56	4.00	1.21	4.84	4.00	0.96	3.84	50
Co	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.01
Li	4.00	3.12	12.48	4.00	3.42	13.68	4.00	3.44	13.76	0.03
Cu	4.00	2.31	9.24	4.00	2.56	10.24	4.00	2.13	8.52	0.001
Mn	4.00	4.00	16.00	4.00	4.00	16.00	4.00	3.72	14.88	0.01
Ni	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.01
Pb	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.006
Se	4.00	3.23	12.92	4.00	3.11	12.44	4.00	3.33	13.32	0.002
Sr	4.00	1.56	6.24	4.00	2.08	8.32	4.00	2.10	8.40	2
Cr	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.05
Zn	4.00	2.42	9.68	–	–	–	2.95	2.11	6.22	0.01
Комбинаторный индекс загрязненности	132.00			141.24			139.58			
Удельный комбинаторный индекс, S_j	10.15			11.77			10.74			

Примечание: прочерк – содержание компонента в пределах ПДК$_{р/х}$.

Таблица 4. Классификация качества воды р. Кадамовка

Относительные показатели	Воды р. Кадамовка		
	выше СШВ	в месте СШВ	500 м ниже СШВ
1. Комбинаторный индекс загрязненности воды	132.00	141.24	139.58
2. Удельный комбинаторный индекс загрязненности воды	10.15	11.77	10.74
3. Критические параметры загрязненности воды	8 (Fe, Al, Be, Li, Cu, Mn, Se, Zn)	10 (SO_4, Na, Mg, Fe, Al, Be, Li, Cu, Mn, Se)	9 (SO_4, Na, Mg, Fe, Al, Be, Li, Mn, Se)
4. Классификация качества воды по степени загрязненности	Очень грязная, 4 класс, разряд “г”	Экстремально грязная, 5 класс	Очень грязная, 4 класс, разряд “г”

Таблица 5. Сравнение состава вод р. Кадамовка с различными ПДК

Компонент	Воды р. Кадамовка, 1000 м выше СШВ	Значения коэффициента концентрации (K_{ic})			
Дата опробования	15.07.15	1	2	3	4
pH	8.03	0	0	0	0
SO_4	2192	4.38	21.9	8.8	8.8
Cl	263.8	0.75	0.7	1.1	1.1
Na	357.5	1.78	3	1.78	1.78
Mg	139.8	2.8	3.5	2.8	2.8
Fe	0.47	1.57	4.7	1.57	2.35
M	3896	3.9	3.9	7.8	2.6
Al	0.62	3.1	15.5	3.1	3.1
Be	0.0027	13.5	13.5	0.7	0.7
Cd	0.0003	0.3	0.06	0.06	0.06
K	12.6	0.42	0.4	1	1
Co	0.002	0.02	0.2	0.02	0.02
Li	0.2	6.7	6.7	6.7	6.7
Cu	0.004	0.004	4	0.002	0.002
Mn	0.933	9.3	93	18.7	18.7
Ni	0.009	0.45	0.9	0.45	0.45
Pb	0.001	0.1	0.2	0.2	0.2
Se	0.033	3.3	16.5	0.66	3.3
Sr	3.6	0.51	1.8	0.51	0.51
Cr	0.001	0.02	0.02	0.02	0.02
Zn	0.018	0.018	1.8	0.004	0.004
Z_c		32.9	173	25	24

Примечание: 1 – для ПДК питьевых вод РФ; 2 – для ПДК рыбохозяйственных вод РФ; 3 – для ПДК по нормам “Агентства по охране окружающей среды США (US.EPA)”; 4 – для ПДК по “Директиве Европейского Союза по качеству питьевой воды, предназначенной для потребления человеком”.

сийские требования более жесткие по сравнению с нормами США и ЕС (увеличение суммарного показателя с 24–25 до 32.9); показатель для вод рыбохозяйственного назначения четко отражает более высокие требования к составу вод (показатель – 173).

Выполнен детальный анализ степени загрязнения вод р. Кадамовка выше, в месте и ниже СШВ по методу оценки суммарного показателя загрязнения [2, 7, 8]. В табл. 6 приведены результаты расчета коэффициентов концентрации и суммарного показателя загрязнения в 1000 м вы-

Таблица 6. Расчет суммарного показателя загрязнения вод р. Кадамовка выше СШВ

Компонент	Воды р. Кадамовка 1000 м выше СШВ	Значения K_{iC}		Воды р. Кадамовка 1000 м выше СШВ	Значения K_{iC}	
Дата опробования	15.07.15	1	2	22.10.15	3	4
pH	8.03	0	0	7.78	0	0
SO_4	2192	4.38	21.9	1597	5.2	14
Cl	263.8	0.75	0.7	269.8	0.8	0.9
Na	357.5	1.78	3	543.1	2.7	4.5
Mg	139.8	2.8	3.5	152.0	3.0	3.8
Fe	0.47	1.57	4.7	1.23	4.1	12.3
M	3896	3.9	3.9	3060	3.1	3.1
Al	0.62	3.1	15.5	0.62	3.1	15.5
Be	0.0027	13.5	13.5	0.0007	3.5	3.5
Cd	0.0003	0.3	0.06	0.0015	1.5	0.3
K	12.6	0.42	0.4	44.20	1.5	1.5
Co	0.002	0.02	0.2	0.029	0.3	2.9
Li	0.2	6.7	6.7	0.23	7.7	7.7
Cu	0.004	0.004	4	0.005	0.005	5.0
Mn	0.933	9.3	93	4.670	46.7	467
Ni	0.009	0.45	0.9	0.185	9.4	18.5
Pb	0.001	0.1	0.2	0.001	0.1	0.2
Se	0.033	3.3	16.5	0.005	0.5	2.5
Sr	3.6	0.51	1.8	2.66	0.4	1.3
Cr	0.001	0.02	0.02	0.001	0.02	0.02
Zn	0.018	0.018	1.8	0.089	0.09	8.9
Z_c		32.9	173		73.7	573

Примечание: 1 и 3 – сравнение с ПДК вод питьевого водопользования; 2 и 4 – сравнение с ПДК вод рыбохозяйственного назначения.

ше сброса шахтных вод на две даты опробования. По величине суммарного показателя, рассчитанного по требованиям к питьевым водам, ситуация оценена как “кризис”; по отношению к рыбохозяйственным водам – как “бедствие”. Это свидетельствует о том, что выше СШВ воды р. Кадамовка подвержены интенсивному загрязнению (в верховьях реки расположен г. Шахты и несколько угольных шахт). На 15.07.15 наиболее интенсивное загрязнение отмечено по SO_4, Mn, Be, Al, Li, Se; на 22.10.15 – по Mn, Ni, SO_4, Fe, Li, Al.

В табл. 7 приведены результаты расчета коэффициентов концентрации и суммарного показателя загрязнения в месте сброса шахтных вод на две даты опробования. По величине суммарного показателя, рассчитанного по требованиям к питьевым водам, ситуация оценена как “кризис”; по отношению к рыбохозяйственным водам – как “кризис” и “бедствие”. 15.07.15 произошло повышение загрязнения вод (наиболее интенсивное по Mn, Fe, Be, Ni, Li, Se, SO_4), а 22.10.15 – снижение (высокие концентрации SO_4, Li, Mn, Na, M).

В табл. 8 приведены результаты расчета коэффициентов концентрации и суммарного показателя загрязнения ниже сброса шахтных вод. По величине суммарного показателя, рассчитанного по требованиям к питьевым водам, ситуация оценена как “кризис”; по отношению к рыбохозяйственным водам – как “кризис” и “бедствие”. Произошло некоторое снижение степени загрязнения вод р. Кадамовка, что свидетельствует о незначительном влиянии шахтных вод ш. Глубокая на состав поверхностных вод. На 15.07.15 наиболее интенсивное загрязнение отмечено по концентрациям SO_4, Mn, Al, Li Se; на 22.10.15 – по SO_4, M, Li, Mn, Na, Mg.

Таким образом, воды р. Кадамовка в Восточном Донбассе характеризуются высоким уровнем загрязнения (бедствие и кризис), который формируется под влиянием стоков г. Шахты и ряда угольных шахт; при этом стоки шахты Глубокая существенного влияния на изменение загрязне-

Таблица 7. Расчет суммарного показателя загрязнения вод р. Кадамовка в месте СШВ

Компонент	Воды р. Кадамовка 1000 м выше СШВ	Значения K_{iC}		Воды р. Кадамовка 1000 м выше СШВ	Значения K_{iC}	
Дата опробования	15.07.15	1	2	22.10.15	3	4
pH	7.0	0	0	7.93	0	0
SO_4	2292	4.6	22.9	3095	6.2	31.0
Cl	288.5	0.8	1.0	381.0	1.1	1.3
Na	483	2.4	3.8	1352.0	6.8	11.3
Mg	206.7	4.1	5.2	249.3	5.0	6.2
Fe	5.65	18.8	62.7	0.10	0.3	0.3
M	3964	4.0	4.0	5772	5.8	5.8
Al	1.16	5.8	29	0.07	0.35	0.4
Be	0.0037	18.5	18.5	0.0006	3.0	3.0
Cd	0.0001	0.1	0.02	0.0039	3.9	0.8
K	13.3	.0.4	0.4	47.40	1.6	1.6
Co	0.039	0.04	3.9	0.001	0.001	0.1
Li	0.29	9.7	9.7	0.51	17	17
Cu	0.009	0.01	9.0	0.004	0.004	4.0
Mn	1.9	19	190	0.274	2.7	27
Ni	0.088	4.4	8.8	0.001	0.05	0.1
Pb	0.001	0.1	0.2	0.001	0.1	0.2
Se	0.024	2.4	12	0.005	0.5	2.5
Sr	4.13	0.6	0.6	6.54	0.93	3.3
Cr	0.003	0.006	0.06	0.001	0.002	0.02
Zn	0.0131	0.01	1.3	0.005	0.005	0.5
Z_c		75.7	363		35.3	120

Примечание: 1 и 3 – сравнение с ПДК вод питьевого водопользования; 2 и 4 – сравнение с ПДК вод рыбохозяйственного назначения.

ния вод не оказывают. Наибольшую роль в загрязнении вод играют концентрации таких компонентов, как Mn, Al, Fe, Be, Li, Se, M, SO_4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнена характеристика двух методов оценки степени загрязненности вод: “Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям” (МКОЗ) и “Оценка качества химического состава вод по суммарному показателю загрязнения” (СПЗ) [2, 7, 8]. В данной работе показаны возможности указанных методов на примере оценки степени загрязнения вод р. Кадамовка.

По методу МКОЗ воды квалифицированы в месте слива шахтных вод как экстремально грязные – 5 класс, а выше и ниже места слива как очень грязные – 4 класс, разряд “r”. Высокий уровень загрязненности характерен для основного количества ингредиентов. В створе в месте СШВ – к ним относятся SO_4, Al, Li, Mn, Se, Fe, Be, Cu; а в створе ниже СШВ – SO_4, Li, Mn, Se, Fe, Mg,

Результаты оценки степени загрязнения вод по методу оценки качества химического состава вод по суммарному показателю загрязнения показали, что относительно питьевых вод суммарный показатель загрязнения соответствует категории “кризис”; относительно вод рыбохозяйственного назначения, в основном, категории “бедствие”. Наиболее интенсивное загрязнение зафиксировано по Mn, Al, Fe, Be, Li, Se, M, SO_4.

Метод МКОЗ разработан Гидрохимическим институтом Росгидромета и позволяет эффективно оценивать загрязненность только поверхностных вод. Этот метод требует наличия серии мониторинговых наблюдений во времени, оценивает загрязненность вод только по ПДК к рыбохозяйственному водопользованию, относительно сложен в реализации.

Метод СПЗ дает возможность оценивать качество химического состава любых типов вод (атмо-

Таблица 8. Расчет суммарного показателя загрязнения вод реки Кадамовка ниже СШВ

Компонент	Воды р. Кадамовка 1000 м ниже СШВ	Значения K_{ic}		Воды р. Кадамовка 1000 м ниже СШВ	Значения K_{ic}	
		1	2		3	4
Дата опробования	15.07.15			22.10.15		
pH	7.0	0	0	7.93	0	0
SO_4	2591	5.2	24	2995	6.0	30
Cl	412	1.2	1.4	405	1.2	1.35
Na	631	3.15	5.3	1181	5.9	9.7
Mg	219	4.4	5.5	310	6.2	7.7
Fe	0.95	3.2	9.5	0.13	0.4	1.3
M	4852	4.8	4.8	5968	6.0	6.0
Al	1.3	6.5	32.5	0.07	0.4	1.8
Be	0.0012	6.0	6.0	0.0006	3.0	3.0
Cd	0.0005	0.5	0.1	0.0030	3.0	0.5
K	14.1	0.5	0.5	33.80	1.1	1.1
Co	0.001	0.01	0.1	0.001	0.01	0.1
Li	0.38	12.7	12.7	0.45	15	15
Cu	0.001	0.001	1.0	0.005	0.001	1.0
Mn	0.52	5.2	52	0.258	2.6	26
Ni	0.003	0.15	0.3	0.001	0.05	0.1
Pb	0.001	0.1	0.2	0.001	0.1	0.2
Se	0.041	4.1	20	0.005	0.5	2.5
Sr	5.41	0.8	2.7	5.81	0.83	2.9
Cr	0.001	0.02	0.02	0.001	0.02	0.02
Zn	0.029	0.03	2.9	0.005	0.005	0.5
Z_c		35.4	162		32.2	61.7

Примечание: 1 и 3 – сравнение с ПДК питьевых вод; 2 и 4 – сравнение с ПДК рыбохозяйственных вод.

сферные, поверхностные, подземные, техногенные), относительно любых российских и зарубежных нормативных показателей (питьевые, рыбохозяйственные, требования СанПиН, СНиП, ВОЗ, США, ЕС и др.), по набору любых компонентов и прост в реализации и интерпретации результатов.

Оба использованных метода показали, что воды р. Кадамовка в Восточном Донбассе характеризуются высоким уровнем загрязнения, и необходимо принятие эффективных мер по совершенствованию очистных технологий и реабилитации сложившегося положения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую благодарность за помощь в выполнении настоящих исследований доцентам Е.А. Ныркову и Г.Н. Даниловой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гавришин А.И.* Состояние окружающей среды в районе угольных шахт Восточного Донбасса // Горный журнал. 2018. № 1. С. 92–96.
2. *Гавришин А.И.* Оценка качества химического состава поверхностных вод в Восточном Донбассе // Геоэкология. 2019. № 4. С. 61–67. https://doi.org/10.31857/S0869-78092019461-67
3. *Закруткин В. Е., Скляренко Г. Ю., Гибков Е. В.* Особенности химического состава и степень загрязненности подземных вод углепромышленных районов Восточного Донбасса // Известия ВУЗов. Северокавказский регион. Сер. Естественные науки. 2014. № 4. С. 73–77.
4. *Закруткин В.Е., Скляренко Г.Ю., Родина А.О.* О загрязнении подземных вод Восточного Донбасса // Современные тенденции развития науки и технологий. 2015. № 8-1. С. 47–50.
5. *Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М.* Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: Наука, 2004. 677 с.
6. *Небел Б.* Наука об окружающей среде. Как устроен мир. М.: Мир, 1993. 508 с.

7. *Gavrishin A.I.* Quality of surface water in Eastern Donbass, Russia // Int. Conference "Process Management and Scientific Developments". Birmingham. United Kingdom. June 9/2020/ P. 111–116. https://doi.org/10.34660/INF.2020.34.82/001
8. *Gavrishin A.I.* Features of the chemical composition of groundwater in the Eastern Donbass, Russia // Int. University Science Forum "Science. Education. Practice". Canada, Toronto. 2020. Part 1. P. 162–168.
9. *Giulio D.C., Jackson R.B.* Impact to Underground Sources of Drinking Water and Domestic Wells from Production Well Stimulation and Completion Practices in the Pavilion, Wyoming, Field // Environmental Science and Technology. 2016. V. 50 (8). P. 4524–4536.
10. *Pfunt H., Houben G., Himmelsbach T.* Numerical modeling of fracking fluid migration through fault zones and fractures in the North German Basin // Hydrogeology Journal. 2016, V. 1. № 24 (60). P. 1343–1358.
11. *Zakrutkin V.E., Sklyarenko G.Y.* The influence of coal mining on groundwater pollution (Eastern Donbass) // International multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 15th. 2015. P. 927–932.

COMPARATIVE ANALYSIS OF TWO METHODS FOR ASSESSING WATER QUALITY

A. I. Gavrishin#

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) ul. Prosveshcheniya, 132, Novocherkassk, Rostov-on-Don Region, 346428, Russia

#E-mail: agavrishin@rambler.ru

The aim of the research is to characterize the effectiveness of the two most popular methods of assessing the degree of water pollution, to identify their pros and cons in environmental tasks. The comparison is made for two ways: "A comprehensive assessment of surface water pollution by hydrochemical indicators" and "Assessment of the quality of water chemistry by the total pollution indicator". The effectiveness of the methods is shown on the example of the chemical composition of the waters of river Kadamovka (Eastern Donbass) above, in the place and below the discharge of mine waters m. Glubokala on the 21st limited indicator. According to the first method regarding the requirements for MAC for fisheries water management, the river water is classified as extremely dirty. High levels of contamination are typical for the main number of ingredients, especially SO_4, Al, Li, Mn, Se, Fe, Be, Cu; According to the second method of drinking water requirements, the situation is assessed from an environmental point of view as a "crisis" and the requirements for fisheries water are considered a "disaster". The most intense pollution was recorded by Mn, Al, Fe, Be, Li, Se, M, SO_4. Comparison of water quality by the total pollution indicator on the requirements of Russia, the United States and the European Union showed close results. "The method of comprehensive assessment of surface water pollution by hydrochemical indicators" allows effective assessment of surface water pollution. This method requires a series of monitoring observations over time, assesses water pollution only by MAC to fisheries water use, relatively difficult to implement. The method "Assessment of the quality of the chemical composition of water by the total pollution indicator" makes it possible to assess the quality of the chemical composition of any types of water (atmospheric, surface, underground, man-made), relative to any Russian and foreign regulatory indicators (drinking, fisheries, requirements of WHO, USA, EU, etc.), on the set of any components. It is easy to implement and interpret the results. The paper made recommendations on the need to improve treatment technologies and carry out rehabilitation measures.

Keywords: *water pollution*, *total pollution indicator*, *fisheries and drinking water*, *Eastern Donbass*

REFERENCES

1. Gavrishin, A.I. *Sostolanie okruzhayushchei sredy v raione ugol'nykh shakht Vostochnogo Donbassa* [The state of the environment in the coal mines of Eastern Donbass]. *Gornyi zhurnal – Mine Journal,* 2018, no. 1, pp. 92–96. (in Russian)
2. Gavrishin, A.I. *Otsenka kachestva khimicheskogo sostava poverkhnostnykh vod v Vostochnom Donbasse.* [Assessment of the quality of the surface water chemical composition in the Eastern Donbass]. *Geoekologiya*. 2019, no. 4, pp. 61–67. https://doi.org/10.31857/S0869-78092019461-67 (in Russian)
3. Zakrutkin, V.E., Scllarenko, G.Yu., Gibkov, E.V. *Osobennosti khimicheskogo sostava i stepen' zagrlaznennosti podzemnykh vod uglepromyshlennykh raionov Vostochnogo Donbassa* [Features of chemical composition and the degree of contamination of groundwater coal-industrial areas of Eastern Donbass]. *Isvestiya vusov. Severo-kavkazskii region*. 2014, no. 4, pp. 73–77. (in Russian)
4. Zakrutkin, V.E., Sklyarenko, G.Yu., Rodina, A.O. *O sagrlaznenii podzemnykh vod Vostochnogo Donbassa* [On the pollution of groundwater in the East Donbass]. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii* [Modern trends in the development of science and technology]. 2015, no. 8-1, pp. 47–50. (in Russian)

5. Krainov, S.R., Ryzhenko, B.N., Shvets, V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod* [Groundwater geochemistion]. Moscow, Nauka Publ., 2004, 677 p. (in Russian)
6. Nebel, B. *Nauka ob okruzhayushchei srede. Kak ustroen mir* [The science on the environment. How the world works]. Moscow, Mir, 1993. 508 p. (in Russian)
7. Gavrishin, A.I. Quality of surface water in Eastern Donbass, Russia. Int. Conference "Process Management and Scientific Developments". Birmingham. United Kingdom. June 9.2020, pp. 111–116. https://doi.org/10.34660/INF.2020.34.82/001
8. Gavrishin, A.I. Features of the chemical composition of groundwater in the Eastern Donbass, Russia. Int. University Science Forum "Science. Education. Practice". Canada, Toronto. 2020. Part 1, pp. 162–168.
9. Giulio, D.C., Jackson, R.B. Impact to Underground Sources of Drinking Water and Domestic Wells from Production Well Stimulation and Completion Practices in the Pavilion, Wyoming, Field. Environmental Science and Technology. 2016, vol. 50 (8), pp. 4524–4536.
10. Pfunt, H., Houben, G., Himmelsbach, T. Numerical modeling of fracking fluid migration through fault zones and fractures in the North German Basin. Hydrogeology Journal. 2016, vol. 24 (60), pp. 1343–1358.
11. Zakrutkin, V.E., Sklyarenko, G.Y. The influence of coal mining on groundwater pollution (Eastern Donbass). Int. multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 15th. 2015, pp. 927–932.

ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2021, № 2, с. 67–74

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 556.535.8

ВЛИЯНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ДАМБЫ ХВОСТОХРАНИЛИЩА В БАССЕЙНЕ РЕКИ СУНГАРИ (КНР) НА КАЧЕСТВО ВОД АМУРА У ХАБАРОВСКА В АПРЕЛЕ 2020 ГОДА

© 2021 г. В. П. Шестеркин*

ХФИЦ Институт водных и экологических проблем ДВО РАН (ИВЭП ДВО РАН), ул. Дикопольцева, 56, Хабаровск, 680000 Россия

**E-mail: shesterkin@ivep.as.khb.ru*

Поступила в редакцию 24.08.2020 г.
После доработки 25.12.2020 г.
Принята к публикации 10.01.2021 г.

Рассмотрено влияние разрушения дамбы на хвостохранилище в Китае 29.03.2020 г. в верхнем течении р. Ицзими (бассейн р. Сунгари, КНР) на качество воды в р. Амур и протоке Амурская. Авария вызвала значительный подъем уровня воды в р. Сунгари, а соответственно и в р. Амур, оказала влияние на химический состав вод реки и протоки выше г. Хабаровска. По результатам многолетних исследований ИВЭП ДВО РАН, для Амура характерно неравномерное распределение содержания растворенных веществ в створе реки, обусловленное химическим составом и расходами воды основных притоков. В основном русле Амура не было зафиксировано резких различий в содержании растворенных веществ, но в его левобережной части отмечены более высокие значения их концентраций, чем в зимнюю межень. При наибольшем уровне воды в Амуре, в левобережной части протоки Амурская установлены максимальные концентрации Na^+, SO_4^{2-} и Cl^-, нитратного азота, нефтепродуктов. При спаде уровня воды отмечено постепенное снижение содержания растворенных веществ, причем в протоке и правобережной части р. Амур в большей степени, чем на других участках. Сделано предположение, что основное количество растворенных веществ в апреле 2020 г. поступило в р. Амур с водами р. Сунгари.

Ключевые слова: *дамба*, *хвостохранилище*, *р. Амур*, *протока Амурская*, *качество воды*, *основные ионы*, *нитратный азот*, *нефтепродукты*

DOI: 10.31857/S0869780921020089

ВВЕДЕНИЕ

Река Амур – одна из крупнейших трансграничных рек Евразии. Общая площадь водосборного бассейна 1855 тыс. км^2, в том числе 832 тыс. км^2 в пределах КНР (в основном бассейн р. Сунгари).

Активизация хозяйственной деятельности в китайской части бассейна Амура оказывает большое влияние на качество вод реки, являющихся основным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения городов Хабаровск, Амурск и Комсомольск-на-Амуре. Например, наиболее остро трансграничное загрязнение проявилось в воде Амура ниже устья р. Сунгари в декабре 2005 г., когда из-за аварии на химическом комбинате China National Petroleum Corporation в г. Цзилинь отмечалось загрязнение воды нитробензолом и наличие “химического” запаха воды и рыбы [9, 10].

Разрушение 28.03.2020 г. дамбы хвостохранилища горнодобывающей компании Yichun Luming Mining Co Ltd, ведущей освоение молибденовых месторождений в провинции Хэйлунцзян (КНР), вызвало поступление в р. Ицзими, а затем и в р. Хуланьхэ (приток р. Сунгари) 2.5 млн м^3 воды загрязненных молибденом, нефтепродуктами, взвешенными и другими веществами. Китайской стороной были приняты меры по снижению негативных последствий аварии: на реках возводились дамбы и боновые ограждения, население расположенных вдоль рек поселений обеспечивалось бутилированной водой [1].

Серьезные катастрофы, вызванные разрушением дамб хвостохранилищ сильными дождями или сейсмическими проявлениями, характерны для горнодобывающих районов многих стран. Наиболее крупные из них, повлекшие за собой человеческие жертвы, а также загрязнение речных вод и больших площадей земель, произошли в бразильском штате Минас-Жерайс в 2015 и 2019 гг. [5].

Исследования в горнорудных районах юга Дальнего Востока свидетельствуют о влиянии техногенеза и антропогенной деятельности на трансформацию химического состава речных вод, появлении высокоминерализованных сульфатно-магниево-кальциевых вод с высоким содержанием литофильных и халькофильных эле-

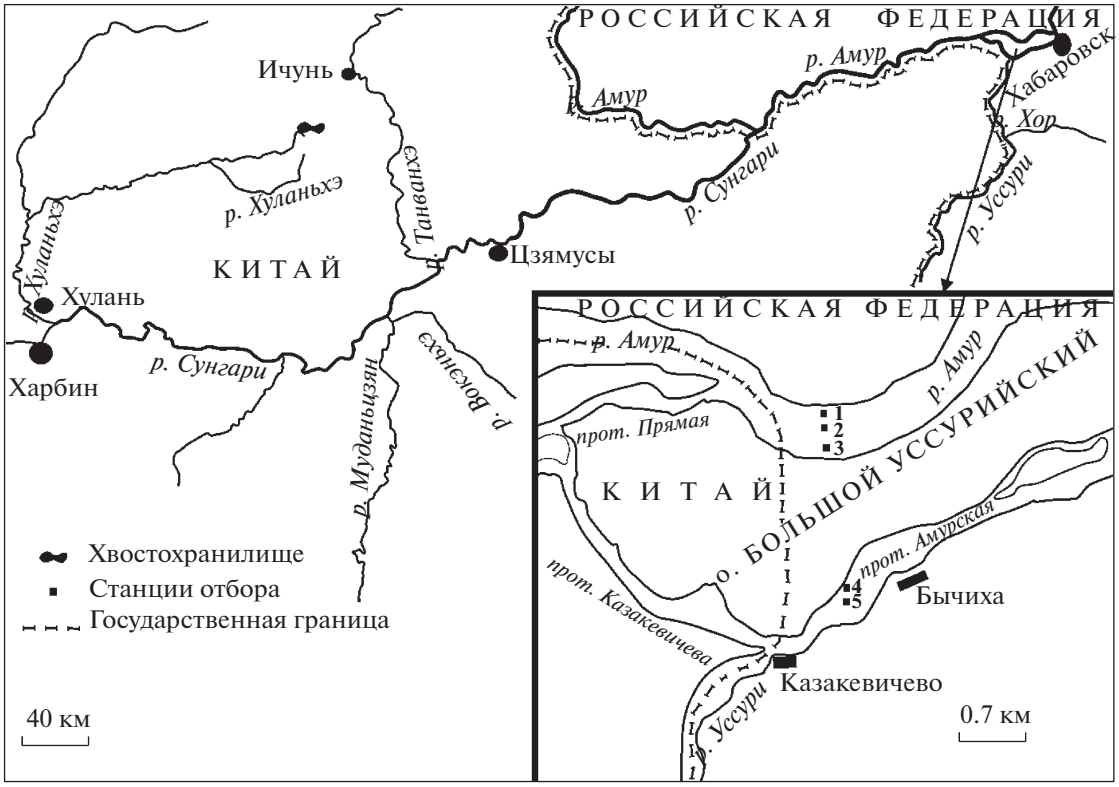


Рис. 1. Схема района исследований.

ментов [2, 7]. Кроме того, использование взрывчатых веществ для дробления горных пород обусловливает повышенное содержание нитратного и нитритного азота в водных объектах [7]. На месторождениях Нижнего Приамурья, где используется цианид натрия для извлечения цветных металлов, воды хвостохранилищ характеризуются высокой минерализацией (>1.2 г/дм^3), хлоридно-натриевым составом и значительным загрязнением нитритами [8].

В бассейне Амура техногенные катастрофы подобного характера и масштаба ранее не случались. Поэтому Комиссией по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и обеспечению пожарной безопасности Правительства Хабаровского края были определены места и сроки отбора проб воды, длительность прохождения “пятна” у г. Хабаровск, которое по расчетам специалистов Росгидромета могло появиться после 20.04.2020 г. [4].

Цель исследования – оценить влияние аварии на хвостохранилище в Китае на качество вод Амура на основе мониторинга содержания основных ионов, биогенных веществ и нефтепродуктов в р. Амур и протоке Амурская. Результаты этих наблюдений и представлены в данной работе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Следует отметить, что в формировании химического состава вод Амура у Хабаровска принимают участие такие крупные водотоки, как Зея, Бурея, Сунгари и Уссури. В зависимости от состава вод этих рек концентрации растворенных веществ по ширине Амура варьируют в больших пределах. Поэтому ниже отдельно рассмотрено формирование качества воды в той или иной части русла Амура и протоки Амурская.

Гидрохимические исследования на р. Амур впервые за период наблюдений проводили во время ледохода (20–24 апреля 2020 г.) вблизи государственной границы в левобережной, средней и правобережной части русла (станции отбора 1–3).

В левобережной части и на середине (станции 4, 5) протоки Амурская, в которую воды Амура поступают при высоком уровне по протоке Казакевичева (протока Фуюаньская после демаркации российско-китайской границы в 2005 г.), наблюдения осуществляли выше с. Бычиха после ледохода.

Расположение станций отбора проб воды представлено на рис. 1.

В работе также использовали данные мониторинга химического состава вод Амура в левобережной, средней и правобережной части реки ниже устья протоки Амурская, полученные в марте 2020 г.

Образцы воды отбирали с поверхности, общее количество проб – 20. Значения pH и перманганатной окисляемости, содержание основных ионов, биогенных и органических веществ в воде определяли по методикам, в соответствии с РД

52.18.595–96[1] в Центре коллективного пользования при ИВЭП ДВО РАН.

При оценке степени загрязненности воды использовали предельно допустимые концентрации (ПДК) веществ водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования согласно Гигиеническим нормативам ГН 2.2.5.1315-03[2].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Гидрологический режим водных объектов в районе г. Хабаровск в зимнюю межень и в начале ледохода довольно сложен. Зимой при низких уровнях воды Амура, сток в протоке Казакевичева отсутствует, в результате чего химический состав воды в протоке Амурская в районе с. Казакевичево не отличается от химического состава вод р. Уссури. Воды же Амура в это время выше Хабаровска из-за влияния р. Сунгари характеризуются более высоким содержанием основных ионов, нитратного и аммонийного азота в правобережной части русла, чем в левобережной части.

В апреле 2020 г. гидрологический режим р. Амур у Хабаровска (рис. 2) характеризовался ранним началом ледохода (15.04) на 3–5 дней раньше обычного срока при относительно высоком уровне воды (203 см). Для сравнения отметим, что в период 2016–2019 гг. в апреле месяце фиксировались более низкие максимальные значения уровней воды (до 136 см).

В условиях стабильных расходов воды зарегулированных рек Зея и Бурея повышению водности Амура в период проведения мониторинга могла способствовать авария на хвостохранилище в Китае 29.03.2020 г. в бассейне р. Сунгари. Подъем уровня воды в р. Сунгари, привел к поступлению вод Амура по протоке Казакевичева в протоку Амурская.

Воды протоки Амурская (по данным мониторинга в апреле 2020 г.)[3] характеризуются нейтральными значениями pH (табл. 1) и крайне неоднородным распределением концентраций растворенных веществ по ширине (рис. 3) из-за

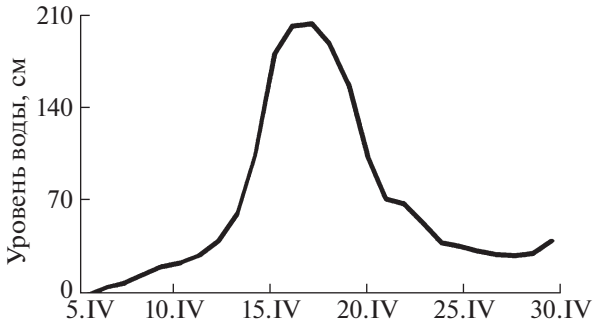


Рис. 2. Уровень воды р. Амур у г. Хабаровск в апреле 2020 г.

больших различий в химическом составе вод рек Амур (в правобережной части представленных водами р. Сунгари) и Уссури, которые определяют соответственно химический состав левобережной части протоки. Поэтому в левобережной части протоки содержание основных ионов и нитратного азота было выше, чем на середине (см. табл. 1).

В условиях высокой водности наибольшие различия (в 3 и более раза) концентраций отмечались для Na^+ и Cl^-. Несколько меньше отличались содержания Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^-, SO_4^{2-} и нитратного азота. Максимальные концентрации Na^+, Cl^- и наблюдались в начале мониторинга, причем их значения были выше, чем в воде р. Амур в марте 2020 г. (табл. 2). Такие особенности химического состава воды в левобережной части протоки могли быть также обусловлены влиянием вод хвостохранища, в котором после флотации молибденита аккумулировалось большое количество солей.

За время проведения мониторинга содержание Na^+, Cl^-, SO_4^{2-} и нитратного азота в воде постепенно снижалось, причем в левобережной части протоки в большей степени, чем в средней (см. рис. 3).

Концентрации остальных биогенных веществ были низкими, причем нитритного азота постоянно, а минерального фосфора и аммонийного азота в ряде случаев даже ниже предела обнаружения. В отличие от основных ионов, наибольшее содержание последних двух веществ, а также кремния, отмечалось на середине протоки.

Иная ситуация была характерна для растворенного железа, максимальное содержание которого, не превышающее 0.17 мг/дм^3, постоянно наблюдалось в левобережной части протоки (см. табл. 1).

Содержание органических веществ изменялось в узких пределах. Незначительное повышение значений перманганатной окисляемости отмечалось в левобережной части протоки в тече-

[1] РД 52.18.595-96 Федеральный перечень Методик выполнения измерений, допущенных к применению при выполнении работ в области мониторинга загрязнения окружающей природной среды (с Изменениями N 1, 2, 3, 4). URL: http://docs.cntd.ru/document/1200036098

[2] Гигиенические нормативы ГН 2.2.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. URL: http://docs.cntd.ru/document/901862249

[3] К сожалению, данные о концентрации ионов натрия, хлоридного, сульфатного и нитратного ионов и др. до аварии в протоке Амурская выше с. Бычиха в статье отсутствуют, так как исследуемый участок относится к приграничным (см. рис. 1), где наблюдения проводятся очень редко.

Таблица 1. Изменение химического состава воды протоки Амурская с период с 18 по 24 апреля 2020 г. в левобережной (ЛБ) и средней (С) части русла

Показатель, ед. измерения	18.04		20.04		23.04		24.04	
	ЛБ	С	ЛБ	С	ЛБ	С	ЛБ	С
pH, ед.	6.8	7.0	7.1	7.1	7.2	7.2	7.2	7.2
Цветность, градус	20	33	48	45	34	30	31	29
Na^+, мг/дм^3	10.6	3.2	10.1	2.6	7.8	2.6	8.3	2.0
K^+, мг/дм^3	1.7	1.2	2.0	1.0	1.7	1.0	1.9	0.8
Ca^{2+}, мг/дм^3	13.0	5.1	13.0	5.1	10.9	4.6	11.4	4.2
Mg, мг/дм^3	3.8	2.3	4.3	1.8	3.3	2.6	4.1	2.0
HCO_3^-, мг/дм^3	46	22	48	17	43	19	46	19
Cl, мг/дм^3	7.4	3.2	7.8	1.4	6.2	1.5	6.5	1.3
SO_4^{2-}, мг/дм^3	16.2	6.5	11.7	3.6	12.2	6.5	10.4	6.1
NH_4^+, мг/дм^3	0.084	0.13	<0.05	0.081	0.053	<0.05	<0.05	0.053
NO_3^-, мг/дм^3	3.9	2.0	4.7	2.6	3.2	2.3	1.9	2.5
HPO_4^{2-}, мг/дм^3	<0.03	0.05	<0.03	0.05	0.03	0.04	<0.03	0.03
Нефтепродукты, мг/дм^3	0.020	0.016	0.020	0.017	0.015	0.012	0.015	0.011
Перманганатная окисляемость, мг O/дм^3	7.7	6.4	7.7	5.8	8.6	6.7	8.3	6.1
Si, мг/дм^3	2.9	3.3	2.9	4.4	3.0	4.4	2.4	4.3
Fe, мг/дм^3	0.128	0.078	0.168	0.165	0.142	0.108	0.126	0.094
Минерализация, мг/дм^3	102.6	45.5	101.6	35.1	88.3	40.1	90.5	37.9

ние всего мониторинга, а цветности воды – с 20 апреля. Концентрации нефтепродуктов не превышали значения ПДК (0.3 мг/дм^3), достигали наибольших значений в левобережной части протоки при максимальном уровне воды, что также может свидетельствовать о привносе этих веществ водами р. Сунгари.

В воде р. Амур во время наблюдений отмечались нейтральные значения pH и неравномерное распределение концентраций растворенных веществ по ширине створа реки (рис. 4) в результате большого влияния вод р. Сунгари на правобережную часть Амура, а рек Зея и Бурея – на левобережную. Поэтому максимальные концентрации основных ионов, нитратного и аммонийного азота выше г. Хабаровск были характерны для правобережной части Амура [9], а ниже устья протоки Амурская – для правобережной или средней его части (см. табл. 2).

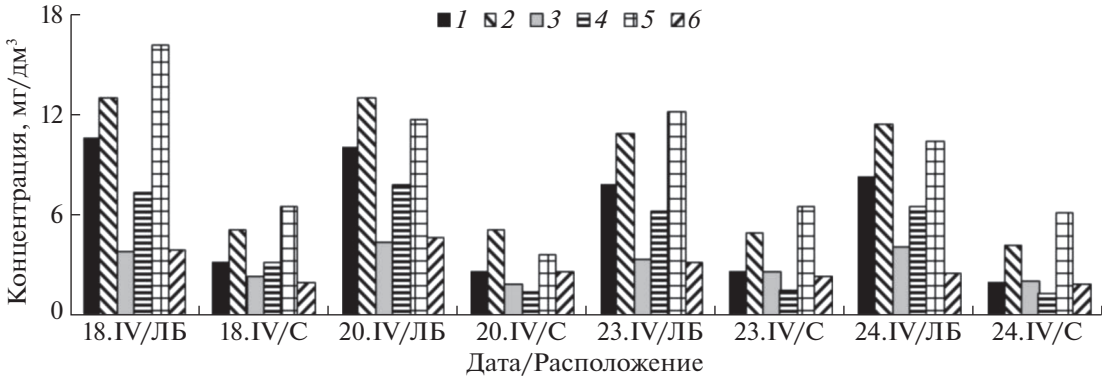


Рис. 3. Распределение содержания Na^+ (1), Ca^+ (2), Mg^{2+} (3), Cl^- (4), SO_4^{2-} (5) и NO_3^- (6) в воде левобережной (ЛБ) и средней (С) части протоки Амурская выше с. Бычиха в апреле 2020 г.

