

ISSN 0869-7809

Номер 3

Май–Июнь 2024



ГЕОЭКОЛОГИЯ

Инженерная геология
Гидрогеология
Геокриология



НАУКА

— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 3, 2024

Академик Е.М. Сергеев — лидер региональной инженерной геологии
(к 110-летию со дня рождения)

*В. И. Осипов, А. С. Герасимова, Л. В. Шаумян,
О. Н. Еремина, Н. А. Румянцева*

3

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Особенности водного режима Верхней Свияги и ее притоков в условиях
развития карстовых процессов

И. А. Жуков, Д. Н. Айбулатов

11

Особенности геоэкологии микроприливных устьев малых рек с наличием дельты
в районах арктической зоны России в летне-осеннюю межень на примере
устья реки Кадь в Белом море

И. В. Мискевич, Д. С. Мосеев, А. Е. Яковлев

22

Геоботаническая индикация состояния нарушенных торфяников
для оценки пожароопасности

*Т. В. Орлов, М. В. Архипова, В. В. Бондарь, Р. О. Разумовский,
В. А. Смагин, К. Л. Шахматов*

30

ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

Причины унаследованности состава и свойств красноцветных грунтов современной
коры выветривания в пределах западной части Сычуаньской впадины Китая

И. Пэн, И. Ю. Григорьева

44

Эколого-геохимические исследования обломочного материала Бурейского оползня
после циклического замерзания/оттаивания *in vitro*

Л. М. Кондратьева, Е. М. Голубева, Н. С. Коновалова

59

УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

Летучая зола от сжигания твердых коммунальных отходов: виды, состав,
выщелачивание тяжелых металлов

Т. И. Юганова, В. С. Путилина

71

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Методические основы оценки геоэкологических и социально-экономических условий
оптимального размещения полигонов ТКО

В. Г. Заиканов, Т. Б. Минакова, Е. В. Булдакова

88

CONTENTS

Number 3, 2024

Academician E.M. Sergeev as the leader of regional engineering geology
(to the 110-th anniversary of birthday)

V. I. Osipov, A. S. Gerasimova, L. V. Shaumyan, O. N. Eremina, N. A. Rumyantseva

3

NATURAL AND TECHNONATURAL PROCESSES

Water regime specifics in the upper Sviyaga River and its tributaries upon karst development

I. A. Zhukov, D. N. Aybulatov

11

Geoenvironmental specifics in the microtidal mouths of small rivers with deltas
in the Russian Arctic zone during the summer-fall low water season by the example
of the Kad River mouth, the White Sea

I. V. Miskevich, D. S. Moseev, A. E. Yakovlev

22

Geobotanical indication of the drained state of disturbed peatlands for the fire hazard assessment

*T. V. Orlov, M. V. Arkhipova, V. V. Bondar, R. O. Razumovsky,
V. A. Smagin, K. L. Shakhmatov*

30

SOIL AND ROCK ENGINEERING AND MECHANICS

The reasons for the inheritance of the composition and properties
of red-colored soils of the modern weathering crust within the western part
of the Sichuan Basin of China

Yizhou Peng, I. Yu. Grigorieva

44

Ecological and geochemical studies of clastic material from the Bureya landslide
after cyclic freezing/thawing *in vitro*

L. M. Kondratyeva, E. M. Golubeva, N. S. Kononova

59

UTILIZATION AND DISPOSAL OF WASTE

Fly ash from municipal solid waste incineration: types, composition,
and leaching of heavy metals

T. I. Yuganova, V. S. Putilina

71

RESEARCH METHODS AND TECHNIQUES

Methodological bases for assessing geoenvironmental and socioeconomic conditions
of optimal allocation of MSW landfills

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

88

УДК 556.5

АКАДЕМИК Е.М. СЕРГЕЕВ – ЛИДЕР РЕГИОНАЛЬНОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ (К 110-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)

© 2024 г. В. И. Осипов^{1,*}, А. С. Герасимова¹, Л. В. Шаумян¹, О. Н. Еремина¹,
Н. А. Румянцева¹

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

*E-mail: osipov@geoenv.ru

Поступила в редакцию 27.03.2024 г.

После доработки 27.03.2024 г.

Принята к публикации 03.06.2024 г.