Таблица 2. Химический состав воды р. Амур ниже устья протоки Амурская в марте и в районе о. Большой Уссурийский в апреле 2020 г. в правобережной (ПБ), средней (С) и левобережной (ЛБ) части русла

Показатель, ед. измерения / Дата, расположение	13.03			20.04			22.04			23.04			24.04		
	ПБ	С	ЛБ	ПБ	С	ЛБ	ПБ	С	ЛБ	ПБ	С	ЛБ	ПБ	С	ЛБ
pH, ед.	7.2	7.8	7.5	7.2	6.9	6.8	6.9	6.9	6.3	7.1	7.0	6.6	6.9	7.1	7.2
Цветность, градус	8	37	47	29	30	32	44	45	39	30	32	35	39	41	41
Na^+, мг/дм^3	8.0	9.5	5.0	8.9	6.6	6.6	6.6	4.3	4.3	6.6	5.5	4.3	6.0	4.3	4.3
K^+, мг/дм^3	2.5	1.9	1.4	1.7	1.7	1.2	1.7	1.2	1.2	1.7	1.5	1.2	2.0	1.2	1.2
Ca^{2+}, мг/дм^3	14.3	14.3	10.1	11.8	10.5	10.1	10.5	8.4	8.4	10.1	8.4	8.0	9.3	7.6	7.6
Mg, мг/дм^3	5.4	4.1	3.1	4.1	3.3	3.1	2.8	2.3	2.3	3.1	2.6	2.6	3.6	2.6	2.3
HCO_3^-, мг/дм^3	62	58	37	46	41	41	41	34	36	39	36	34	36	34	31
Cl, мг/дм^3	4.7	5.7	2.6	6.8	5.0	5.0	5.3	3.4	3.4	5.1	3.9	2.9	4.4	2.7	2.7
SO_4^{2-}, мг/дм^3	10.0	15.0	7.5	12.7	12.9	8.9	11.5	8.4	7.1	12.0	10.5	6.7	7.8	8.6	5.6
NH_4^+, мг/дм^3	0.16	0.16	0.09	0.08	0.10	0.06	0.07	0.06	0.07	<0.05	0.06	0.07	0.05	<0.05	<0.05
NO_3^-, мг/дм^3	2.2	4.2	2.5	3.2	3.5	2.5	3.2	2.2	2.2	2.1	2.2	1.5	1.5	1.5	1.0
HPO_4^{2-}, мг/дм^3	0.04	<0.03	<0.03	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.03	<0.03
Нефтепродукты, мг/дм^3	–	–	–	0.017	0.016	0.017	0.015	0.008	0.010	0.014	0.018	0.013	0.013	0.009	0.015
Перманганатная окисляемость, мг O/дм^3	3.9	7.8	9.0	7.0	10.6	6.4	9.9	9.6	9.6	9.0	9.0	9.0	9.9	9.9	8.3
Si, мг/дм^3	6.1	4.9	4.5	3.2	3.2	3.2	2.9	3.1	3.0	3.0	3.0	3.1	2.6	2.9	2.9
Fe, мг/дм^3	0.07	0.14	0.23	0.13	0.14	0.15	0.18	0.21	0.14	0.12	0.14	0.15	0.15	0.19	0.19
Минерализация, мг/дм^3	127.4	113.0	69.6	95.4	84.7	78.7	82.8	64.8	65.5	79.8	70.8	61.5	70.9	62.8	55.9

Более высоким, чем в марте 2020 г. (т.е. до аварии на хвостохранилище), было содержание Na^+, Cl^- и SO_4^{2-} в левобережной части русла Амура и в начале мониторинга (см. табл. 2). В апреле 2020 г. концентрации этих веществ в воде Амура были ниже по сравнению с левобережной частью протоки Амурская, незначительно они различались и по ширине реки (см. рис. 4). Такие особенности распределения концентраций основных ионов по ширине реки в свою очередь свидетельствуют о значительном преобладании стока р. Сунгари в стоке Амура.

Содержание биогенных веществ, за исключением нитратного азота, в воде р. Амур, также как в протоке Амурская, низкое. Концентрации нитритного азота постоянно, а аммонийного азота и минерального фосфора на спаде уровня воды были ниже предела обнаружения. В более узких пределах, чем в зимнюю межень, в воде изменялось содержание кремния (см. табл. 2). Максимальным содержанием растворенного железа за счет влияния окрашенных вод Зеи и Буреи характеризовалась левобережная часть Амура. Концентрации органических веществ по ширине Амура распределялись относительно равномерно. Значения перманганатной окисляемости и цветности воды на спаде уровня воды достигали максимума, были выше, чем в протоке Амурская. Содержание нефтепродуктов было значительно ниже значения ПДК.

Специфический химический состав вод хвостохранища, загрязненных молибденом, дает повод привести некоторые сведения о содержании Mo в водах р. Амур. Хотя непосредственно в период мониторинга содержание Mo в водных объектах автором не определялось, использованы данные других организаций.

Заметим, что в работе [6] приводятся данные по содержанию растворенных форм Mo в воде р. Сунгари в интервале (1.16–1.52 мкг/дм^3). По результатам исследований в бассейне Амура в 2011–2017 гг. [11], концентрации растворенных форм Mo составляли в основном десятые доли мкг/дм^3 с минимальными значениями в зимнюю межень и максимальными в период открытого русла. Распределение содержания Mo по поперечному профилю р. Амур на всех пунктах отбора

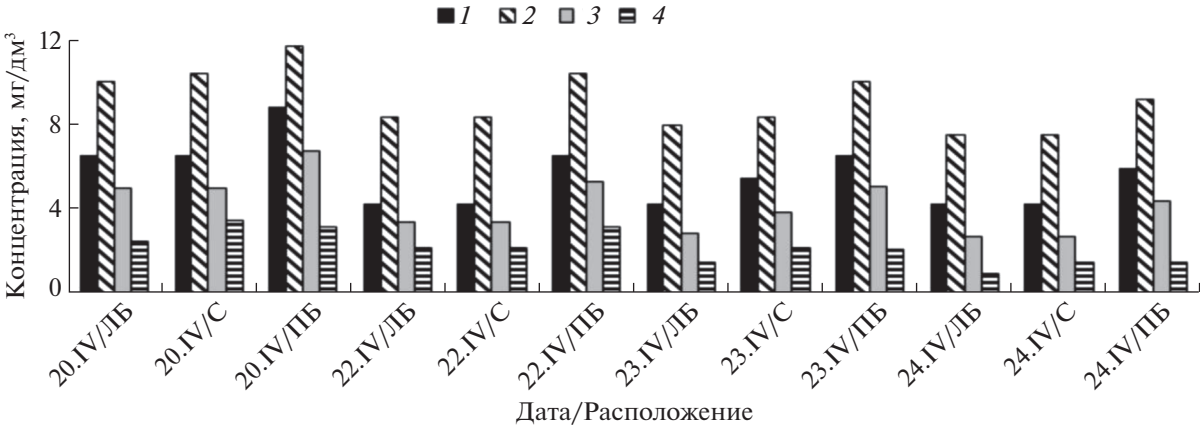


Рис. 4. Распределение содержания Na^+ (1), Ca^+ (2), Cl^- (3) и NO_3^- (4) в воде левобережной (ЛБ), средней (С) и правобережной (ПБ) части р. Амур у о. Большой Уссурийский в апреле 2020 г.

было относительно равномерным за исключением пункта ниже устья р. Сунгари, концентрации Mo у китайского берега всегда были выше по сравнению с российской частью: в 4.9 раза в феврале; в 2.6 раза в сентябре 2014 г., т.е. основное количество растворенных форм Mo, как правило, поступало в Амур с водами р. Сунгари.

По данным [3], в апреле 2020 г. содержание Mo в водах Амура и протоки Амурская варьировало в пределах 1.0–3.7 мкг/дм^3. Несмотря на то, что концентрации Mo были значительно ниже величины ПДК (250 мкг/дм^3), тем не менее, они заметно превышали значения в р. Амур у с. Нижнеленинское (ниже устья р. Сунгари) и в протоке Амурская в период 2011–2017 гг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты наблюдений свидетельствуют, что разрушение дамбы хвостохранилища в бассейне р. Сунгари не привело в апреле 2020 г. к ухудшению качества вод р. Амур и протоки Амурская. Предотвращению загрязнения воды способствовали, с одной стороны, мероприятия, предпринятые организациями Китая по ликвидации последствий разрушения дамбы (сооружение боновых ограждений, плотин и т.д.), и с другой стороны – разбавление вод хвостохранилища водами р. Сунгари и ее притоков (Майхэ, Муданцзян, Ваканьхэ и др.).

Анализ полученных материалов показывает, что максимальные концентрации Na^+, Cl^-, SO_4^{2-}, нитратного азота и нефтепродуктов, косвенно свидетельствующих о влиянии вод хвостохранилища, отмечались в начале наблюдений в левобережной части протоки Амурская в период наибольшего уровня воды в апреле.

В начале мониторинга в основном русле Амура не было зафиксировано резких различий в содержании растворенных веществ, но в левобережной части русла отмечены более высокие значения их концентраций, чем в зимнюю межень.

В период наблюдений содержание растворенных веществ постепенно снижалось, причем в левобережной части протоки Амурская и правобережной части Амура в большей степени, чем на остальных участках. Подобная динамика содержания исследуемых веществ свидетельствует о том, что основное их количество поступило в конце второй декады апреля с водами хвостохранилища.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авария на китайском молибденовом комбинате создала угрозу загрязнения Амура. https://nedradv.ru/nedradv/ru/page_news/?obj=afe40e961c5-cad0c084576a303430bc2 (дата обращения 20.07.2020)
2. *Аржанова В.С.* Влияние горнопромышленного техногенеза на речные воды // География и природные ресурсы. 2010. № 1. С. 39–44.
3. Загрязнившее реки в Китае пятно молибдена не дошло до Хабаровска. https://www.kommersant.ru/doc/4327898 (дата обращения 20.07.2020)
4. Остатки “пятна” из Китая к Хабаровску доплывут после 20 апреля. https://www.todaykhv.ru/news/society/26012 (дата обращения 20.07.2020).
5. По следам катастрофы в Бразилии. Чем чревато пренебрежение безопасностью хвостохранилищ. https://www.geoinfo.ru/product/analiticheskaya-sluzhba-geoinfo/po-sledam-katastrofy-v-brazilii-chem-chrevato-prenebrezhenie-bezopasnostyu-hvostohranilishch-40102.shtml (дата обращения 20.07.2020)
6. *Чудаева В.А., Шестеркин В.П., Чудаев О.В.* Микроэлементы в поверхностных водах бассейна реки Амур // Водные ресурсы. 2011. Т. 38. № 5. С. 606–617. https://doi.org/10.1134/S0097807811050034
7. *Шевцов В.М., Караванов К.П., Махинов А.Н., Кулаков В.В.* и др. Водные ресурсы горнорудных райо-

нов и их преобразование (Юг Дальнего Востока). Хабаровск: Изд-во ХГТУ. 1998. 159 с.

8. *Шестеркин В.П.* Влияние добычи и переработки рудного золота на качество речных вод Приамурья // Биогеохимические и экологические оценки техногенных экосистем бассейна реки Амур. Владивосток: Дальнаука, 1994. С. 98–105.
9. *Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М.* Особенности качества воды р. Сунгари // Геоэкология. 2009. № 1. С. 50–53.
10. *Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М., Форина Ю.А., Ри Т.Д.* Трансграничное загрязнение Амура в зимнюю межень 2005–2006 гг. // География и природные ресурсы. 2007. № 2. С. 40–44.
11. *Шестеркина Н.М., Шестеркин В.П., Таловская В.С., Ри Т.Д.* Пространственно-временная изменчивость содержания растворенных форм микроэлементов в водах реки Амур // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 3. С. 336–347. https://doi.org/10/31857/S0321059620020170

THE IMPACT OF THE TAILING POND DAM DESTRUCTION IN THE SUNGARI RIVER BASIN (CHINA) ON THE QUALITY OF THE AMUR RIVER WATER NEAR KHABAROVSK IN APRIL 2020

V. P. Shesterkin[#]

Institute of water and ecological problems, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, ul. Dikopol'tseva, 56, Khabarovsk, 680000 Russia

[#]*E-mail: shesterkin@ivep.as.khb.ru*

The paper considers the impact of the tailing dam destruction in the upper reaches of the Yizimi River (the Songhua River basin, China) on the quality of water in the Amurskaya channel and the Amur River above Khabarovsk in April 2020.The maximum concentrations of Na^+, SO_4^{2-} and Cl^-, nitrate nitrogen, and oil products were found in the left-bank part of the Amurskaya channel at the highest water level. At that time, there were no significant differences in the distribution of solute content in the water of the Amur River along its width; whereas the Amur River (according to the long-term research results) shows an uneven distribution of solutes due to different chemical composition and water flow rates in its main tributaries. The water inflow from the tailing dump caused the predominance of the Sungari River water in the Amur runoff, as a result of which the concentrations of Na, SO_4^{2-}, Cl^-, nitrate nitrogen, and petroleum products increased in the left-bank part of the Amurskaya channel as compared to February and March 2020. A gradual decrease in the content of dissolved substances is noted upon the low water level, this decrease being greater in the left-bank part of the Amurskaya channel and in the right-bank part of the Amur River than in other areas. It is assumed that in April 2020 the bulk of dissolved substances entered the Amur River with the Sungari River water.

Keywords: *destruction of the tailing pond*, *the Amur River*, *Amurskaya stream*, *water quality*, *major ions*, *nitrate nitrogen*, *petroleum products*

REFERENCES

1. *Avariya na kitaiskom molibdenovom kombinate sozdala ugrozu zagryazneniya Amura*. [The accident at the Chinese molybdenum plant endangered the Amur river]. https://nedradv.ru/nedradv/ru/page_news/?obj=afe40e961c5-cad0c084576a303430bc2 (accessed 20.07.2020). (in Russian)
2. Arzhanova, V.S. *Vliyanie gornopromyshlennogo tekhnogeneza na rechnye vody* [The impact of mining technogenesis on river waters]. *Geografiya i prirodnye resursy*. 2010, no. 1, pp. 39–44. (in Russian)
3. *Zagryaznivshee reki v Kitae pyatno molibdena ne doshlo do Khabarovska* [The molybdenum spill that contaminated Chinese rivers has not reached Khabarovsk]. https://www.kommersant.ru/doc/4327898 (accessed 20.07.2020). (in Russian)
4. *Ostatki "pyatna" iz Kitaya k Khabarovsku doplyvut posle 20 aprelya* [The residual spill from China will reach Khabarovsk after April 20]. https://www.todaykhv.ru/news/society/26012 (accessed 20.07.2020). (in Russian)
5. *Po sledam katastrofy v Brazilii. Chem chrevato prenebrezhenie bezopasnost'yu khvostokhranilishch*. [Tracing the Brazil catastrophe. What are the consequences of neglecting the safety of tailing dumps]. https://www.geoinfo.ru/product/analiticheskaya-sluzhba-geoinfo/po-sledam-katastrofy-v-brazilii-chem-chrevato-prenebrezhenie-bezopasnostyu-hvostohranilishch-40102.shtml (accessed 20.07.2020). (in Russian)
6. Chudaeva, V.A., Shesterkin, V.P., Chudaev, O.V. *Mikroelementy v poverkhnostnykh vodakh basseina reki Amur* [Trace elements in surface water of the Amur River basin]. *Vodnye resursy*. 2011, vol.38, no 5, pp. 606–617. DOI: 10.1134/S0097807811050034 (in Russian).
7. Shevtsov, V.M., Karavanov, K.P., Makhinov, A.N., Kulakov, V.V., et al. *Vodnye resursy gornorudnykh raionov i ikh preobrazovanie (Yug Dal'nego Vostoka)* [Water resources of mining regions and their transformation (South of the Far East)]. Khabarovsk, KhGTU Publ., 1998, 159 p. (in Russian)
8. Shesterkin, V.P. *Vliyanie dobychi i pererabotki rudnogo zolota na kachestvo rechnykh vod Priamur'ya* [The influ-

ence of mining and processing of ore gold on the quality of river waters in the Amur region]. *Biogeokhimicheskie i ekologicheskie otsenki tekhnogennykh ekosistem basseina reki Amur* [Biogeochemical and ecological assessments of technogenic ecosystems of the Amur river basin]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 1994, pp. 98–105. (in Russian)

9. Shesterkin, V.P., Shesterkina, N.M. *Osobennosti kachestva vody r. Sungari* [Water quality specifics in the Sungari River]. *Geoekologiya*, 2009, no 1, pp. 50–53. (in Russian)
10. Shesterkin, V.P., Shesterkina, N.M., Forina, Yu.A., Ri, T.D. *Transgranichnoe zagryaznenie Amura v zimnyuyu mezhen' 2005–2006 gg* [Transboundary pollution of the Amur River during the winter low-water period in 2005–2006]. *Geografiya i prirodnye resursy*, 2007, no. 2, pp. 40–44. (in Russian).
11. Shesterkina, N.M., Shesterkin, V.P., Talovskaya, V.S., Ri, T.D. *Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' soderzhaniya rastvorennykh form mikroelementov v vodakh reki Amur* [Space and time variations of the concentrations of dissolved forms of microelements in Amur river water]. *Vodnye resursy*, 2020, vol. 47, no. 3, pp. 336–347. DOI: 10/31857/S0321059620020170 (in Russian).

ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2021, № 2, с. 75–85

УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

УДК 550.84-026.564.3

Памяти доктора физико-математических наук, профессора В.П. Губатенко посвящается.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ФОСФОГИПСЕ ПРИ РЕШЕНИИ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

© 2021 г. В. Ю. Шигаев[1,*], Д. А. Шелепов[1,], А. Е. Хохлов[1,***], И. А. Меренов[2,****]**

[1] *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского”, ул. Астраханская, 83, г. Саратов, 410012 Россия*

[2] *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова”, пл. Театральная, 1, г. Саратов, 410012 Россия*

**E-mail: vital1969_08@mail.ru*

***E-mail: shelepov@renet.ru*

****E-mail: profsnab_hae@mail.ru*

*****E-mail: ivan_merenov@mail.ru*

Поступила в редакцию 24.08.2020 г.
После доработки 21.10.2020 г.
Принята к публикации 22.11.2020 г.

Крупнотоннажные отвалы фосфогипса, хранящиеся под открытым небом, оказывают крайне негативное влияние на геологическую среду. Их утилизация либо вторичное использование является достаточно актуальной задачей. В настоящее время в научной литературе публикуются материалы по переработке данного сырья в электрическом поле постоянного тока, но многие вопросы остаются освещенными недостаточно широко. В связи с этим, целью данной работы является изучение электрокинетических и электрохимических явлений, возникающих в фосфогипсе под действием электрического поля постоянного тока. Рассматриваются различные варианты насыщения исходных образцов дистиллированной водой и их последующая электрообработка в геоэлектрохимическом устройстве, разработанном на кафедре геофизики СГУ (патент № 47365 РФ, от 27.08.2005). В зависимости от времени пропускания постоянного тока, окислительно-восстановительной обстановки на электродах, минерализации порового электролита и с учетом способа растворения образцов установлена последовательность и объемы выделения жидкости на катоде и аноде. Зафиксировано аномально высокое содержание ряда химических элементов в прикатодном участке установки по сравнению с их исходной концентрацией. Минералого-петрографические, химические, рентгенофазовые и другие исследования зафиксировали изменение состава и структуры исследуемых образцов. Полученные данные важно учитывать при выборе режима электрообработки отходов для извлечения из них различных металлов. Наблюдаемые электроповерхностные явления предлагается использовать при решении ряда прикладных задач в области геоэкологии, например, при подборе веществ-коагулянтов, вводимых в качестве добавок для получения композитов на основе фосфогипса.

Ключевые слова: *фосфогипс*, *постоянный электрический ток*, *время пропускания тока*, *электрокинетические и электрохимические явления*, *изменение структуры и состава образцов*

DOI: 10.31857/S0869780921020090

ВВЕДЕНИЕ

Одной из проблем переработки фосфатной руды (апатит) является побочное образование фосфогипса. В отвалах промышленных предприятий по всему миру его скопилось более 200 млн т. Одним из объектов, осуществляющих переработку апатитов, является АО “Апатит”, расположенный в г. Балаково Саратовской обл., отвалы фосфогипса которого ежегодно увеличиваются до 2.67 млн т.

Хранение данного отхода на открытом воздухе в технически и морально устаревших хранилищах является причиной загрязнения окружающей среды. Вблизи мест хранения выявлены биогео-

химические аномалии с повышенным содержанием фосфора, фтора, серы, стронция, свинца и других элементов разного класса опасности. Загрязнению радиусом от нескольких десятков метров до десятков километров подвержены воздух, почвы и водные компоненты экосистем [10, 12, 15, 26 и др.]. Большие масштабы указанного явления связаны с газопылевой эмиссией и их выносом различными водными стоками на рельеф местности и в гидросеть [1]. Совместное нахождение веществ загрязнителей и органического вещества в почвах обусловливает "синергетический эффект долговременного загрязнения окружающей среды и ее отдельных компонентов" [16, с. 70].

В связи с этим, становится понятным интерес как отечественных, так и зарубежных исследователей, направленный на разработку способов утилизации и комплексного использования данного отхода для снижения экологической нагрузки на территории [7, 21, 25 и др.].

Тем не менее, широкое внедрение предложенных технологий в промышленности и сельском хозяйстве не всегда эффективно, а в ряде случаев экологически не безопасно. Например, применение материалов на основе фосфогипса в автодорожном строительстве из-за его повышенной растворимости в воде требует дополнительного физико-химического обоснования [18]. Прямое использование фосфоросодержащего сырья в качестве мелиоранта для непосредственного внесения в почву без предварительного обезвреживания ведет к гибели растений и почвенной фауны [16].

Требуется разработать системный подход к переработке и дальнейшему использованию фосфогипса при решении экологических проблем. В частности, выделение редкоземельных металлов (РЗЭ), дегидратация отходов, введение соответствующих коагулянтов и др. должны предшествовать утилизации и получению материалов с заданными физико-химическими свойствами.

Одним из перспективных направлений переработки фосфогипса является его взаимодействие с постоянным полем электрического тока, что позволяет решить рад прикладных задач и снизить неблагоприятное влияние данного отхода на окружающую среду [17, 22 и др.]. Однако в данных работах практически не уделяется внимания специфике электрокинетических и электрохимических процессов в исследуемом материале. В связи с этим ниже рассматриваются результаты физико-химического взаимодействия электрического тока и изучаемых образцов фосфогипса.

На электропреобразование структуры глинистых грунтов указывалось в работах [13, 24 и др.]. Наиболее полно, на взгляд авторов, указанные вопросы рассмотрены в монографиях [4, 6]. Важно отметить, что физические свойства и интенсивность электрокинетических, электрохимических процессов в них зависят от ряда факторов, в том числе от минерального состава исследуемой среды [11], а также от концентрации электролитов в поровом растворе [6]. Однако электроповерхностные явления, хорошо изученные для этих грунтов, в фосфогипсе имеют ряд особенностей.

Поэтому основная цель выполненных исследований – изучение электрокинетических и электрохимических явлений в образцах из отвалов АО "Апатит" при приложении к ним постоянного поля электрического тока.

Основное внимание авторами уделялось решению задач, связанных с оценкой электроосмотического переноса в заполненном водой капиллярно-пористом теле фосфогипса; электрохимическим концентрированием РЗЭ в образцах и дегидратацией фосфогипса, заключающейся в переводе растворимого гипса в плохо растворимые полугидрат и ангидрит.

Полученные материалы могут быть полезными при очистке отходов от РЗЭ и других металлов, снижении миграционной способности вредных компонентов в окружающую среду и способствовать уменьшению деградации природных ландшафтов вблизи промышленных предприятий по производству минеральных удобрений.

ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНЫХ ОБРАЗЦОВ

Макроскопически исходные образцы представляют собой не прочную, плохо сцементированную белую массу (образцы поддаются механическому разрушению руками). При обработке образцов соляной кислотой реакция "вскипания" не наблюдается, что говорит об отсутствии карбонатной составляющей [20].

По данным минералого-петрографических исследований шлифов, выполненных с помощью поляризационного микроскопа "Карл Цейс Аксиолаб А1 POL" в скрещенных (+) и параллельных (‖) николях, основная масса исходного вещества представлена беспорядочно расположенными кристаллами гипса (около 85%) и фосфатного вещества (15%). Размер кристаллов гипса варьирует от 0.4 до 0.01 мм и менее. Гипс образует волокнистые, призматические бесцветные кристаллы с отчетливо диагностируемой спайностью. Проведенные иммерсионные исследования позволили установить показатели преломления $n_g = 1.520$, $n_p = 1.524$, и низкое двупреломление ($n_g - n_p$), что отражается в наличии у минерала серой интерференционной окраски.

Фосфатное вещество пелитовой размерности, буроватого цвета равномерно распределено по всему образцу и располагается в межзерновом пространстве гипса. Определение оптических констант затруднено, но относительный показатель

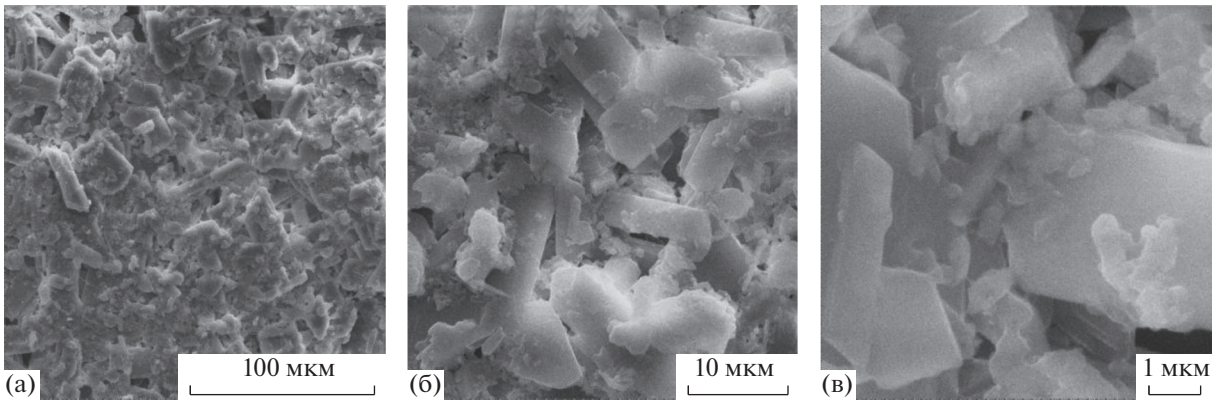


Рис. 1. Фотографическое изображение поверхности образца фосфогипса при различном увеличении: (а) – ×1000, (б) – ×5000, (в) – ×25000.

преломления довольно высокий (около $n = 1.600$), что характерно для минералов группы фосфатов.

Структура поверхности образца изучалась с помощью сканирующего электронного микроскопа Aspex Explorer, позволяющего получать увеличение 1000×, 5000× и 25000× (рис. 1). На рисунке хорошо видны игольчатые или плотные хорошо ограненные кристаллы с характерным “гипсовым углом”, с чистой ровной поверхностью в образце до электрообработки.

По результатам рентгенофазового анализа определен фазовый состав исходного образца (количество фаз, их примерное процентное соотношение и химический состав). На 84–85%, он выполнен гипсом ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), с межплоскостными расстояниями в кристаллической решетке (Å): 7.670; 4.280; 3.710; 3.054; 2.863 и т.д. В образце, возможно, присутствуют следы целестина ($SrSO_4$) ≈ 2–3%, межплоскостные расстояния (Å): = = 3.408; 3.286; 3.180 и аморфная фаза ≈12–14%.

Элементный состав рассматриваемого образца определялся на энергодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре EDX-720 (SHIMADZU), методом фундаментальных параметров. В табл. 1 приведены данные по содержанию химических элементов в исходных образцах, отобранных в разных участках техногенных отвалов. Анализы проведены на воздухе и в вакууме. Здесь же приведены относительные ошибки определения концентраций, рассчитанные по методике, изложенной в работе [2]. Полученные данные свидетельствуют о незначительной изменчивости вещественного состава исходного образца при его определении в различных средах, а также о малых величинах ошибок при проведении рентгенофлуоресцентных исследований.

Химический состав водорастворимой фракции определялся методом водной вытяжки. В дистиллированной воде объемом 1.5 л была на 30 сут замочена навеска исследуемого материала массой

Таблица 1. Элементный состав исходного образца фосфогипса

Элемент	Содержание, масса %				Относительная средняя квадратическая ошибка	
	замер 1 (вакуум)	замер 2 (воздух)	замер 3 (вакуум)	замер 4 (вакуум)	одного анализа (замеры 1, 2)/(замеры 3, 4)	среднего из двух анализов (замеры 1, 2)/(замеры 3, 4)
Ca	72.132	69.935	69.825	69.831	0.069/0.0059	0.048/0.0042
S	17.838	19.531	19.416	19.241		
Sr	7.027	6.524	6.655	6.599		
P	1.064	2.268	2.274	2.278		
Ba	1.046	0.885	0.867	0.856		
Ce	0.533	0.472	0.471	0.474		
Fe	–	–	0.264	0.295		
K	0.193	0.168	0.187	0.199		
Y	0.039	0.035	0.038	0.038		
Nd	0.127	0.183	0.183	0.151		
Cu	–	–	0.034	0.037		

Таблица 2. Результаты количественного химического анализа водной вытяжки исходного образца фосфогипса

Наименование показателя	Единицы измерения	Результаты испытаний
Массовая концентрация хлоридов	мг/дм^3	<10.0
Массовая концентрация сульфат-ионов	– “ –	1168 ± 175
Массовая концентрация гидрокарбонатов	– “ –	57.4 ± 6.3
Массовая концентрация кальция	– “ –	601 ± 66
Массовая концентрация фосфат-ионов	– “ –	45 ± 5
Общая жесткость (Ж)	мг.экв/л	30.0 ± 2.7

300 г. После чего жидкость была отфильтрована и передана на количественный химический анализ. По результатам, представленным в табл. 2, видно, что в жидкой фазе преобладают сульфаты и ионы кальция, как доминирующая компонента сухого образца. Подчиненное значение имеют фосфаты, карбонаты и хлориды. По общей жесткости водная вытяжка относится к категории жесткой.

МЕТОДИКА РАБОТ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПОСТОЯННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Эксперименты в электрическом поле постоянного тока были проведены с помощью устройства, разработанного на кафедре геофизики СГУ им. Н.Г Чернышевского (патент № 47365 РФ, бюллетень от 27.08.2005), для мониторинга физико-химических параметров образцов горных пород. Конструкция состоит из полого цилиндрического корпуса из инертного материала (пластмассы), объемом 255 см^3, угольных электродов, закрепленных с торцов крышками из диэлектрика с каналами для отвода фильтрата и газов (рис. 2). В ходе эксперимента технологические отверстия герметизировались крышками из инертного материала.

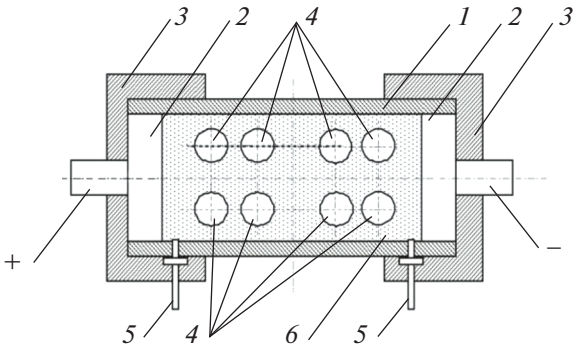


Рис. 2. Геоэлектрохимическое устройство для мониторинга физико-химических параметров горных пород. *1* – пластмассовый корпус; *2* – графитовые электроды (“+” и “–” анод и катод, соответственно); *3* – пластмассовые крышки; *4* – технологические отверстия для отбора проб и проведения дополнительных измерений; *5* – каналы для отвода жидких и газообразных флюидов; *6* – фосфогипс.

В корпусе выполнены 4 пары технологических отверстий диаметром не более 14 мм, расположенные на равномерном расстоянии друг от друга, но не менее 1/5 расстояния между электродами. Каждая пара отверстий выполнена друг против друга с расстоянием между их центрами не менее 29 мм. Наличие в конструкции технологических отверстий позволяет проводить мониторинг физико-химических параметров в исследуемых образцах по всей их длине [19].

Между электродами загружались предварительно измельченные и насыщенные дистиллированной водой пробы фосфогипса. Воздействие электрического поля на образцы обеспечивалось источником питания Б5-50 в режиме стабилизации тока. После электрообработки из устройства извлекались навески, их объем был достаточен для изготовления шлифов и последующего проведения минералого-петрографических, химических анализов. Сила тока в ходе эксперимента составляла 0.25 А, напряженность – 16.92 В/см, время электробработки последовательно увеличивалось и составляло (мин): 12; 36; 48; 72; 92; 144; 240; 960; 2400.

При проведении экспериментов важен этап наполнения исследуемого материала дистиллированной водой, перед загрузкой в устройство, который проводился двумя способами. В первом способе, насыщение образцов до полной влагоемкости проводилось непосредственно перед началом эксперимента, а их весовая влажность (W) составляла 75.3%.

Во втором способе образцы перед электрообработкой загружались в герметичную емкость, в которой замачивались в дистиллированной воде в течение 30 сут, их W была несколько выше – 76.5%, за счет растворения твердой фазы фосфогипса.

В каждом из рассмотренных случаев растворение образцов происходит в результате одновременного протекания двух процессов: разрушения структуры образца и гидратации частиц растворяемого вещества. При этом в капиллярно-пористом теле, заполненном водой, наблюдается об-

Таблица 3. Выделение электролитов из образцов с учетом способа их подготовки и времени эксперимента (сила тока 0.25 А)

Способ подготовки образцов	Время пропускания электрического тока, мин					
	12	36	48	72	92	144
	Приэлектродное пространство, на котором выделен электролит: К – прикатодное, А – прианодное					
Насыщение дистиллированной водой перед электрообработкой	–	К	К, А	К, А	А	–
Замачивание в дистиллированной воде в течение 30 сут	А	К, А	–	А	–	–

разование гидратных оболочек вокруг дисперсных частиц, что обусловлено наличием адсорбционных центров на их поверхности. Далее процесс гидратации грунта переходит к “осмотическому” впитыванию влаги из раствора и формированию диффузной части двойного электрического слоя (ДЭС), ионы которого вовлекают воду в электроосмотический поток [6]. Отметим, что в ходе реализации первого способа вокруг твердой фазы образуется относительно развитый ДЭС. Во второй ситуации происходит растворение гипса, концентрация порового раствора повышается и ДЭС сжимается.

Указанные особенности формирования ДЭС оказывают определяющее влияние на интенсивность электроосмоса в фосфогипсе, наблюдаемого при малых величинах электрического заряда, проходящего через образец (время пропускания тока ограничено 144 мин).

Подтверждением сказанному являются результаты, представленные в табл. 3, где отображена последовательность выделения жидкости в прикатодном и прианодном пространствах в зависимости от времени пропускания тока с учетом способа растворения образцов. В случае использования заранее замоченного образца, у которого сжаты обкладки ДЭС, выделение жидкости начинается и завершается при меньшем времени, затраченном на электробработку, нежели в образце с развитым ДЭС, подготовленном непосредственно перед экспериментом. Соответственно насыщение образцов водой по 2-му способу способствует менее интенсивному электроосмосу в образцах за счет роста (в течение 30 сут подготовки) концентрации электролита.

Известно [6], что формирование ДЭС в дисперсных грунтах обусловлено наличием у их частиц избыточного поверхностного электрического заряда. При изменении внешних условий в постоянном поле электрического тока, например, pH порового раствора, может произойти перезарядка знака поверхностного заряда частиц. По мере снижения pH исходный отрицательный заряд частиц дисперсных грунтов может смениться на положительный, что сопровождается коренной перестройкой ДЭС и сменой направления потока электроосмоса с катодного на анодное.

Отмеченный факт отражается и на величине весовой влажности образцов по окончании электрообработки, которая не зависит от способа их насыщения водой и составляет 65.7%. При этом она закономерно возрастает от прикатодной области $W = 63.6\%$ и середины образца $W = 64.2\%$ до прианодного участка, где $W = 69.9\%$.

Объем электроосмотического фильтрата Q (мл), выделившегося на электродах, оценивался по окончании эксперимента, время проведения которого составляло 144 мин (8640 с) при силе тока 0.25 А. Так в образце, насыщенном дистиллированной водой перед электрообработкой, он составил 3.1 мл, из них 1.3 мл собрано на аноде и 1.8 мл на катоде. В образце, замоченном заранее, – 3.2 мл, из них анод – 2.0 мл, катод – 1.2 мл, что указывает на схожие показатели выделения фильтрата в сравниваемых образцах, которая регистрируется как интегральный эффект сложных движений в каждом из капилляров.

Полученные данные позволяют рассчитать коэффициент электросмоса ($K_{эо}$), который определялся по формуле, предложенной в работе [2]:

$$K_{эо} = \frac{QL}{tV_{напр}Sn},$$

где L и S – соответственно длина и площадь поперечного сечения геоэлектрохимического устройства, равные 13 см и 18.8 см^2; $V_{напр}$ – напряжение в сети источника тока, составлявшее 220 В; n – относительный коэффициент открытой пористости образца, который по данным метода определения коэффициента открытой пористости жидкостенасыщением равнялся 0.455. Согласно расчетам $K_{эо} = 0.25 \cdot 10^{-5}$ см^2/В с, что хорошо согласуется с данными [4, 6 и др.].

Прекращение выделения порового электролита связано с увеличением его минерализации с 227 мг/дм^3 у исходного образца до 3950 мг/дм^3 у катода и 4910 мг/дм^3 у анода за счет постепенного растворения солей. Большое влияние на снижение интенсивности электроосмоса оказывает защелачивание и закисление приэлектродных об-

Таблица 4. Содержание химических элементов в фосфогипсе до и после электробработки на катоде по данным рентгенофлюоресцентного анализа (время электрообработки 2400 мин)

Элемент	Исходный образец, содержание, масса %	Катод, содержание, масса %
Ca	69.459	73.204
Sr	6.095	6.293
Ba	0.821	0.877
Ce	0.561	1.280
Fe	0.312	2.064
K	0.723	0.763
Nd	0.193	1.280
Y	0.048	0.179
Cu	0.040	0.089

ластей. При этом важно, что изложенные ранее авторами в работе [8], результаты измерения водородного показателя (pH) непосредственно в образце (до электрообработки 5.71, на катоде – 13.04, на аноде – 2.95) не отражают величины pH порового раствора фосфогипса. Причиной этому является суспензионный эффект в дисперсных грунтах, который обусловлен той частью противоионов, которые при разделении твердой и жидкой фаз уходят вместе с частицами дисперсной фазы [3].

Для нахождения pH порового раствора из отобранных суспензий через бумажный фильтр был получен электроосмотический фильтрат, как до, так и после пропускания тока, после чего произведены соответствующие измерения: исходные значения pH раствора – 5.55, в прианодной области – 1.86, в прикатодной – 12.64. Видно, что водородный показатель фильтрата сдвигается в кислотную область по сравнению с pH в образце.

Результаты эксперимента указывают на схожий характер электроосмоса в образцах, насыщенных дистиллированной водой различными способами перед электрообработкой, а повышенные временные затраты, связанные с предварительным замачиванием фосфогипса в течение 30 сут, делают такую подготовку образцов менее привлекательной для исследований электрокинетических явлений.

Отметим, что, начиная со времени пропускания тока 360 мин и более, возникает необходимость в периодическом добавлении в исследуемую среду некоторого количества дистиллированной воды через технологические отверстия для поддержания режима электрообработки, что связано с увеличением электросопротивления образца.

В дальнейшем с ростом величины электрического заряда, проходящего через изучаемую среду, видимые проявления процесса электроосмоса постепенно затухают, а сам фосфогипс и графитовые электроды подвергаются электролизу. На катоде выделяются металлы и водород, а на аноде происходит окисление ионов или молекул, поступающих из объема электролита, или принадлежащих материалу анода, и выделяется кислород [9], кроме того, фиксируется изменение структуры и состава исследуемого материала, разрушение анодов, пассивация катодов и т.д. [6, 14].

Для примера в табл. 4 показано изменение концентраций металлов в образцах на катоде после 2400 мин электрообработки в сравнении с их начальным содержанием по данным рентгенофлюоресцентного анализа. Особенно важным, на наш взгляд, является обогащение прикатодной зоны ионами РЗЭ: Ce – в 2.5 раза, Nd – в 9.2 раза, Y – в 5.3 раза, по сравнению с исходными показателями. Зафиксировано также увеличение содержания Fe в 6.6 раз с образованием зоны ожелезнения (рис. 3а). Одновременно в прианодной области наблюдается окрашивание изучаемого материала в черный цвет, что связано с разрушением графитового анода в ходе электролиза (рис. 3б). Для сравнения на рис. 3в показан не измененный исходный образец.

Отмеченные изменения сопровождались фазовыми и микроструктурными преобразованиями образцов, что подтвердил рентгенофазовый анализ. На аноде доминирующей фазой оказался гипс $CaSO_4 \cdot 2H_2O \approx 57–68\%$. Межплоскостные расстояния (Å): 7.602; 4.242; 3.770; 3.045; 2.664 и т.д. Кроме того обнаружен отсутствующий в исходном образце ангидрит $CaSO_4 \approx 30–40\%$, межплоскостные расстояния (Å): 3.475; 3.105; 2.845; 2.170; 1.739 и т.д., а также зафиксированы возможные следы целестина $SrSO_4 \approx 2–3\%$, межплоскостные расстояния (Å): 3.270; 2.378; 1.936.

На катоде доминирующая фаза представлена гипсом $CaSO_4 \cdot 2H_2O \approx 75–80\%$, межплоскостные расстояния (Å): 7.670; 4.283; 3.795; 3.054; 2.863 и т.д. Обнаружен ранее не зафиксированный в исходном образце сидеротил $FeSO_4 \cdot 5H_2O \approx 10\%$, межплоскостные расстояния (Å): 5.702; 5.580; 5.085; 4.890; 4.550; 3.877 и т.д., а также аморфная фаза, представляется в виде гало (?) в области углов 20° = 27°–37°.

По результатам минералого-петрографических исследований шлифов фосфогипса особого внимания заслуживает образец, отобранный в прикатодной области (время пропускания тока 240 мин). В этом образце кроме повышения пористости в основной массе фосфогипса [20], наблюдается зона новообразованного вещества, которая в основном представлена сильно пористой, иногда сгусткообразной, мелкозернистой мас-

Рис. 3. Прикатодная (а) и прианодная (б) области геоэлектрохимического устройства после электрообработки (время электрообработки 2400 мин), исходный материал (в).

сой, с размером зерен 0.01 мм. Мелкозернистая масса имеет агрегатное строение, что хорошо видно по агрегатному погасанию. Зачастую эта масса состоит из очень мелких сферолитов с перламутровой интерференционной окраской. В основном это обнаруживается только при увеличениях ×200 (рис. 4).

Наряду с мелкозернистой массой в этой зоне присутствуют прозрачные кристаллы призматической формы размером 0.04–0.08 мм с яркой (красно-синей) интерференционной окраской. Поскольку вещество имеет довольно высокие показатели преломления (n = 1.569) и высокое двулучепреломление, с большой долей вероятности можно предположить, что это промежуточная модификация полугидрата (бассанит – $CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$) [5].