Статья подготовлена в память и в честь 110 годовщины со дня рождения академика Евгения Михайловича Сергеева и отражает его вклад в развитие одного из основных направлений современной инженерной геологии – региональных инженерно-геологических исследований. Кратко освещены работы в области региональной инженерной геологии, которые проводила кафедра грунтоведения и инженерной геологии МГУ им. М.В. Ломоносова под руководством Е.М. Сергеева за 30 лет.

DOI: 10.31857/S0869780924030015 EDN: SPWJWF

23 марта 2024 г. исполнилось 110 лет со дня рождения академика Евгения Михайловича Сергеева (1914–1997 гг.) – крупнейшего советского и российского ученого в области грунтоведения, инженерной геологии и охраны геологической среды, выдающегося педагога высшей школы и организатора науки, инициатора создания и первого главного редактора журнала “Инженерная геология” (с 1992 г. выходит под названием “ГЕОЭКОЛОГИЯ. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология”) (рис. 1). Более четверти века прошло со времени ухода из жизни этого выдающегося человека. Годы все более отчетливо высвечивают масштаб его личности.

Научно-педагогическая, административная, общественная и партийная деятельность Евгения Михайловича была очень разносторонней. Только в Московском университете Е.М. Сергеев занимал пост декана геологического факультета МГУ (1954–1957, 1963–1964), проректора МГУ (1964–1969), первого проректора МГУ (1969–1978). В 1941, 1945–1948 гг. он избирался секретарем парткома МГУ, а в 1981–1986 гг. возглавлял Академию народного хозяйства при Совете министров СССР. Но несмотря на чрезвычайную административную занятость, главным делом его жизни всегда была наука. Е.М. Сергеев выдвинул инженерную геологию на передовые позиции отечественной науки и оставил огромное наследие в разных областях инженерно-геологического знания.

За последние десятилетия коллегами и учениками Евгения Михайловича опубликовано много воспоминаний о различных направлениях его



Рис. 1. Академик Е.М. Сергеев (1914–1997 гг.).

многогранной научной, научно-организационной и педагогической деятельности [1, 2, 7, 8, 12]. В память о Евгении Михайловиче ежегодно, начиная с 1999 г., проводится конференция “Сергеевские чтения”, научная тематика которой отражает актуальные проблемы современной инженерной геологии и геоэкологии. В 2024 г. юбилей академика Е.М. Сергеева совпал с юбилейными, XXV по счету, “Сергеевскими чтениями”, на которых обсуждались современное состояние и направления развития одного из важнейших направлений

инженерной геологии — региональной инженерной геологии, которое наряду с грунтоведением и инженерной геодинамикой формирует общую структуру современной инженерной геологии, замыкая, по определению академика М.В. Сергеева, круг объектов исследования “грунты–процессы–территории”.

Цель данной статьи — еще раз напомнить новому поколению специалистов, не знавших лично академика Е.М. Сергеева, о его вкладе в развитие одного из основных направлений инженерной геологии — региональных инженерно-геологических исследований.

Евгений Михайлович Сергеев в течение почти 35 лет (с 1954 по 1988 г.) возглавлял кафедру грунтоведения и инженерной геологии Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (с 1986 г. кафедра инженерной геологии и охраны геологической среды, с 1998 г. кафедра инженерной и экологической геологии). За годы его руководства кафедра стала бесспорным лидером инженерной геологии в СССР, центром притяжения не только отечественных, но и зарубежных специалистов. В 1950–1980 гг. региональная инженерная геология утвердилась как одно из трех приоритетных направлений научной деятельности кафедры, наряду с грунтоведением и инженерной геодинамикой. Именно в этот период по инициативе и под руководством Е.М. Сергеева были организованы крупные региональные экспедиционные работы, проведены исследования по трассе Главного Туркменского канала, по долинам рек Обь, Иртыш, Енисей, Амур, в Восточной и Западной Сибири, Нечерноземной зоне Европейской части РСФСР.