Кроме того, данные электронной микроскопии показывают, что в этом образце кристаллическое вещество образует сплошную массу из пластинчатых кристаллов (рис. 5а). Практически отсутствуют хорошо ограненные кристаллы фосфогипса (рис. 5б), ранее отмеченные на снимках исходного образца (см. рис. 1). В редких случаях можно наблюдать кристаллы вещества с относительно хорошо выраженными кристаллографическими формами. В этих случаях края граней кристаллов, как правило, не ровные, занозистые. Очень часто наблюдается расщепление кристаллов по плоскостям спайности. Поверхность кристаллической массы не ровная, наблюдается “рыхлость” поверхности, присыпанная мелкими новообразованиями, форма которых не диагностируется даже при очень больших увеличениях (рис. 5в).

Указанный факт подтверждает предположения, сделанные при минералого-петрографических исследованиях этого образца, что новообразования, по-видимому, являются полугидратом. Отметим, что кристаллизационная вода в данном случае уходит через разрывы на поверхности кристаллов гипса, деформируя их.

В ходе электролиза в геоэлектрохимической установке наблюдалось разрушение графитового анода, впервые зафиксированное через 144 мин электрообработки, которое первоначально имело вид разрыхленной поверхности. По мере увеличения времени воздействия до 2400 мин по всей площади электрода стали видны крупные поры и мелкие каверны. Для наглядности на рис. 6а и 6б приведен внешний вид анода, соответственно, до и после электробработки образцов.

Графитовые аноды медленно разрушаются в процессе электролиза за счет постепенного окисления графитовой поверхности до двуокиси и окиси углерода: $C + O_2 = CO_2$; $2C + O_2 = 2CO$. Их разрушение определяется в основном скоростью окисления графита кислородом, выделяющимся на аноде при электролизе. При этом отдельные зерна графита теряют связь с основанием и выкрашиваются [23].

Одновременно с разрушением анода, на катоде наблюдается явление пассивации, которое

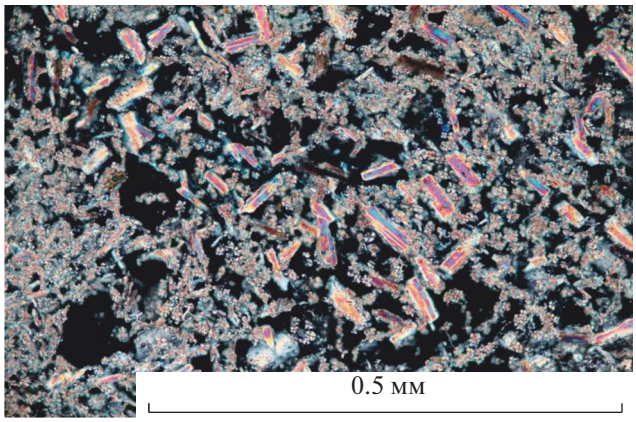


Рис. 4. Результаты минералого-петрографических исследований образца из прикатодного участка (время электрообработки 240 мин). Увеличение ×200, николи X.

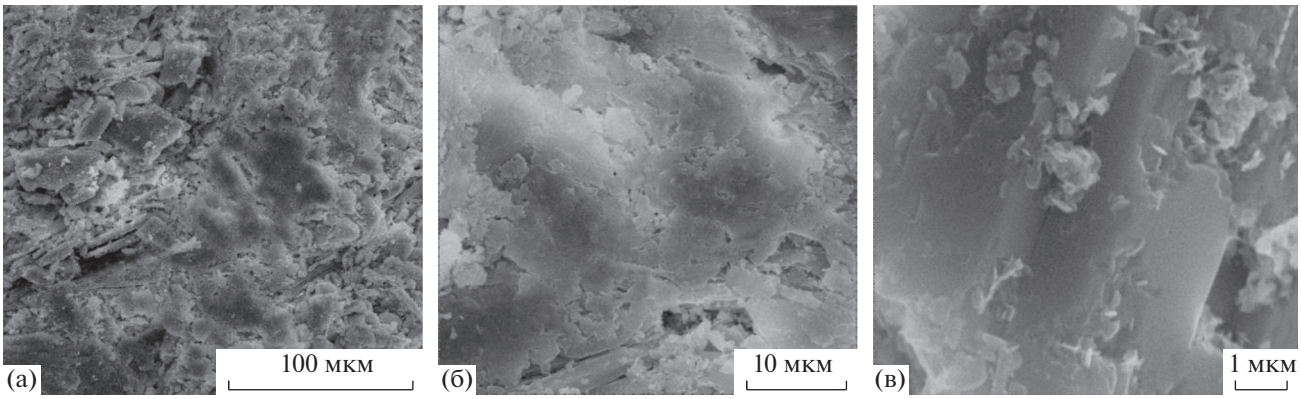


Рис. 5. Фотографическое изображение поверхности образца из прикатодного участка (время электрообработки 240 мин) при различном увеличении: (а) ×1000, (б) ×5000, (в) ×25000.

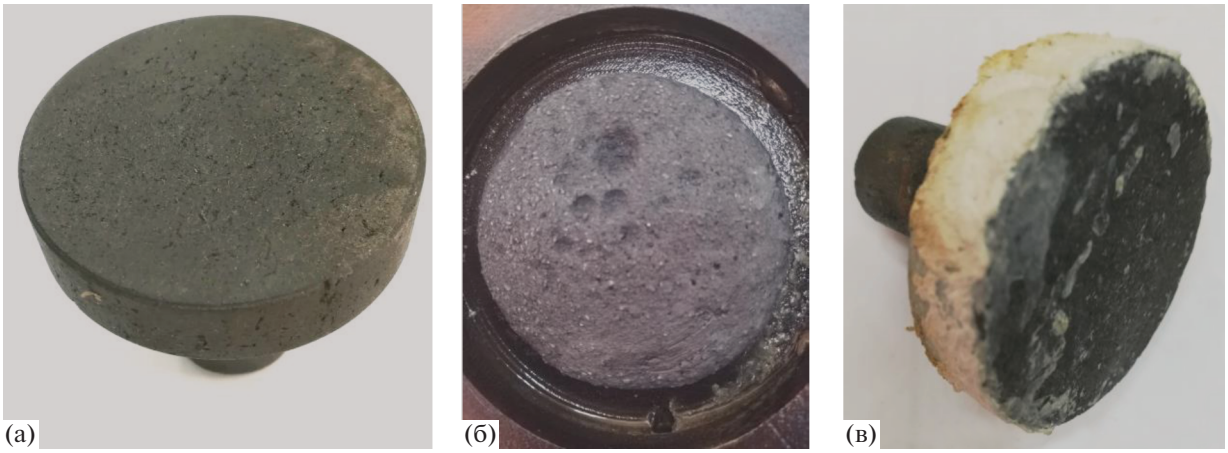


Рис. 6. Внешний вид электродов: (а) анод до электрообработки, (б) анод после электрообработки, (в) катод после электрообработки. Время электрообработки 2400 мин.

связано с химическим взаимодействием металлов, входящих в состав фосфогипса, с электролитом, часто приводящим к образованию окисных, сульфидных и других пленок. С повышением концентрации электролита увеличивается скорость пассивации катода и уменьшается величина его активной поверхности, что при отсутствии добавления воды в технологические отверстия приводит к разрыву электрической цепи в устройстве. Как видно из рисунка 6в, на основной поверхности электрода в отдельных его частях фиксируется наличие тонких, предположительно оксидных пленок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования электрокинетических и электрохимических явлений в образцах из отвалов АО “Апатит” позволили оценить коэффициент электроосмоса в заполненном дистиллированнной водой капиллярно-пористом теле фосфогипса, который практически не зависит от способа подготовки образцов перед электрообработкой и равен $0.25 \cdot 10^{-5}$ см^2/В с. При этом появляется возможность создания композитных материалов на основе отходов, путем доставки на капиллярном уровне различных веществ коагулянтов вместе с электроосмотическим фильтратом в любой объем образцов, что затруднительно добиться при механическом перемешивании. Совместно с дегидратацией в постоянном поле электрического тока, указанные явления способствуют получению образцов с пониженной миграционной способностью – ангидрит ≈30–40%, сидеротил ≈10%, целестин ≈2–3% и др.

Концентрирование на катоде РЗЭ позволило увеличить их концентрацию по сравнению с исходной: Ce в 2.5 раза, Nd – в 9.2 раза, Y – в 5.3 раза. С учетом больших объемов фосфогипса, хранящегося в отвалах, можно рассматривать его отходы как источник стратегически важной редкоземельной продукции. Полученные результаты

позволяют считать высокоэффективным применение системного, двухэтапного подхода к переработке и последующему использованию фосфогипса при решении экологических проблем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белобров В.П., Гребенников А.М., Куленкамп А.Ю. и др.* Особенности биологической рекультивации отвала фосфогипса балаковского филиала АО "Апатит" // Экологический вестник Северного Кавказа. 2015. № 1. С. 20–25.
2. *Большаков В.Д.* Теория ошибок наблюдений. М.: Недра, 1983. 223 с.
3. *Водяницкий Ю.Н., Минеев В.Г.* Различие в значениях pH гидроморфных почв при полевом и лабораторном анализах // Вестник Московского университета. Сер. 17: Почвоведение. 2016. № 1. С. 3–9.
4. *Гончарова Л.В.* Основы искусственного улучшения грунтов. М.: МГУ, 1973. 376 с.
5. *Дир У.А., Хауи А.Р., Зусман Дж.* Породообразующие минералы. Т. 1. Ортосиликаты и кольцевые силикаты. М.: Мир, 1965. 404 с.
6. *Королев В.А.* Теория электроповерхностных явлений в грунтах и их применение. М.: ООО "Сам полиграфист", 2015. 468 с.
7. *Иваницкий В.В., Классен П.В., Новиков А.А. и др.* Фосфогипс и его использование. М.: Химия, 1990. 224 с.
8. *Меренов И.А., Шигаев В.Ю., Хохлов А.Е.* Исследование окислительно-восстановительных свойств фосфогипса при взаимодействии с полем постоянного электрического тока // Сб. научных трудов по материалам VI междунар. научной конференции. Екатеринбург: НИЦ "Л-Журнал", 2017. С. 52–55.
9. *Никитина Н.Г., Гребенькова В.И.* Общая и неорганическая химия. Ч. 1. Теоретические основы. М.: Юрайт, 2018. 211 с.
10. *Окорков В.В.* Влияние фосфогипса на поведение стронция и других тяжелых металлов при мелиорации солонцов // Сб. научных трудов по матер. V Междунар. научной экологической конференции. Краснодар: ФГБОУ ВО "Кубанский государственный аграрный университет", 2017. С. 107–116.
11. *Осипов В.И.* Внутрикристаллическое разбухание глинистых минералов // Геоэкология. 2011. № 5. С. 387–398.
12. *Плеханова И.О., Аймалетдинов Р.А.* Влияние отходов производства фосфорных удобрений на экологическое состояние близлежащих территорий // Проблемы агрохимии и экологии. 2014. № 1. С. 50–54.
13. *Простов С.М., Покатилов А.В., Рудковский Д.И.* Электрохимическое закрепление грунтов. Томск: Томский университет, 2011. 294 с.
14. *Путиков О.Ф.* Основы теории нелинейных геоэлектрохимических методов поисков и разведки. СПб.: СПГГИ им. Г.В. Плеханова, 2008. 534 с.
15. *Самонов А.Е., Борисовский С.Е.* Нетрадиционная безотходная переработка апатитового концентрата и фосфогипса // Экология и промышленность России. 2005. № 7. С. 8–11.
16. *Самонов А.Е., Мелентьев Г.Б., Ваньшин Ю.В.* Экологическое воздействие хранилищ фосфогипса и пиритных огарков на среду обитания и перспективы их комплексной переработки с получением высоколиквидной товарной продукции // Экология промышленного производства. 2008. № 2. С. 65–76.
17. *Семенов А.А.* Технология разделения редкоземельного концентрата, выделенного из фосфогинса, с получением диоксида церия и оксида неодима: дис. канд. тех. наук. М., 2016. 126 с. URL: http://www.dslib.net/texnologia-neorganiki/tehnologija-razdelenija-redkozemelnogo-koncentrata-vydelennogo-iz-fosfogipsa-s.html
18. *Солдаткин С.И., Хохлов А.Е.* Проблемы использования фосфогипса в дорожном строительстве // Недра Поволжья и Прикаспия. 2019. № 97. С. 58–61.
19. *Шигаев В.Ю.* Геоэлектрохимические исследования геологической среды. Саратов: СГУ им. Н.Г. Чернышевского, 2012. 184 с.
20. *Шигаев В.Ю., Шелепов Д.А., Меренов И.А.* Изменение порового пространства отходов переработки фосфорсодержащего сырья в фосфорную кислоту при их электрообработке // Недропользование XXI век. 2019. № 2. С. 154–159. URL: http://naen.ru/journal_nedropolzovanie_xxi/arkhiv-zhurnala/2019/2_90_let_geologicheskikh_pobed
21. *Ablyeva I.Yu., Plyatsuk L.D., Kotsyuba I.G.* Features of the process of processing sludge by chemical method using phosphogypsum // Bulletin of Zhytomyr State Technological University. Series: Technical Sciences, 2013. № 4 (67). P. 84–88.
22. *Pikarenya D.S., Orlinskaya O.V., Chushkina I.V. et al.* New ways of processing phosphogypsum as environmentally hazardous raw materials // Construction. Materials science. Engineering. Series: life Safety, 2013. № 71 (1). P. 179–186.
23. *Rabah M.A., Nassif N., Abdul Azim A.A.* Electrochemical wear of graphite anodes during electrolysis of brine // Carbon, 1991. № 29 (2). P. 165–171.
24. *Schaad W.* Praktische Anwendungen der Electro-Osmose im Gebiete des Grundbaues // Die Bautechnik, 1958. № 35 (6). P. 210–215.
25. *Walawalkar M.* Extraction of Rare Earth Elements from Phosphogypsum (Fertilizer Production By-product: dis. master of applied science). Toronto. 2016.
26. *Wang M., Tang Y., Anderson W.N.C., Jeyakumar P., Yang J.* Effect of simulated acid rain on fluorine mobility and the bacterial community of phosphogypsum // Environmental Science and Pollution Research, 2018. V. 25. P. 15336–15348. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29564699/ (accessed 03.08.2020)

INVESTIGATION OF ELECTROKINETIC AND ELECTROCHEMICAL PHENOMENA IN PHOSPHOGYPSUM IN SOLVING GEOECOLOGICAL PROBLEMS

V. Yu. Shigaev[a,#], D. A. Shelepov[a,##], A. E. Khokhlov[a,###], and I. A. Merenov[b,####]

[a] *Chernyshevsky Saratov National Research State University, ul. Astrakhanskaya, 83, Saratov, 410012 Russia*

[b] *Vavilov Saratov State Agricultural University, Teatral'naya pl., 1, Saratov, 410012 Russia*

[#]*E-mail: vital1969_08@mail.ru*

[##]*E-mail: shelepov@renet.ru*

[###]*E-mail: profsnab_hae@mail.ru*

[####]*E-mail: ivan_merenov@mail.ru*

Large-capacity phosphogypsum dumps stored in the open air exert an extremely negative impact on ecosystems and human health. Therefore, their disposal or reuse is an important and urgent task. Currently, there are many studies (both Russian and foreign) dedicated to phosphogypsum processing by a direct current (DC) electric field, but many issues related to such process are not covered widely enough. Thus, the purpose of this paper is to study the electrokinetic and electrochemical processes developing in phosphogypsum after its exposure to a DC electric field. The paper discusses various options of initial sample saturation with distilled water and their subsequent electrical processing in a geoelectrochemical device developed at the Department of Geophysics, Chernyshevsky Saratov State University (Russian Federation patent no. 47365, August 27, 2005). The device consists of a cylindrical plastic case with access holes for monitoring physical and chemical properties. Inert graphite electrodes are embedded at the ends of the housing and are supplied with a direct electric current. We determined the sequence and volume of liquids released at the cathode and anode depending on the direct current transmission time, redox reactions occurring at the electrodes, mineralization of the electrolyte that fills the pores, as well as the method of dissolving the samples. Abnormally high contents of Ce (2.5 times greater than its initial concentration), Nd (9.2 times), Y (5.3 times), and Fe (6.6 times) were recorded in the cathode section of the device. Mineral and petrographic, chemical, X-ray and other studies also have recorded changes in the composition and structure of the samples under study. It is important to take these data into account when choosing the method of electrical treatment used to extract various metals from waste. Electrical surface processes (electric osmosis, electrophoresis etc.) in the studied samples are proposed to be used in solving a number of applied geoecological problems, particularly, the selection of coagulating substances introduced as additives for obtaining phosphogypsum-based composite materials.

Keywords: *phosphogypsum*, *constant electric current*, *current transmission time*, *electrokinetic and electrochemical phenomena*, *changes in the structure and composition of samples*

REFERENCES

1. Belobrov, V.P., Grebennikov, A.M., Kulenkamp, A.Yu., Ryashko, A.I., Torochkov, E.L. *Osobennosti biologicheskoi rekul'tivatsii otvala fosfogipsa Balakovskogo filiala AO "Apatit"* [Features of biological reclamation of the phosphogypsum dump at the Balakovo branch of JSC "Apatit"]. *Ekologicheskii vestnik Severnogo Kavkaza*, 2015, no. 1, pp. 20–25. (in Russian).
2. Bolshakov, V.D. *Teoriya oshibok nablyudenii* [Theory of observation errors]. Moscow, Nedra Publ., 1983, 223 p. (in Russian)
3. Vodyanitskii, Yu.N., Mineev, V.G. *Razlichie v znacheniyakh pH gidromorfnykh pochv pri polevom i laboratornom analizakh* [Difference in pH values of hydromorphic soils in field and laboratory analyses]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*, 2016, no. 1, pp. 3–9. (in Russian).
4. Goncharova, L.V. *Osnovy iskusstvennogo uluchsheniya gruntov* [Fundamentals of artificial soil improvement]. Moscow, MGU Publ., 1973, 376 p. (in Russian)
5. Dir, U.A., Howie, A.R., Zusman, J. *Porodoobrazuyushchie mineraly* [Rock-forming minerals]. Vol. 1. Orthosilicates and ring silicates. Moscow, Mir Publ., 1965, 404 p. (in Russian)
6. Korolev, V.A. *Teoriya elektropoverkhnostnykh yavlenii v gruntakh i ikh primenenie* [Theory of electrosurface phenomena in soils and their application]. Moscow, Sam polygraphist Publ., 2015, 468 p. (in Russian)
7. Ivanitskii, V.V., Klassen, P.V., Novikov, A.A., Stonis, S.N., Evenchik, S.D., Yakovleva, M.E. *Fosfogips i ego ispol'zovanie* [Phosphogypsum and its use]. Moscow, Khimiya Publ., 1990, 224 p. (in Russian)
8. Merenov, I.A., Shigaev, V.Yu., Khokhlov, A.E. *Issledovanie okislitel'no-vosstanovitel'nykh svoistv fosfogipsa pri vzaimodeistvii s polem postoyannogo elektricheskogo toka* [Investigation of redox properties of phosphogypsum in interaction with a direct electric current field]. Proc. VI Intern. Sci. Conference, Yekaterinburg, L-Zhurnal Publ., 2017, pp. 52–55. (in Russian)
9. Nikitina, N.G., Grebenkova, V.I. *Obshchaya i neorganicheskaya khimiya* [General and inorganic chemistry]. Part 1. Theoretical fundamentals. Moscow, Yurait Publ., 2018, 211 p. (in Russian)

10. Okorokov, V.V. *Vliyanie fosfogipsa na povedenie strontsiya i drugikh tyazhelykh metallov pri melioratsii solontsov* [Influence of phosphogypsum on the behavior of strontium and other heavy metals in land reclamation of solonetzes]. Proc. V International Scientific Ecological Conference, Krasnodar, Kuban State Agricultural Univ., 2017, pp. 107–116. (in Russian)

11. Osipov, V.I. *Vnutrikristallicheskoe razbukhanie glinistykh mineralov* [Intraclastic swelling of clay minerals]. *Geoekologiya*, 2011, no. 5, pp. 387–398. (in Russian)

12. Plekhanova, I.O., Aimaletdinov, R.A. *Vliyanie otkhodov proizvodstva fosfornykh udobrenii na ekologicheskoe sostoyanie blizlezhashchikh territorii* [Impact of wastes from the production of phosphorus fertilizers on the ecological state of nearby territories]. *Problemy agrokhimii i ekologii*, 2014, no. 1, pp 50–54. (in Russian)

13. Prostov, S.M., Pokatilov, A.V., Rudkovsky, D.I. *Elektrokhimicheskoe zakreplenie gruntov* [Electrochemical stabilization of soils]. Tomsk, Tomsk University Publ., 2011, 294 p. (in Russian)

14. Putikov, O.F. *Osnovy teorii nelineynykh geoelektrokhimicheskikh metodov poiskov i razvedki* [Fundamentals of the theory of nonlinear geoelectrochemical methods of prospecting]. St. Petersburg, Plekhanov SPGGI Publ., 2008, 534 p. (in Russian)

15. Samonov, A.E., Borisovskii, S.E. *Netraditsionnaya bezotkhodnaya pererabotka apatitovogo kontsentrata i fosfogipsa* [Non-traditional waste-free processing of apatite concentrate and phosphogypsum]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2005, no. 7, pp. 8–11. (in Russian)

16. Samonov, A.E., Melent'ev, G.B., Van'shin, Yu.V. *Ekologicheskoe vozdeistvie khranilishch fosfogipsa i piritnykh ogarkov na sredu obitaniya i perspektivy ikh kompleksnoi pererabotki s polucheniem vysokolikvidnoi tovarnoi produktsii* [Environmental impact of phosphogypsum and pyrite cinder storage facilities on the environment and prospects for their complex processing to obtain highly liquid marketable products]. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*, 2008, no. 2, pp. 65–76. (in Russian)

17. Semenov, A.A. *Tekhnologiya razdeleniya redkozemel'nogo kontsentrata, vydelennogo iz fosfogipsa s polucheniem dioksida tseriya i oksida neodima* [Technology of separation of rare earth concentrate extracted from phosphogypsum to produce cerium dioxide and neodymium oxide. Cand. Sci. (Technical) Disseration. Moscow, 2016, 126 p. (in Russian)

18. Soldatkin, S.I., Khokhlov, A.E. *Problemy ispol'zovaniya fosfogipsa v dorozhnom stroitel'stve* [Problems of using phosphogypsum in road construction]. *Nedra Povolzh'ya i Prikaspiya*, 2019, no. 97, pp. 58–61. (in Russian)

19. Shigaev, V.Yu. *Geoelektrokhimicheskie issledovaniya geologicheskoi sredy* [Geoelectrochemical studies of the geological environment]. Saratov, Chernyshevsky State University Publ., 2012, 184 p. (in Russian)

20. Shigaev, V.Yu., Shelepov, D.A., Merenov, I.A. *Izmenenie porovogo prostranstva otkhodov pererabotki fosforsoderzhashchego syr'ya v fosfornuyu kisloty pri ikh elektroobrabotke* [Changing the pore space of waste from processing of phosphorous-containing raw materials into phosphoric acid during their electrical processing]. *Nedropol'zovanie XXI vek,* 2019, no. 2, pp. 154–159. Available at: http://naen.ru/journal_nedropolzovanie_xxi/arkhiv-zhurnala/2019/2_90_let_geologicheskikh_pobed/ (accessed 03.08.2020) (in Russian)

21. Ablyeva, I.Yu., Plyatsuk, L.D., Kotsyuba, I.G. Features of the process of processing sludge by chemical method using phosphogypsum. *Bulletin of Zhytomyr State Technological University. Series: Technical Sciences*, 2013, no. 4 (67), pp. 84–88.

22. Pikarenya, D.S., Orlinskaya, O.V., Chushkina, I.V., Gapich, G.V., Isaenko, R.V. New ways of processing phosphogypsum as environmentally hazardous raw materials. *Construction. Materials science. Engineering. Series: Life Safety,* 2013, no. 71 (1), pp. 179–186.

23. Rabah, M.A., Nassif, N., Abdul Azim, A.A. Electrochemical wear of graphite anodes during electrolysis of brine. *Carbon*, 1991, no. 29 (2), pp. 165–171.

24. Schaad, W. Praktische Anwendungen der Electro-Osmose im Gebiete des Grundbaues. *Die Bautechnik*, 1958, no. 35 (6), pp. 210–215.

25. Walawalkar, M. Extraction of rare earth elements from phosphogypsum (fertilizer production by-product:) dis. master of applied science. Toronto, 2016.

26. Wang, M., Tang, Y., Anderson, W.N.C., Jeyakumar, P., Yang, J. [Effect of simulated acid rain on fluorine mobility and the bacterial community of phosphogypsum]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, vol. 25, pp. 15336–15348. Available at: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29564699/ (accessed 03.08.2020).

ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2021, № 2, с. 86–95

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 502.5

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОМОРФОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РЕЛЬЕФА ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2021 г. Е. В. Полякова[1,*], Ю. Г. Кутинов[1], А. Л. Минеев[1], З. Б. Чистова[1]

[1] *ФГБУН Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН, набережная Северной Двины, 23, г. Архангельск, 163000 Россия*

**E-mail: lenpo26@yandex.ru*

Поступила в редакцию 08.12.2020 г.
После доработки 20.01.2021 г.
Принята к публикации 20.01.2021 г.

В статье показана взаимосвязь источников загрязнения с природными зонами сноса, транзита и аккумуляции материала, выделенными на основе цифровой модели рельефа в результате геоморфометрического анализа на примере территории Архангельской области. В результате сопоставления данных констатировано пространственное совпадение источников антропогенного воздействия на окружающую среду с природной зоной аккумуляции, выделенной на основе расчета геоморфометрических параметров рельефа (угла наклона, LS фактора и индекса расчлененности). Также показана приуроченность зон лесопромышленного воздействия к природным зонам сноса и, в большей степени, транзита материала, выделенных на основе тех же параметров. Для выделения локальных зон аккумуляции осадков с целью отбора проб для проведения мониторинговых работ по оценке загрязнения почв логичнее применять расчет кривизн поверхности. Геоморфометрический подход, в отличие от применяемого Росгидрометом (по примерно равномерной сети), позволяет оценить участки накопления загрязняющих веществ на разных уровнях детализации – от регионального до локального. Именно в этих районах необходимо проведение регулярного наземного мониторинга, а не размещение точек наблюдений равномерно по всей площади.

Ключевые слова: *цифровая модель рельефа*, *геоморфометрические параметры*, *источники загрязнения*

DOI: 10.31857/S0869780921020065

ВВЕДЕНИЕ

При рациональном природопользовании необходимо учитывать природные и экономические условия и свойства территории, на которой производится хозяйственная деятельность. Осуществление хозяйственной деятельности в северных регионах РФ сталкивается с серьезными трудностями из-за отсутствия актуальной и объективной геопространственной информации об опасных природных явлениях и процессах, а также о вероятности их развития. Экстенсивный характер лесопользования и низкая скорость лесовозобновления приводят к быстрому сокращению лесных площадей [3]. Значительное влияние на северные экосистемы оказывают разведка и разработка месторождений полезных ископаемых [9], урбанизация и развитие дорожной сети. Интенсивное хозяйственное и промышленное освоение северных территорий страны часто приводит к активизации природных процессов или развитию новых опасных явлений, которые ранее здесь отсутствовали [10]. Получение информации о современном состоянии рельефообразующих процессов, характере их пространственного распределения и интенсивности развития крайне необходимо для обеспечения промышленной и экологической безопасности в процессе хозяйственного освоения региона.

Геоморфометрический анализ является эффективным методом при оценке вклада рельефа в функционирование геосистем. Именно этот метод широко используется в геоморфологии при проведении исследований как в нашей стране, так и за рубежом. Однако в последнее время сфера применения геоморфометрического анализа значительно расширилась, выйдя за рамки чисто геоморфологических работ. Теперь он применяется для решения геоэкологических задач, при проведении изысканий для проектирования и строительства в различных областях и т.д. [1]. Источником входных данных для геоморфометрического анализа выступает цифровая модель рельефа (ЦМР). Расчет геоморфометрических параметров рельефа на основе ЦМР позволяет

Таблица 1. Средние значения геоморфометрических параметров для каждой зоны

Параметр	Зона 1		Зона 2		Зона 3	
	μ*	δ**	μ	δ	μ	δ
Высота, м	143.92	47.09	123.41	51.70	66.47	44.41
Угол наклона, град.	1.44	0.96	0.96	0.65	0.58	0.43
Индекс расчлененности	1.48	0.94	0.99	0.63	0.61	0.42
LS-фактор	1.08	1.04	0.59	0.59	0.29	0.30

*μ – среднее арифметическое значение, **δ – среднеквадратическое отклонение

составлять большой набор карт прогнозно-вероятностного моделирования для оценки состояния природной среды в свете возрастающей антропогенной нагрузки.

Цель данной статьи – показать взаимосвязь источников загрязнения с природными зонами сноса, транзита и накопления материала, выделенными в результате геоморфометрического анализа цифровой модели рельефа на примере территории Архангельской области.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Геоморфометрический анализ был проведен с использованием цифровой модели рельефа (ЦМР), построенной для территории Архангельской области на основе глобальной ЦМР ASTER GDEM v2 [14] с исходным размером ячейки 1 угловая секунда (около 30 × 30 м) в программной среде SAGA GIS (URL: http://www.saga-gis.org). Обоснованность выбора глобальной ЦМР, методика построения ЦМР области и надежность построенной модели приведены в ряде публикаций авторов [4–8] и в предлагаемой статье рассматриваться не будут.

Для оценки вероятности проявления экзогенных процессов на территории Архангельской области мы проанализировали набор геоморфометрических параметров и выбрали угол наклона (Slope), LS фактор (LS factor) и индекс расчлененности рельефа (Terrain Ruggedness Index (TRI)), поскольку именно эти параметры наиболее характерно отображают процесса эрозии и аккумуляции на региональном уровне. Уклон поверхности является причиной возникновения эрозии, а его величина (угол в точке пересечения между горизонтальной плоскостью и плоскостью касательной к земной поверхности) во многом определяет интенсивность эрозионных процессов. Интенсивность эрозии растет экспоненциально с увеличением уклона. LS фактор – это индекс потенциала плоскостной эрозии (L – длина, S – крутизна склона). Физический смысл данного параметра заключается в том, что чем больше значение коэффициента, тем выше влияние рельефа на процессы водной эрозии [16]. Индекс расчлененности рельефа служит для объективной количественной оценки разнородности (неоднородности) рельефа и выражает величину разницы высот между соседними ячейками ЦМР [18].

Данные параметры подвергались процедуре генерализации (для сглаживания сильно “раздробленных” контуров) и кластеризации методом *k*-means [17] с разбиением каждого параметра на три кластера – минимальных, средних и максимальных значений. Затем находились пересечения контуров по каждому из кластеров по алгоритму [19] и объединение их в общие полигоны минимальных, средних и максимальных значений (рис. 1). Все операции проводились в программной среде SAGA GIS. В результате получена карта районирования области с выделением зон сноса (территорий, предрасположенных к развитию эрозионных процессов), транзита и накопления (территорий, предрасположенных к развитию аккумулятивных процессов) материала (рис. 2). Подробно методика построения карты зонирования описана в [12]. В табл. 1 приведены статистические данные по выбранным параметрам внутри каждой из зон.

Выделенные зоны сопоставлялись с картой источников антропогенного воздействия на природную среду Архангельской области, составленной на основе карты объектов техногенного воздействия, приведенной в работе [2], и проекта “Схема территориального планирования Архангельской области”.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ И ОБСУЖДЕНИЕ

Российским научно-исследовательским и проектным институтом Урбанистики (РосНИПИУрбанистики) по заданию администрации Архангельской области был разработан проект “Схема территориального планирования Архангельской области” (Постановление Правительства Архангельской области от 25 декабря 2012 г. № 608-пп “Об утверждении схемы территориального планирования Архангельской области”). Цель проекта – формирование комплексной градостроительной политики, обеспечивающей рациональ-

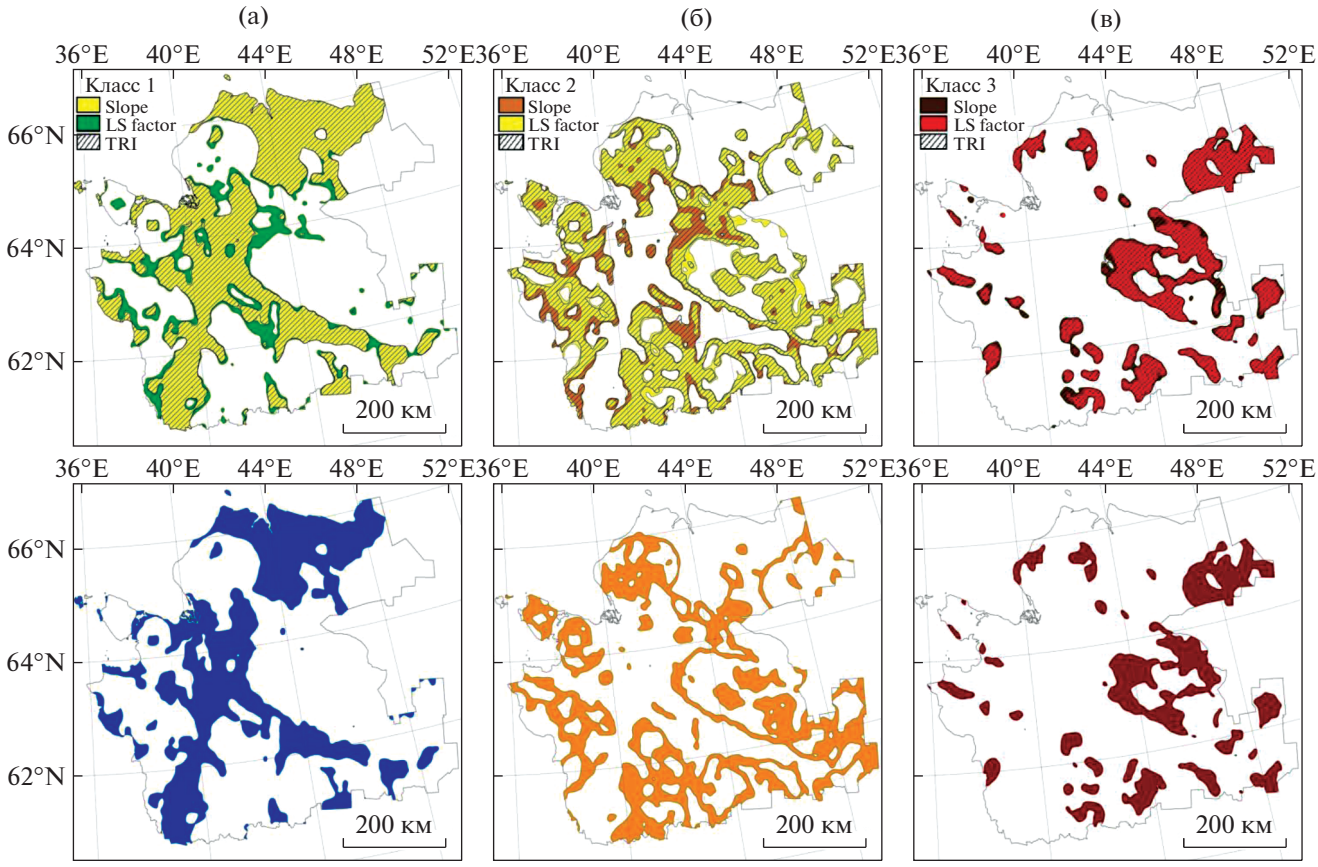


Рис. 1. Пересечения полигонов минимальных (а), средних (б) и максимальных (в) значений угла наклона, LS фактора и индекса расчлененности рельефа и их объединенные полигоны.

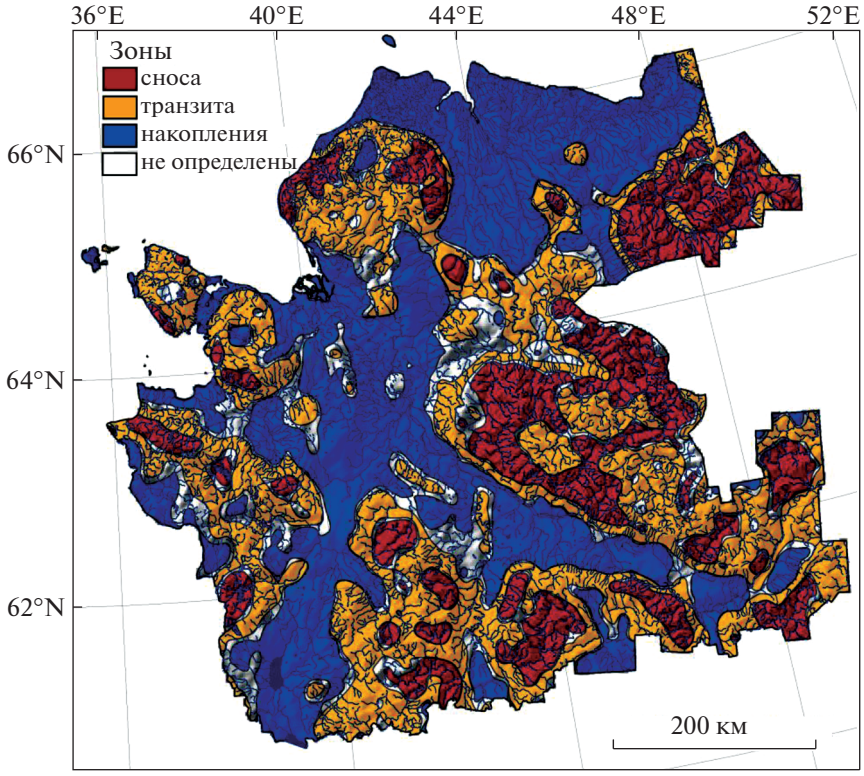


Рис. 2. Районирование территории Архангельской области по зонам сноса, транзита и накопления материала (в качестве “подложки” использовалась теневая отмывка рельефа).

Таблица 2. Площадная характеристика зон с различной вероятностью проявления экзогенных процессов на территории Архангельской области

Зоны	Площадь	
	км^2	%
Зона 1 – наибольшая вероятность развития эрозионных процессов (зона сноса)	106966	18.21
Зона 2 – возможное проявление эрозионных процессов (зона транзита)	194606	33.13
Зона 3 – потенциальное развитие аккумулятивных процессов (зона накопления)	205002	34.90
Неопределенные зоны	80826	13.76
Общая площадь	587400	100

ную планировочную организацию системы расселения и межселенных территорий (URL: https://dvinaland.ru/gov/iogv/minstroy/shemes/).

Схема территориального планирования (СТП) является основой для разработки комплекса проектной и правовой документации, регулирующей и регламентирующей градостроительную деятельность, а также обеспечивающей устойчивое функционирование территории области. Она включает в себя проектный план, схемы инженерной, планировочной, транспортной инфраструктуры, функционального зонирования и зон с особыми условиями (URL: https://dvinaland.ru/gov/iogv/minstroy/shemes/).

Специализацией Архангельского региона на российском рынке являются деревообработка и целлюлозно-бумажное производство, машиностроение (военное, судостроение, металлообработка, строительство морских буровых станций и пр.), рыбная промышленность и транспорт. Существенное значение в экономике области имеют топливно-энергетический комплекс, добывающая промышленность и агропромышленный комплекс. Ведущей отраслью промышленности на ближайшую перспективу остается лесопромышленный комплекс. Основными направлениями развития отрасли выступают освоение новых лесосырьевых территорий и развитие глубокой переработки древесины.

Таким образом, в настоящее время отмечается возрастание антропогенной нагрузки, что не может не сказаться на состоянии природной среды Архангельской области.

Загрязнение территории Архангельской области определяется на глобальном и региональном уровнях. Основные источники воздействия на глобальном уровне – Европейский центр дестабилизации окружающей среды и Кольский промышленный узел. На региональном уровне – Архангельская и Котласская промышленные агломерации, космодром “Плесецк”, крупные объекты лесохимической отрасли, в том числе 3 крупнейших ЦБК, освоение месторождений полезных ископаемых, интенсивная эксплуатация лесных ресурсов с их последующей переработкой и ряд других.

Атмосферный тип переноса загрязнения с жидкими и твердыми (снеговыми) осадками является основным для исследуемой территории. В дальнейшем происходит перераспределение загрязняющих веществ в зависимости от морфоструктурных форм рельефа и характера эрозионных процессов.

Ранее нами выявлено, что участки с наибольшей вероятностью развития эрозионных процессов, выделенные на основе объединения кластеров максимальных значений угла наклона, LS фактора, индекса расчлененности рельефа и соответствующие зонам сноса материала, составляют порядка 18% исследуемой территории. Участки с возможным проявлением эрозионных процессов, выделенные на основе объединения кластеров средних значений тех же параметров и соответствующие зонам транзита материала, составляют порядка 33% территории. Участки с потенциальным развитием аккумулятивных процессов, выделенные на основе объединения кластеров минимальных значений данных параметров и соответствующие зонам накопления материала, составляют 35% территории Архангельской области [12]. Площадные характеристики выделенных зон приведены в табл. 2.

Природная зона аккумуляции раскрывает потенциальную склонность рельефа к накоплению материала, в том числе и загрязняющих веществ. На основании карты объектов техногенного воздействия, приведенной в работе [2], а также СТП, проведено сопоставление источников антропогенного воздействия на природную среду Архангельской области с картой зон сноса, транзита и накопления материала (рис. 3).

В результате сопоставления (наложения) данных можно констатировать визуальное пространственное совпадение источников антропогенного воздействия на окружающую среду с природной зоной аккумуляции, выделенной по ЦМР Архангельской области на основе расчета геоморфометрических параметров (угла наклона, LS фактора, индекса расчлененности рельефа). Подобная положительная тенденция крайне негативно сказывается на экологическом состоянии территории.