Приведем перечень основных экспедиций, организатором, научным руководителем, а во многих

случаях и непосредственным участником которых являлся Е.М. Сергеев [11]: Каракумская (1950–1954), Обская (1954–1963), Амурская (1957–1959), Красноярская (1960–1963), Западно-Сибирская (1964–1974) и Тюменская экспедиции (1964–1992), экспедиция БАМ (1975–1992), Нечерноземной зоны РСФСР (1977–1984), Кольская (1977–1983). О масштабе проводимых на кафедре региональных работ свидетельствуют следующие цифры: в 1960–1970 гг. в учебном штате кафедры состояли 35 человек, а число сотрудников экспедиций кафедры достигало 150 человек [5]. Эти экспедиции, связанные с решением крупных народнохозяйственных задач, сыграли огромную роль в развитии инженерной геологии как науки и в подготовке инженерно-геологических кадров. В процессе экспедиционных работ была разработана методика мелкомасштабного картирования обширных территорий, собран уникальный материал, позволивший систематизировать сведения об инженерно-геологических условиях территорий, относящихся к различным структурно-тектоническим регионам, таким как юг Туркмении, Западно-Сибирская плита, Сибирская платформа, Восточно-Европейская платформа, Таджикистан, Северный Кавказ, долина Верхнего Амура и др. [11].

В краткой статье трудно описать все работы в области региональной инженерной геологии, которые проводила кафедра грунтоведения и инженерной геологии под руководством Е.М. Сергеева за 30 лет. Подробно об организации экспедиционных работ кафедры в этот период неоднократно рассказывали их участники: А.С. Герасимова, Д.Г. Зилинг, Л.В. Шаумян, Н.С. Красиловa [1, 3, 4–6, 12], а также сам Евгений Михайлович в своих воспоминаниях [9]. Вкратце



Рис. 2. Е.М. Сергеев в Каракумской экспедиции (1951 г.).



Рис. 3. Е.М. Сергеев и С.С. Морозов в Обской экспедиции (1954 г.).

остановимся лишь на некоторых из крупных региональных исследований.

Первой крупной экспедицией, научным руководителем, начальником и непосредственным участником которой являлся Е.М. Сергеев, была Каракумская экспедиция (1950–1953 гг.). Инвалид Великой Отечественной войны, перенесший ампутацию ноги, Евгений Михайлович к началу 1950-х гг. освоил протез и отказался от костылей, что позволило ему принимать личное участие в полевых геологических маршрутах (рис. 2).

В эти годы в стране стояла острая необходимость расширения региональных инженерно-геологических исследований в связи с послевоенным восстановлением народного хозяйства и освоением природных ресурсов Западной Сибири, Средней Азии и Дальнего Востока. В 1950 г. по просьбе Проектно-изыскательского и научно-исследовательского Института Гидропроект Е.М. Сергеев заключил договор с этой организацией об инженерно-геологическом исследовании песков вдоль трассы проектируемого Главного Туркменского канала.

Трасса канала должна была проходить в песках на протяжении почти 500 км. Требовалось оценить водопроницаемость песков и их устойчивость в откосах. В экспедиционных работах принимали участие как сотрудники кафедры (С.С. Поляков, П.И. Фадеев и др.), так и аспиранты, выпускники и студенты-дипломники, большинство из которых впоследствии защитили диссертации по материалам экспедиции – М.В. Болдина, Л.Г. Рекшинская, Г.А. Куприна, И.И. Вахтанова, Р.С. Зиангиров, В.А. Мощанский, Л.А. Романовская [1, 7]. Итогом трехлетней работы Каракумской экспедиции стало детальное изучение процесса кольятации песков, установление ряда новых закономерностей в поведении откосов, сложенных водонасыщенными мелкими песками.

Был предложен новый вариант трассы, позволяющий уйти от перенасыщенных солями песков древней долины р. Узбой. Однако после смерти И.В. Сталина в 1953 г. строительство Главного Туркменского канала было приостановлено, а позднее проект был полностью пересмотрен. Тем не менее, выполненные под руководством Е.М. Сергеева работы внесли существенный вклад в отечественную и мировую литературу по инженерно-геологическому изучению песков.

В 1954 г. руководство Института Гидропроект предложило Е.М. Сергееву начать работы в Западной Сибири. Ставилась задача составить мелкомасштабные инженерно-геологические карты долин рек Иртыш и Обь с целью оценки возможности их гидроэнергетического использования (рис. 3).