Кроме того, приуроченность зон лесопромышленного воздействия (лесозаготовка и транспортировка древесины) к природным зонам сноса и, в большей степени, транзита материала

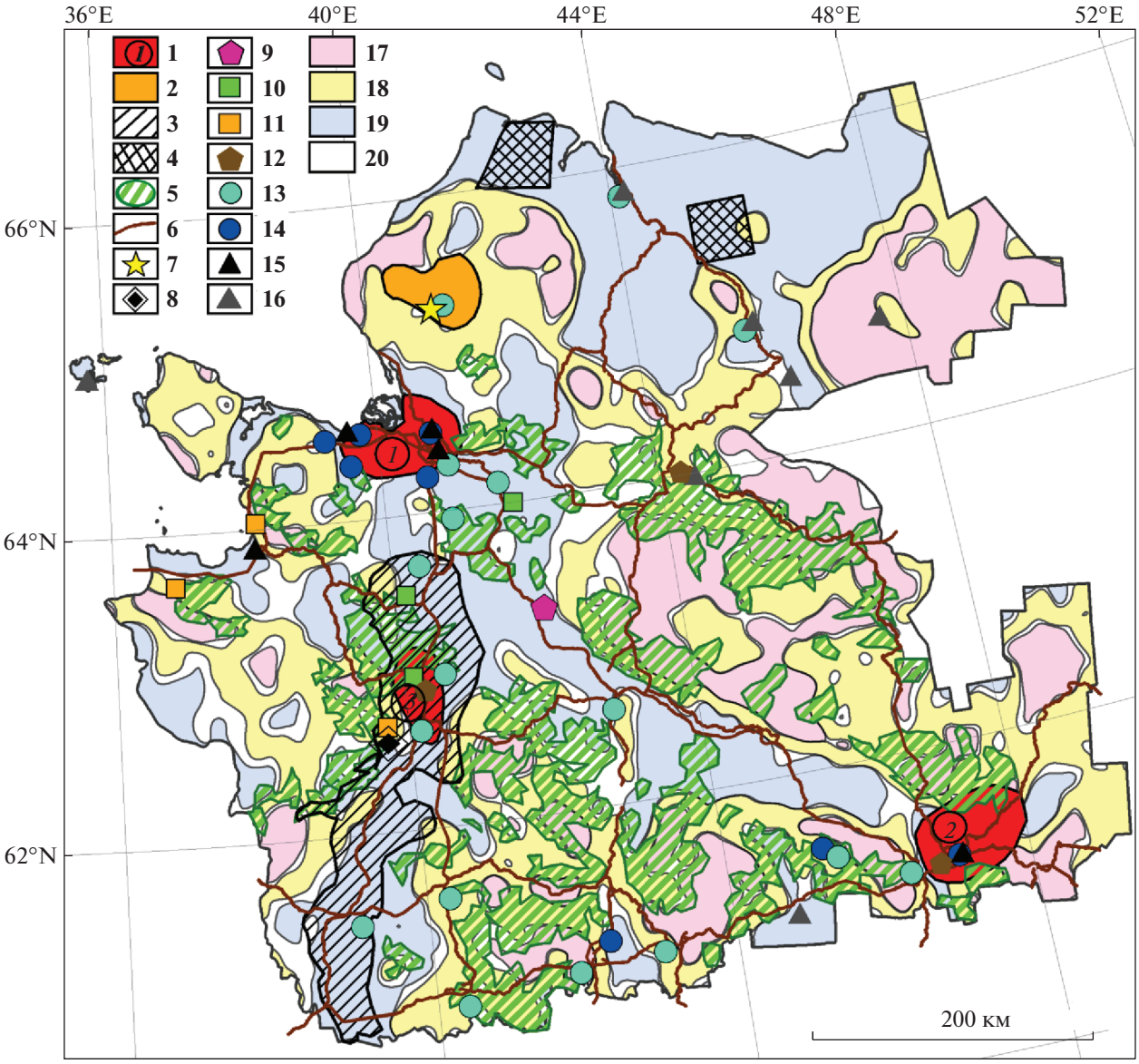


Рис. 3. Взаимосвязь источников антропогенного воздействия на природную среду Архангельской области с зонами сноса, транзита и накопления материала: 1 – зоны интенсивного промышленного воздействия: *1* – Архангельская, и *2* – Котласская промышленные агломерации, *3* – Плесецкий промышленный район; 2 – горнодобывающие зоны; 3 – зона воздействия космодрома; 4 – зоны сброса отработанных ступеней ракет; 5 – зоны лесопромышленного воздействия; 6 – дороги общего и федерального пользования; 7–14 – месторождения: 7 – алмазов; 8 – бокситов; 9 – гипсов; 10 – известняков; 11 – строительных камней; 12 – глин; 13 – пресных подземных вод; 14 – минеральных подземных вод; 15 – ТЭЦ; 16 – крупные дизельные электростанции; 17–20 – природные зоны: 17 – сноса; 18 – транзита; 19 – накопления материала; 20 – неопределенные.

(рис. 4) также вызывает большие опасения за состояние окружающей среды.

Общая площадь земель лесного фонда Архангельской области составляет 29 млн га, из которых 74% – это эксплуатационные леса [13]. Основной вид воздействия при лесохозяйственной деятельности – нарушение целостности почвенно-растительного покрова. А это, в свою очередь, влечет за собой активизацию склоновых процессов, развитие оползней, оврагов и пр. На рис. 5 приведены примеры неповрежденного и нарушенного склона. Промышленные рубки, даже при самых современных производственных методах и подходах, необратимо меняют экологический баланс и облик территории.

Следует отметить важность пространственного разрешения ЦМР для моделирования возможности развития экзогенных процессов на разных уровнях организации [15]. Для моделирования эрозии и аккумуляции в локальных масштабах

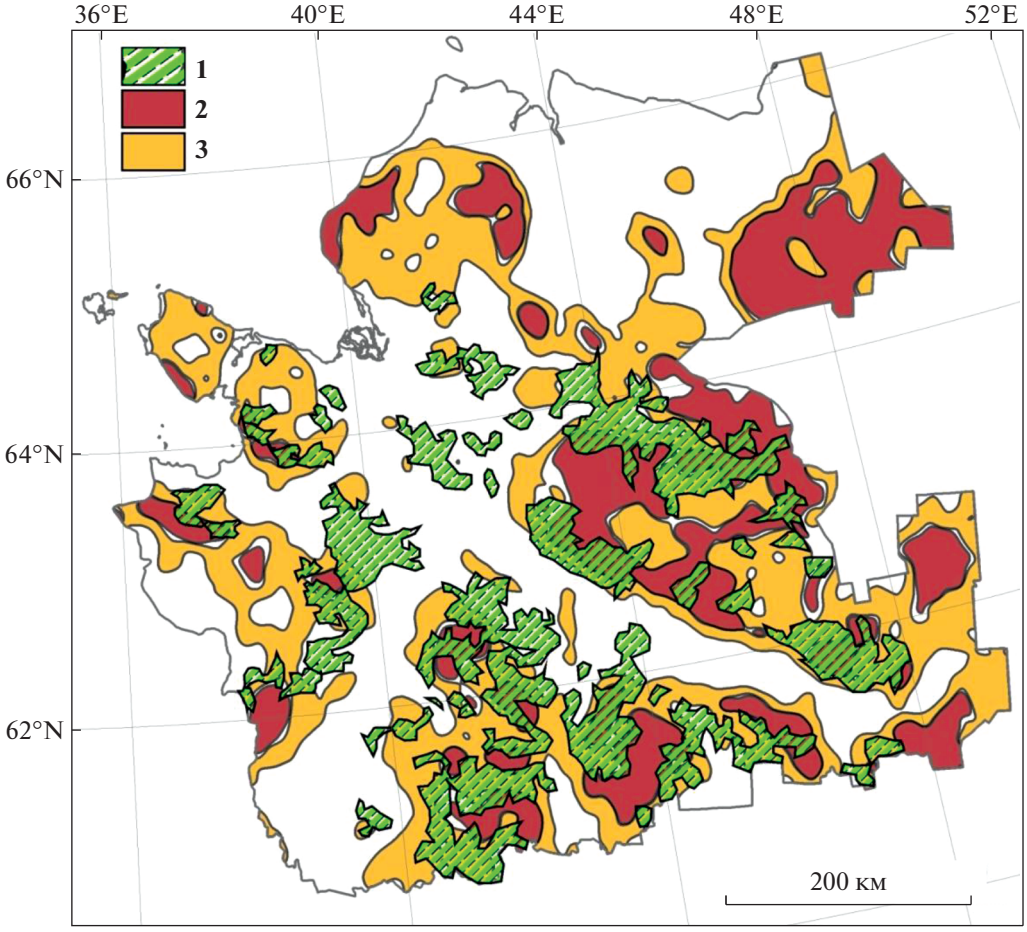


Рис. 4. Сопоставление зон лесопромышленного воздействия с природными зонами сноса и транзита материала: 1 – зоны лесопромышленного воздействия; 2–3 – природные зоны: 2 – сноса, 3 – транзита материала.

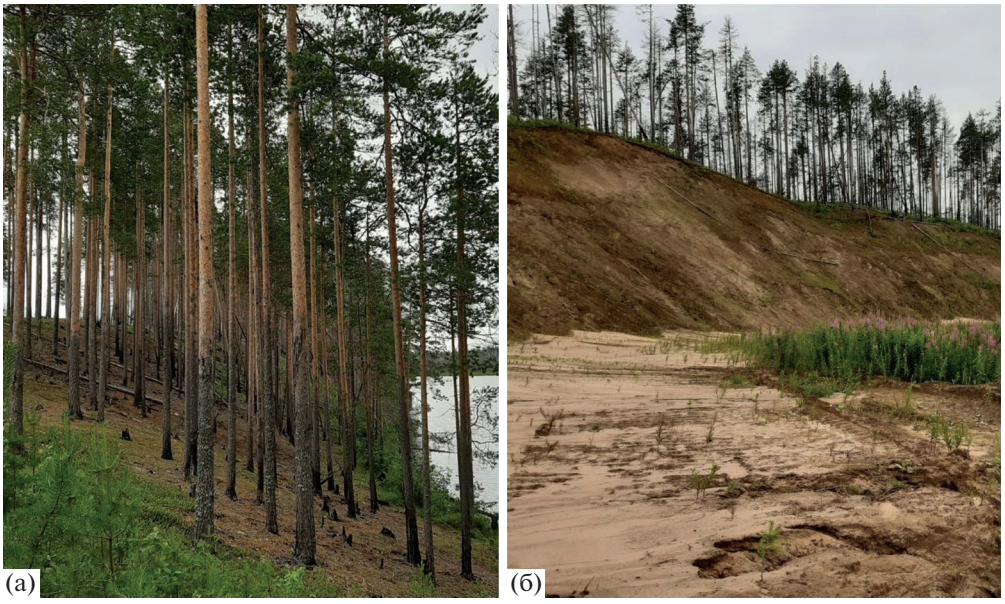


Рис. 5. Пример неповрежденного естественного (а) и нарушенного (б) склона (фото Поляковой Е.В.).

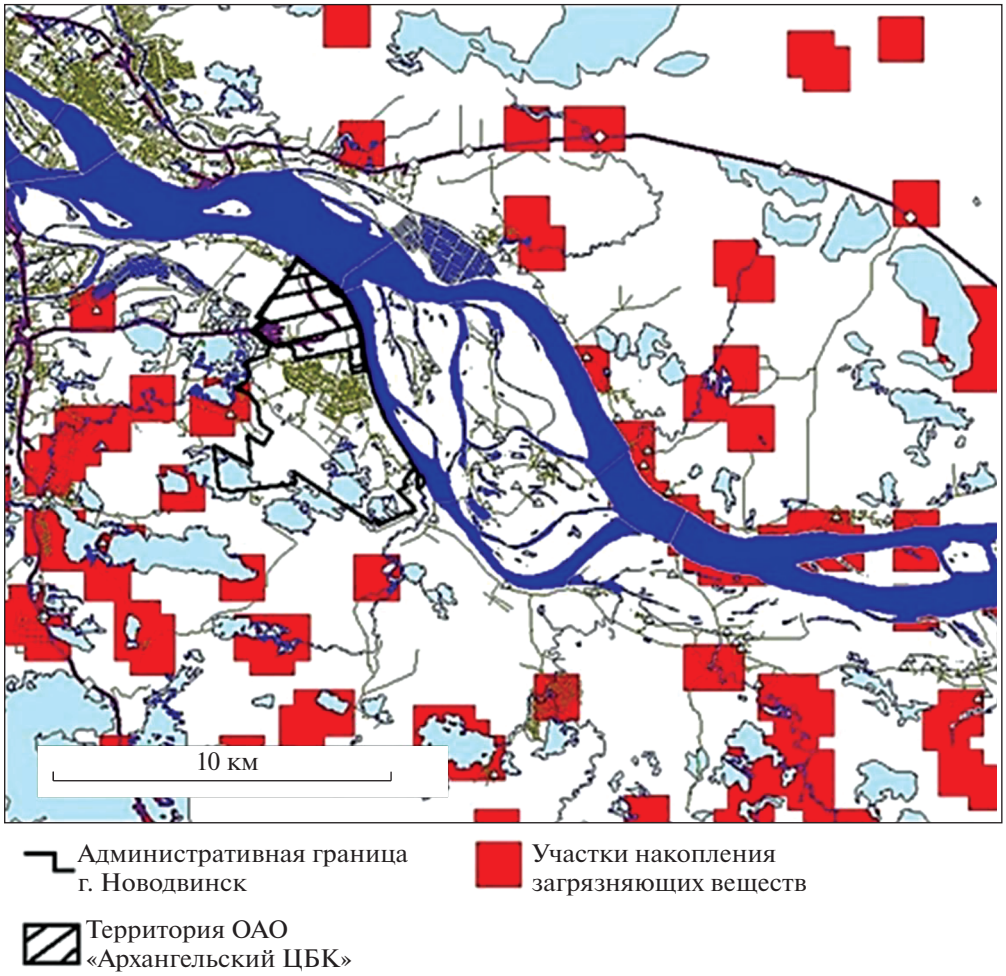


Рис. 6. Зоны аккумуляции загрязняющих веществ в окружении г. Новодвинск.

целесообразно использовать ЦМР с высоким пространственным разрешением (не более 1 угловой секунды). Для региональных и глобальных масштабов – ЦМР с низким пространственным разрешением, либо искусственно уменьшенным размером ячейки (2–3 и более угловых секунд).

От поставленных задач и масштабов территории зависит и выбор геоморфометрических параметров. На локальном уровне зоны сноса, транзита и аккумуляции хорошо описываются разными видами кривизн. Грамотное их сочетание позволяет с точностью до исходного разрешения ЦМР обозначать места возможного сноса, переноса и накопления различного материала, в том числе и загрязняющих веществ.

Так, например, для проведения мониторинговых работ по оценке состояния и загрязнения объектов окружающей среды, находящихся на территории ОАО “Архангельский ЦБК” и в пределах его воздействия на основе расчета горизонтальной и вертикальной кривизн были выделены зоны аккумуляции загрязняющих веществ (рис. 6). Оба типа кривизн используются для различения выпуклых и вогнутых форм рельефа. При этом горизонтальная кривизна характеризует направление потока, а вертикальная – его скорость. Горизонтальная вогнутость (отрицательная форма) указывает на схождение (конвергенцию), а горизонтальная выпуклость (положительная форма) – на расхождение (дивергенцию) линий потока, тем самым определяя пространственную неоднородность стока. Вертикальная выпуклость указывает на ускорение потока, вертикальная вогнутость – на его замедление. То есть расчет вертикальной кривизны позволяет определять местоположение зон сноса материала на положительных формах и его накопления на отрицательных, определяя тем самым закономерности эрозии и аккумуляции осадков и загрязняющих веществ [16].

Таким образом были выделены участки, предрасположенные к накоплению осадков. Именно в этих зонах необходимо проводить отбор проб для проведения мониторинговых работ по оценке загрязнения почв.

ВЫВОДЫ

Геоморфометрический анализ ЦМР является неотъемлемой частью современных геоэкологических и экологических исследований, мониторинговых работ в силу доступности исходного материала и его высокой разрешающей способности, объективности количественных методов расчета, а также единовременного охвата больших территорий [11]. Карты геоморфометрических параметров дают возможность оценить пространственное положение и количественные характеристики процессов эрозии и аккумуляции на различных участках исследуемой территории. Расчет геоморфометрических параметров рельефа может выступать объективным инструментом при оценке риска развития опасных экзогенных процессов при планировании антропогенно-хозяйственной деятельности.

Для территории Архангельской области отмечается прямая корреляция источников антропогенного воздействия на окружающую среду с природными зонами аккумуляции, выделенными по ЦМР, что крайне негативно сказывается на экологическом состоянии территории.

Геоморфометрический подход, в отличие от применяемого Росгидрометом (по примерно равномерной сети), позволяет оценить участки накопления загрязняющих веществ на разных уровнях детализации – от регионального (административные области, округа, края) до локального (территории промышленных агломераций, предприятий и т.п.). Именно на этих участках необходимо проведение регулярного наземного мониторинга, в отличие от равномерного размещения точек наблюдений по всей площади.

Исследование проведено в ходе выполнения государственного задания ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН № гос. регистрации АААА-А18-118012390305-7, а также при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-60024 “Анализ состояния природной среды равнинных территорий Арктической зоны РФ с использованием геоинформационных технологий и цифрового моделирования рельефа”) и Правительства Архангельской области (проект № 18-411-292001 р_мк “Исследование гуманитарно-географических образов этнокультурных ландшафтов Русского Севера как символического ресурса формирования имиджа северных и арктических территорий региона”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Глейзер И.В., Копанева И.М., Рублева Е.А.* Некоторые аспекты использования ГИС-технологий при морфометрическом анализе рельефа // Вестник Удмуртского университета, 2006. № 11. С. 143–146.
2. *Губайдуллин М.Г.* Геоэкологические условия освоения минерально-сырьевых ресурсов Европейского Севера России. Архангельск: Поморский госуниверситет. 2002. 310 с.
3. *Исаченко А.Г.* Физико-географическая характеристика региона // Состояние окружающей среды Северо-Западного и Северного регионов России. СПб: Наука, 1995. С. 7–30.
4. *Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., Полякова Е.В., Чистова З.Б.* Выбор базовой цифровой модели рельефа (ЦМР) равнинных территорий Севера Евразии и ее подготовка для геологического районирования (на примере Архангельской области). Пенза: “Социосфера”, 2019. 176 с.
5. *Минеев А.Л., Кутинов Ю.Г. Чистова З.Б., Полякова Е.В.* Подготовка цифровой модели рельефа для исследования экзогенных процессов северных территорий Российской Федерации // Пространство и Время. 2015. № 3 (21). С. 278–291.
6. *Минеев А.Л., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Полякова Е.В.* Геоэкологическое районирование территории Архангельской области с использованием цифровых моделей рельефа и ГИС-технологий // Пространство и Время. 2017. № 2–4 (28–30). С. 267–288.
7. *Минеев А.Л., Полякова Е.В., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б.* Методические аспекты создания цифровой модели рельефа Архангельской области на основе ASTER GDEM V.2 // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. URL: www.science-education.ru/129-21949
8. *Минеев А.Л., Полякова Е.В., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б.* Надёжность цифровой модели рельефа Архангельской области для проведения геоэкологических исследований // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 58–67. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-58-67
9. *Миняев А.П., Юдахин Ф.Н.* Экологические проблемы Архангельской области // Экологические проблемы Европейского Севера: Сб. науч. трудов. Екатеринбург: УрО РАН, 1996. С. 3–9
10. Опасные экзогенные процессы / Под ред. В.И. Осипова. М.: ГЕОС, 1999. 290 с.
11. *Полякова Е.В.* Геоморфометрический подход в геоэкологических исследованиях северных территорий страны // Успехи современного естествознания. 2018. № 3. С. 117–122. https://doi.org/10.17513/use.36712
12. *Полякова Е.В., Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., Чистова З.Б.* Цифровое моделирование рельефа в оценке вероятности развития эрозионных процессов в северных регионах страны // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 95–104. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-1-95-104
13. *Тоскунина В.Э.* Проблемы лесного комплекса Архангельской области и пути их решения // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2008. Вып. 3 (3). С. 29–31.
14. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results / ASTER GDEM Validation Team: METI/ERSDAC, NASA/LPDAAC, USGS/EROS, 2011.

http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/ver2Validation/Summary_GDEM2_validation_report_final.pdf

15. *Doumit J.A., Awad S.F.* DEM Spatial Resolution Impact On Hillslope Erosion and Deposition Modeling, an Application On Lebanese Watersheds // Sustainability in Environment, 2019. V. 4 (2). P. 75–85. https://doi.org/10.22158/se.v4n2p75
16. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications / Hengl T., Reuter H.I. (Eds.). Amsterdam: Elsevier, 2009. 796 p.
17. *Morissette L., Chartier S.* The k-means clustering technique: General considerations and implementation in Mathematica // Tutorials in Quantitative Methods for Psychology, 2013. V. 9 (1). P. 15–24. https://doi.org/10.20982/tqmp.09.1.p015
18. *Reily Sh.J., DeGloria St.D., Elliot R.* A Terrain Ruggedness Index That Quantifies Topographic Heterogeneity // Intermountain Journal of Science, 1999. V. 5 (1–4). P. 23–27.
19. *Vatti B.R.* A generic solution to polygon clipping // Communications of the ACM, 1992. V. 35 (7). P. 56–63. https://doi.org/10.1145/129902.129906

THE USE OF GEOMORPHOMETRIC ANALYSIS OF THE RELIEF UPON ECONOMIC ACTIVITY IN THE ARKHANGELSK REGION

E. V. Polyakova[a,#], Yu. G. Kutinov[a], A. L. Mineev[a], and Z. B. Chistova[a]

[a] *Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, nab. Severnoi Dviny, 23, Arkhangel'sk, 163000 Russia*

[#] *E-mail: lenpo26@yandex.ru*

This article shows the relationship of pollution sources with the natural zones of material drift, transit and accumulation identified on the basis of a digital elevation model as a result of geomorphometric analysis using the territory of the Arkhangelsk region as an example. As a result of data comparison, a spatial coincidence of the sources of anthropogenic environmental impact with the natural accumulation zone identified on the basis of the calculation of geomorphometric relief parameters (Slope, LS factor, Terrain Ruggedness Index) was found. The confinement of the zones of forestry impact to the natural zones of demolition and, to a greater extent, the transit of material distinguished according to the same parameters is also shown. To identify local areas of sediment accumulation for the purpose of sampling for soil pollution assessment monitoring, it is more appropriate to use the calculation of surface curvatures. The geomorphometric approach, unlike the one used by the Russian Hydrometeorological Service (according to an approximately uniform network), allows one to estimate the areas of pollutant accumulation at different levels of detail – from regional to local. It is in these areas that regular ground monitoring is necessary, and not the distribution of observation points evenly over the entire area.