Впоследствии в планы были внесены изменения, и экспедиция перешла на площадное инженерно-геологическое картирование (1:1 500 000) всей территории Западной Сибири, которая была совершенно не изучена в инженерно-геологическом отношении. Эти работы оказались очень востребованы, так как вскоре в Западной Сибири были открыты крупнейшие месторождения нефти и газа, началось мощное промышленное освоение этого региона.

Для изучения территории площадью 3.5 млн км², в том числе недоступных из-за сильной заболоченности участков междуречий, наряду с маршрутными исследованиями широко применялись дистанционные методы – анализ аэрофотоснимков. Материалы инженерно-геологической съемки оперативно передавались проектировщикам и находили практическое применение. Работа по инженерно-геологическому картированию Западной Сибири заняла у Е.М. Сергеева и его коллег почти 18 лет. В 1972 г. уникальные карты были изданы вместе с пояснительными записками.



Рис. 4. Ректор МГУ им. М.В. Ломоносова И.Г. Петровский вручает Е.М. Сергееву диплом лауреата Ломоносовской премии (1976 г.).

В целом работы по Западной Сибири силами Обской, Западно-Сибирской и Тюменской экспедиций продолжались почти 40 лет вплоть до 1992 г. В этих работах принимали участие многие сотрудники кафедры (С.С. Морозов, С.С. Поляков, Г.Г. Ильинская и др.), а также большой коллектив студентов и аспирантов, защитивших под руководством Е.М. Сергеева дипломы и кандидатские диссертации. Среди них – А.С. Герасимова, А.В. Минервин, В.Т. Трофимов, А.И. Сергеев, Г.М. Терешков, С.Б. Ершова, Н.А. Филькин и многие другие. В.Т. Трофимов позднее защитил докторскую диссертацию по результатам исследований в этом регионе [1, 2].

Работы по Западной Сибири, выполненные под научным руководством Е.М. Сергеева, послужили мощным толчком в развитии региональной инженерной геологии. В них были развиты основные теоретические принципы инженерно-геологического картирования крупных регионов, разработана методика ведения работ, в том числе труднодоступных территорий, даны примеры комплексной оценки инженерно-геологических условий с учетом природных региональных и зональных факторов, созданы научные основы типизации территорий.

За многолетние плодотворные исследования в Западной Сибири, внесшие большой вклад

в освоение этого региона и разработку теоретических основ региональной инженерной геологии, в 1976 г. Евгений Михайлович был удостоен высшей награды Московского университета – Премии им. М.В. Ломоносова I степени за научные результаты теоретического и прикладного характера (рис. 4), а в 1977 г. ему и основным исполнителям работ (В.В. Баулину, А.С. Герасимовой, С.Б. Ершовой, В.Т. Трофимову) была присуждена Государственная премия СССР.

Одновременно с работами в Западной Сибири в 1957 г. Е.М. Сергеев приступил к изучению инженерно-геологических условий долин рек Шилка, Аргунь и Амур с целью строительства ГЭС и регулирования их стока для предотвращения наводнений. В этих работах было заинтересовано не только советское правительство, но и китайское руководство. Работы включали инженерно-геологическую съемку в масштабе 1 : 500000 на несколько сот километров по долинам рек. Полоса съемки составляла 35 км и захватывала как советский, так и китайский берега Амура. Амурская экспедиция была комплексной. В ее работе участвовали сотрудники, аспиранты и студенты (в том числе китайские) нескольких кафедр геологического факультета МГУ, а также китайские геологи. Основным направлением исследований в долине Амура была разработка принципов

инженерно-геологического районирования долин крупных рек для целей гидротехнического строительства, а также составление региональных инженерно-геологических классификаций горных пород. Подробно о работе Амурской экспедиции рассказали в своих воспоминаниях ее непосредственные участники: А.С. Герасимова и Н.С. Красилова [1, 3, 6]. Результаты исследований нашли отражение в ряде крупных публикаций, в том числе в монографии “Геологическое строение и инженерно-геологическая характеристика долины Верхнего Амура”, вышедшей в 1962 г. в издательстве МГУ под редакцией Г.П. Леонова и Е.М. Сергеева.

Последней экспедицией, организацию которой осуществил Е.М. Сергеев, была экспедиция по комплексному изучению Нечерноземной зоны РСФСР. В 1976 г. вышло Постановление Правительства о возрождении Нечерноземья, в соответствии с которым Е.М. Сергееву было предложено составить серию специальных карт, необходимых для хозяйственного освоения этой территории площадью 2,7 млн км². Эта работа была не менее масштабная, чем в Западной Сибири. Исследования также проводились комплексно: наряду с геологами в них участвовали почвоведы, биологи, географы МГУ, а также представители других организаций — всего 196 человек. Начальником экспедиции был назначен Г.М. Терешков. К работе экспедиции были привлечены ведущие ученые МГУ: Г.В. Добровольский, Ф.Р. Зейдельман, Г.А. Голодковская, А.Н. Ракитников, Н.Н. Николаев и др. Кроме того, в работах участвовали 137 студентов МГУ, многие из которых выполняли курсовые и дипломные работы по материалам экспедиции. Нечерноземная экспедиция за сравнительно короткий срок (1977–1980 гг.) выполнила поставленные перед ней задачи: было составлено 16 тематических карт территории Нечерноземной зоны РСФСР (1 : 1 500 000), а также ряд оригинальных карт: геоморфолого-неотектонического районирования, почвенно-географического районирования, сельскохозяйственного использования земельных угодий, грунтовых толщ, изменения геологической среды в связи с разработкой месторождений полезных ископаемых и др.

Обобщая сказанное об экспедиционных работах под руководством Е.М. Сергеева, отметим, что он всегда использовал свой научный авторитет и талант организатора для того, чтобы кафедра участвовала в работах на объектах, имеющих важнейшее народнохозяйственное значение. Как отмечала Л.В. Шаумян [12], практически все работы, которые выполняла кафедра, были связаны с важнейшими и крупными объектами страны. Авторитет кафедры и лично Е.М. Сергеева был так велик, что все самые ответственные инженерно-геологические исследования страны поручались кафедре инженерной геологии МГУ,

хотя в стране был Всесоюзный научно-исследовательский институт гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО, Мингео СССР) и авторитетные кафедры инженерной геологии в других вузах [12]. Все осуществляемые работы были востребованы, выполнялись по заказу государства, а их результаты имели важное научное значение и получали практическое внедрение. Все экспедиционные работы завершались обобщением и систематизацией накопленного материала, изданием карт, выпуском коллективных монографий, докладами на крупных международных научных конференциях, защитой диссертаций. Так, из 75 кандидатских диссертаций, подготовленных и защищенных под руководством Е.М. Сергеева, 25 посвящены решению научных задач региональной инженерной геологии [11].

И еще одна особенность экспедиций кафедры — все они были комплексными. Как вспоминает Л.В. Шаумян [1, 12]: “... это был период, когда наша наука отличалась комплексностью и скоординированностью со всеми смежными науками. В наших экспедициях и во всех исследованиях принимали участие не только смежные кафедры нашего факультета, но и другие факультеты: географический, биолого-почвенный. Это были комплексные, очень масштабные работы, которые привлекали лучших специалистов. Кроме того, кафедра работала в тесном содружестве с другими институтами — МГРИ, Ленинградским горным институтом, Московским горным институтом, Ленинградским университетом, Горным институтом Кольского филиала АН СССР, ВСЕГИНГЕО, Гидропроект, Фундаментпроект и др. И всю эту работу координировал и направлял Евгений Михайлович. Без такого содружества расцвет нашей науки был бы невозможен”.

Помимо масштабных экспедиционных работ яркий научно-организационный талант Е.М. Сергеева проявился в серии крупнейших фундаментальных научных проектов, выполненных кафедрой под его руководством и послуживших разработке теоретических основ инженерной геологии. Важнейшим из таких проектов, несомненно, является многотомная монография “Инженерная геология СССР” [12]. По воспоминаниям Д.Г. Зилинга, идея создания такой монографии пришла Евгению Михайловичу после сосредоточения на кафедре огромного фактического материала по инженерной геологии Западной и Восточной Сибири, Европейского Севера, бассейна Амура, полученного в результате полевых работ [4]. Появилась возможность использовать эти материалы, а также имеющиеся данные в других институтах АН СССР и академиях союзных республик, для реализации идеи профессора И.В. Попова о создании фундаментальной монографии “Инженерная геология СССР”. Потребовались огромный творческий запал и организационный талант Е.М. Сергеева, чтобы с позиций единого методологического



Рис. 5. Визит профессора У. Дирмана на кафедру грунтоведения и инженерной геологии МГУ им. М.В. Ломоносова (слева направо: Н.С. Красилова, Е.М. Сергеев, У. Дирман, С.Б. Ершова).