Keywords: *digital elevation model*, *geomorphometric parameters*, *pollution source*, *Arkhangelsk region*

REFERENCES

1. Gleizer, I.V., Kopaneva, I.M., Rubleva, E.A. *Nekotorye aspekty ispol'zovaniya GIS-tekhnologii pri morfometricheskom analize rel'efa* [Some aspects in using GIS-technologies upon morfometric analysis of the relief]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta*, 2006, no. 11, pp. 143–146. (in Russian)
2. Gubaidullin, M.G. *Geoekologicheskie usloviya osvoeniya mineral'no-syr'evykh resursov Evropeiskogo Severa Rossii* [Geoenvironmental conditions of mineral resources development in the European North of Russia]. Arkhangel'sk, Pomorskii universitet Publ., 2002, 310 p. (in Russian)
3. Isachenko, A.G. *Fiziko-geograficheskaya kharakteristika regiona* [Physico-geographical characteristics of the region]. *Sostoyanie okruzhayushchei sredy Severo-Zapadnogo i Severnogo regionov Rossii* [The environment state in the North-Western and Northern regions of Russia]. St. Petersburg, Nauka Publ., 1995, pp. 7–30. (in Russian)
4. Kutinov, Yu.G., Mineev, A.L., Polyakova, E.V., Chistova, Z.B. *Vybor bazovoi tsifrovoi modeli rel'efa (TsMR) ravninnykh territorii Severa Evrazii i ee podgotovka dlya geologicheskogo raionirovaniya (na primere Arkhangel'skoi oblasti)* [Selection of basic digital elevation model (DEM) for Eurasian North plains and its validation for geological zoning (by the example of Arkhangel'skaya oblast)]. Penza, Sotsiosfera Publ., 2019, 176 p. (in Russian)
5. Mineev, A.L., Kutinov, Yu.G., Chistova, Z.B., Polyakova, E.V. *Podgotovka tsifrovoi modeli rel'efa dlya issledovaniya ekzogennykh protsessov severnykh territorii Rossiiskoi Federatsii* [Validation of digital elevation model for the study of exogenous processes in the northern areas of the Russian Federation]. *Prostrnastvo i vremya,* 2015, no. 3 (21), pp. 278–291. (in Russian)
6. Mineev, A.L., Kutinov, Yu.G., Chistova, Z.B., Polyakova, E.V. *Geoekologicheskoe raionirovanie territorii Arkhangel'skoi oblasti s ispol'zovaniem tsifrovykh modelei rel'efa i GIS-tekhnologii* Geoenvironmental zoning of the Arkhangelsk oblast territory using DEMs and GIS-technologies]. *Prostranstvo i vremya,* 2017, no. 2–4 (28–30), pp. 267–288. (in Russian)
7. Mineev, A.L., Polyakova, E.V., Kutinov, Yu.G., Chistova, Z.B. *Metodicheskie aspekty sozdaniya tsifrovoi modeli rel'efa Arkhangel'skoi oblasti na osnove STER GDEM V.2* [Methodical aspects of DEM development

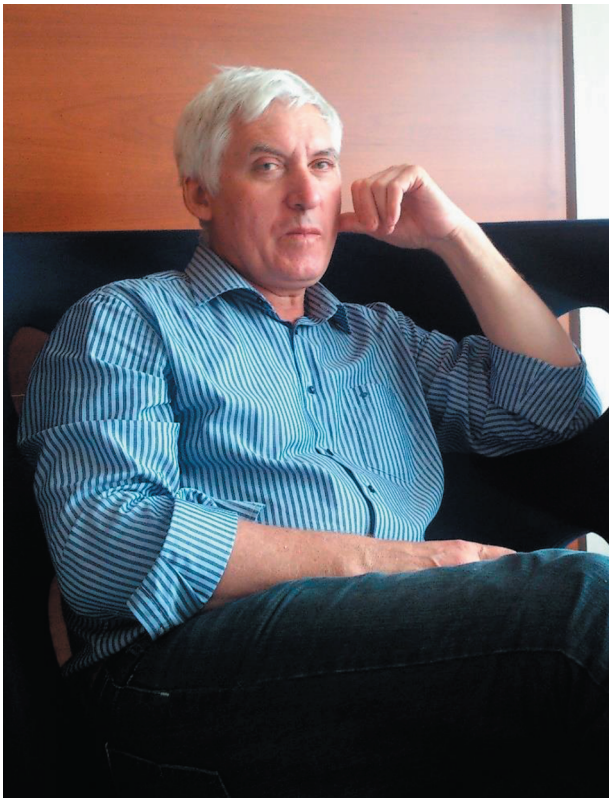
for Arkhangel'skaya oblast based on STER GDEM V.2]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2015, no. 2. URL: www.science-education.ru/129-21949 (in Russian)

8. Mineev, A.L., Polyakova, E.V., Kutinov, Yu.G., Chistova, Z.B. *Nadezhnost' tsifrovoi modeli rel'efa Arkhangel'skoi oblasti dlya provedeniya geoekologicheskikh issledovanii* [Reliability of digital elevation model for Arkhangelsk oblast for geoecological studies]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, vol. 15, no. 4, pp. 58–67. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-58-67 (in Russian)
9. Minyaev, A.P., Yudakhin, F.N. *Ekologicheskie problemy Arkhangel'skoi oblasti* [Ecological problems in Arkhangel'sk oblast]. *Ekologicheskie problemy Evropeiskogo Severa* [Ecological problems of the European North]. Yekaterinburg, UrO RAN Publ., 1996, pp. 3–9. (in Russian)
10. *Opasnye ekzogennye protsessy* [Hazardous exogenous processes]. Osipov, V.I., Ed., Moscow, GEOS, 1999, 290 p. (in Russian)
11. Polyakova, E.V. *Geomorfometricheskii podkhod v geoekologicheskikh issledovaniyakh severnykh territorii strany* [Geomorfometric approach in geoecological studies of the northern regions of the country]. *Uspekhi sovremennogo estesvoznaniya,* 2018, no. 3, pp. 117–122. https://doi.org/10.17513/use.36712 (in Russian)
12. Polyakova, E.V., Kutinov, Yu.G., Mineev, A.L., Chistova, Z.B. *Tsifrovoe modelirovanie rel'efa v otsenke veroyatnosti razvitiya erozionnykh protsessov v severnykh regionakh strany* [Digital elevation modeling in assessing the probability of development of exogenous processes in the northern regions of the country]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, vol. 16, no. 1, pp. 95–104. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-1-95-104 (in Russian)
13. *Toskunina, V.E. Problemy lesnogo kompleksa Arkhangel'skoi oblasti i puti ikh resheniya* [Problems of forest complex in the Arkhangelsk oblast and ways to solve them]. *Ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz*, 2008, issue 3(3), pp. 29–31. (in Russian)
14. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results / ASTER GDEM Validation Team: METI/ERSDAC, NASA/LPDAAC, USGS/EROS, 2011. http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/ver2Validation/Summary_GDEM2_validation_report_final.pdf
15. Doumit, J.A., Awad, S.F. DEM Spatial resolution impact on hillslope erosion and deposition modeling, an application on Lebanese watersheds. *Sustainability in Environment*, 2019, vol. 4 (2), pp. 75–85. http://dx.doi.org/10.22158/se.v4n2p75
16. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Hengl, T., Reuter, H.I. (Eds.). Amsterdam, Elsevier, 2009. 796 p.
17. Morissette, L., Chartier, S. The k-means clustering technique: General considerations and implementation in Mathematica. *Tutorials in Quantitative Methods for Psychology,* 2013, vol. 9 (1), pp. 15–24. http://dx.doi.org/10.20982/tqmp.09.1.p015
18. Reily, Sh.J., DeGloria, St.D., Elliot, R. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. *Intermountain Journal of Science*, 1999, vol. 5 (1–4), pp. 23–27.
19. Vatti, B.R. A generic solution to polygon clipping. *Communications of the ACM,* 1992, vol. 35 (7), pp. 56–63. http://dx.doi.org/10.1145/129902.129906

ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2021, № 2, с. 96–98

ЮБИЛЕИ

АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ ВИКТОРОВ (К 70-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)



1 февраля 2021 г. исполнилось 70 лет известному ученому Алексею Сергеевичу Викторову, специалисту в области ландшафтоведения, инженерной геологии и геоэкологии, автору более 150 научных работ, включая монографии.

А.С. Викторов родился в семье выдающегося биолога и географа Сергея Васильевича Викторова, создателя школы индикационного ландшафтоведения, и стал не только достойным продолжателем традиций своего отца, но и создал собственное направление в науках о Земле.

Его мама, Валентина Андреевна Викторова, была сотрудником Библиотеки им. Ленина, и детский читальный зал “Ленинки” был любимым местом занятий Алексея, что, несомненно, отразилось в его высочайшем кругозоре. В 1968 г. Алексей Викторов окончил школу с золотой медалью. В том же году поступил на географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, который окончил в 1973 г. с красным дипломом. Однако А.С. Викторов всегда интересовался и серьезно изучал еще более сложную дисциплину – математику. И в МГУ у него была счастливая возможность посещать вечерний механико-математический факультет в качестве вольного слушателя. Это не было отмечено в официальных бумагах, но дало ему такой высокий уровень математических знаний и навыков, что впоследствии он смог не только развить свое направление на базе математических моделей, но и преподавать математику в технических вузах в сложные 1980–1990-е гг.

Сразу после окончания университета А.С. Викторов поступил в аспирантуру, где его руководителем стал зав. кафедрой физической географии СССР профессор Николай Андреевич Гвоздецкий. В 1976 г. практически сразу после окончания аспирантуры А.С. Викторов успешно защитил диссертацию на соискание звания кандидата географических наук по теме “Ландшафтно-структурный анализ аэро- и космических снимков в целях геологического дешифрирования (на примере аридных территорий)”. Уже в этой ранней работе появились понятия, заложившие основу научного направления, связанного с ландшафт-

ным рисунком и количественными показателями, описывающими морфологическую структуру ландшафта.

Научно-производственная деятельность А.С. Викторова официально началась в 1976 г. в лаборатории аэрокосмических методов Всесоюзного НИИ гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО), однако еще с юношеских лет он каждое лето проводил в пустынях и полупустынях Средней Азии и навсегда полюбил их опасную красоту. Во ВСЕГИНГЕО Алексей Сергеевич занимался разработкой теории и практики использования дистанционных методов в гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. Много лет возглавлял экспедиционные партии в пустынных регионах (Туркмения, Устюрт, Мангышлак, Кызылкумы), и результаты этих изысканий легли в основу его уже докторской диссертации, также посвященной аридным ландшафтам. В частности, А.С Викторов выполнял работы по мониторингу опасных геологических процессов (Туркмения, Узбекистан), созданию и применению дистанционных методов поисков подземных вод (Тургайский прогиб), поиску термальных вод (Южный Нуратау), инженерно-геологическому картированию. Неоднократно получал благодарности руководства за проведение курсов повышения квалификации, а также был награжден медалями ВДНХ за разработки по аэрокосмическим методам поисков подземных вод.

А.С. Викторов продолжил исследования в области индикационного ландшафтоведения и аэроландшафтной индикации, начатые его отцом С.В. Викторовым. Однако в исследованиях он использовал свои знания математических методов. Он провел количественный анализ глубинности геоиндикационных связей разной природы, систематизировал данные об индикационном значении количественных показателей морфологических структур и методах их использования. А.С. Викторов разработал и предложил методы аналитической оценки сравнительной информативности показателей. Результаты этих исследований отражены в многочисленных публикациях, в том числе в коллективных монографиях “Аэрокосмические методы поиска подземных вод” и “Аэроландшафтно-индикационные методы при региональных инженерно-геологических исследованиях ”.

В процессе больших региональных исследований аридных территорий, проводимых во ВСЕГИНГЕО, он изучал геоморфологические и ландшафтные условия, экзогенную геодинамику Устюрта, Тургайского прогиба, Мангышлака, подгорной равнины Копет-Дага, Приаралья, Кзыл-Кумов, Южного Нуратау; с его участием впервые составлены гидроиндикационные карты Тургайского прогиба, ландшафтная карта Устюрта, карта условий магазинирования поверхностного стока Устюрта и равнинного Мангышлака.

“Ландшафтный рисунок северных пустынь”, так называлась докторская диссертация А.С. Викторова, защищенная им в 1988 г. в возрасте 37 лет. Это фундаментальный свод качественных и количественных методов анализа морфологической структуры ландшафта, включая теорию и практику применения результатов анализа ландшафтного рисунка, как индикатора природных процессов на примере аридных территорий. Жаль, что в отличие от работ цифровой эпохи, современные исследователи не имеют к ней доступа. Этот труд и сейчас не утратил своей актуальности.

В 1992 г. А.С. Викторов перешел на работу в Научный геоинформационный центр РАН, где работал заведующим лабораторией методов дешифрирования материалов аэрокосмических съемок и заместителем директора по научной работе. За это время им выполнены работы по методам дешифрирования на основе математических моделей ландшафтных рисунков и дистанционному мониторингу районов нефтедобычи.

В 1996 г. А.С. Викторов в составе коллектива удостоен Государственной премии в области науки и техники за цикл работ по комплексному дистанционному зондированию при проектировании и эксплуатации геотехнических систем.

С 1996 г. Алексей Сергеевич работает в Институте геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН) заведующим лабораторией дистанционного мониторинга геологической среды, с 2006 г. – заместителем директора по научной работе, а с сентября 2020 г. и.о. директора института. За время работы в ИГЭ РАН он был награжден Премией Правительства РФ (2003), Национальной экологической премией (2004), премией РАН им. А.А. Григорьева (2006). В рамках исследований института А.С. Викторов занялся разработкой теории систем мониторинга геологической среды. На различном материале проведено изучение наиболее рациональной структуры систем геомониторинга. В процессе исследований обоснована целесообразность основных точек комплексного контроля состояния геологической среды, разработаны принципы их размещения, предложены способы сочетания автоматических средств контроля, средств контроля в режиме посещения и аэрокосмических средств; совместно с коллективом специалистов разработан рациональный геоинформационный комплекс для ведения комплексного мониторинга природной среды. Фактические исследования были апробированы при создании и реализации проектов систем мониторинга геологической среды в зоне крупных сооружений – газотранспортной системы “Голубой поток”, Северо-Европейского газопровода, мегапроекта Ямал, горно-обогатительного комбината месторождения алмазов

им. М.В. Ломоносова, системы мониторинга опасных геологических процессов и подземных вод мегаполиса Москва, магистрального нефтепровода ВСТО. На материале этих исследований А.С. Викторовым опубликованы многочисленные научные работы, среди них монографии: “Природные опасности России” (2002) (в соавторстве) и “Аэрокосмический мониторинг геологической среды” (в соавторстве).

После написания докторской диссертации, которая стала итогом его многолетних трудов в исследовании ландшафтов Средней Азии, А.С. Викторов сосредоточился на создании нового направления в науках о Земле, названного им “математическая морфология ландшафта”. В основе математической морфологии ландшафта лежит комплекс разрабатываемых А.С. Викторовым математических моделей морфологических структур природных ландшафтов, созданных экзогенными геологическими процессами различных генетических типов. В основе разработки моделей лежит использование теории случайных процессов. Обоснована инвариантность моделей относительно климатических условий. Показана возможность использования математических моделей морфологических структур для решения задач исследования динамики экзогенных геологических процессов, выявления состояний динамического равновесия ландшафтов, оценки природных рисков, изучения закономерностей фациальной изменчивости, оценки изменчивости инженерно-геологических условий, получения новых геоиндикационных взаимосвязей, для создания новых методов и программных комплексов текстурного анализа материалов аэрокосмических съемок для целей инженерной геологии, геоэкологии и гидрогеологии. Основные результаты исследований в области математической морфологии ландшафта нашли отражение в многочисленных публикациях в российских и зарубежных научных изданиях, а также монографиях “Математическая морфология ландшафта” (1998) и “Основные проблемы математической морфологии ландшафта” (2006), отмеченная премией РАН им. А.А. Григорьева.

В последние годы главным объектом исследований А.С. Викторова стала криолитозона. Об этом свидетельствуют выполненные под его руководством исследования по грантам РФФИ: “Развитие морфологических структур термокарстовых равнин Арктики и Субарктики: вероятностное моделирование”, “Разработка новых методов оценки природных рисков для транспортно-коммуникационных сетей Сибири и дальнего Востока на базе дистанционных съемок”, и гранту РНФ “Динамическое равновесие морфологических структур в ландшафтах криолитозоны в условиях изменения климата”. Промежуточным итогом этих работ стала коллективная монография “Математическая морфология ландшафтов криолитозоны” (2016). Список ее соавторов отражает список учеников и коллег А.С. Викторова, которых он сумел вырастить в эти непростые для науки годы.

Три защищенные под руководством А.С. Викторова кандидатские диссертации и одна докторская, неофициальным консультантом которой он был, охватывают почти весь спектр научных интересов А.С. Викторова от классического анализа ландшафтного рисунка, до дистанционного геоэкологического мониторинга и новейших исследований в области математических моделей морфологических структур криолитозоны. А.С. Викторов вдумчивый и внимательный руководитель, он позволяет своим ученикам самим выбрать направление исследований и поддерживает их даже тогда, когда они далеко отходят от его собственных разработок.

А.С. Викторов также приложил немало усилий к повышению уровня научных исследований в ИГЭ РАН, способствуя развитию комплексных межлабораторных исследований. Долгие годы он возглавлял научный семинар ИГЭ РАН, всегда глубоко вникая в результаты исследований своих коллег. Географ по образованию, он признан как авторитетный специалист и инженер-геологами, и геокриологами.

А.С. Викторов разработал авторские курсы “Математическая морфология ландшафта” и “Анализ пространственных географических структур” и с 2000 г. преподает их в своей альма-матер, географическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова. Кроме того, он выполняет большую научно-организационную работу, являясь председателем Экспертного совета по наукам о Земле ВАК РФ.

А.С. Викторов – член диссертационных советов географического факультета МГУ и ИГЭ РАН, член Ученого Совета Московского отделения Русского Географического общества. А.С. Викторов – член редколлегий научных журналов, “Геоэкология”, “Исследования Земли из космоса”, “Геоморфология”; участвовал в качестве эксперта в ряде важнейших государственных экологических экспертиз – нефтепровода “Восточная Сибирь-Тихий Океан”, проектов “Сахалин-I” и “Сахалин-II”, газопровода “Голубой поток” и других.

Алексей Сергеевич продолжает активную научную деятельность, как и прежде совмещая исследовательскую работу с преподавательской и экспертной деятельностью. В последний год на его плечи легла также и большая административная нагрузка по руководству института.

Поздравляем Алексея Сергеевича с юбилеем, искренне желаем ему новых научных достижений, исполнения творческих замыслов и, конечно, крепкого здоровья.

Коллектив ИГЭ РАН
Редколлегия журнала