подхода дать комплексную инженерно-геологическую оценку всей территории страны. Евгений Михайлович не только поддержал идею создания этого действительно выдающегося произведения, предложил структуру его построения, но и добился бюджетного, государственного финансирования этой работы, организовал ее выполнение как работы межведомственной. Среди авторов «Инженерной геологии СССР» были представители организаций Министерства геологии СССР, вузов СССР, Академии наук СССР и союзных республик, Госстроя СССР и других ведомств (всего 301 автор). Каждый из 8 томов монографии посвящен какому-либо региону страны: Европейской части СССР, Уралу, Западной Сибири, Дальнему Востоку и т.д. Редакторами отдельных томов были И.С. Комаров, Е.М. Сергеев, Г.А. Голодковская, Е.Г. Чаповский, Е.В. Третьков, И.В. Попов, Г.М. Терешков, В.И. Дмитриевский, Х.Т. Туляганов, Р.П. Теуш, Н.Н. Хаджиев, И.М. Буачидзе, К.И. Джанджава, М.В. Чуринов. В монографии подробно описывались особенности геологического строения каждого региона, история формирования рельефа, гидрогеологические условия, развитие современных геологических процессов; характеризовались свойства наиболее распространенных комплексов горных пород и обобщался опыт изыскательских и строительных работ [4]. Вышедшая из печати в 1976–1978 гг. многотомная монография, не имевшая аналогов в мире, вызвала большой интерес не только в нашей стране, но и за рубежом, как образец уникального научного обобщения. Научная общественность и правительство страны высоко оценили этот научный труд: главному редактору Е.М. Сергееву, а также И.В. Попову (посмертно), И.С. Комарову и М.В. Чуринову была присуждена Ленинская премия (1982 г.).

Неугомонный инициативный характер Евгения Михайловича ни на минуту не позволял ему предаваться чувству самоуспокоенности, удовлетворению от проделанной работы. Его новая идея в области региональной инженерной геологии состояла в том, чтобы перейти к глобальному обобщению инженерно-геологических условий всей планеты Земля, опираясь на фундаментальные принципы, разработанные в отечественной инженерной геологии. В 1978–1982 гг. Е.М. Сергеев стоял во главе Международной ассоциации по инженерной геологии (МАИГ). Это поспособствовало тому, что в короткий срок был создан интернациональный авторский коллектив, и началась работа по плану и на методической основе, предложенной Е.М. Сергеевым. Помимо советских ученых, в работе приняли участие профессор У. Дирман (Англия), М. Матула (Чехословакия), доктор наук Д. Радбрух-Холл (США), Д.Х. Стапледон (Австралия) и др. В 1989 г. монография «Инженерная геология Земли» была издана в издательстве «Наука» на английском языке («Engineering geology of the Earth») под редакцией Е.М. Сергеева, У. Дирмана и В.С. Шibaковой (рис. 5). В монографии была дана глобальная классификация инженерно-геологических условий и характеристика отдельных климатических зон Земли, описаны специфические свойства пород выделенных зон, развитие современных геологических процессов, основные инженерно-геологические проблемы, встречающиеся в отдельных регионах Земли и т.д. В предисловии редакторов книги излагается ее суть: «*Инженерно-геологические условия территорий определяются регионально-геологическими и зонально-геологическими факторами. Их комбинация дает определенные инженерно-геологические типы территорий. Один и тот же тип территории может быть*

обнаружен в различных странах и на разных континентах. Опыт инженерно-хозяйственной деятельности на одной территории может быть трансформирован на другую. Но прежде всего, должны быть охарактеризованы инженерно-геологические условия нашей планеты в целом. Такой книги никогда не было. Книга, предлагаемая читателю, – это первый шаг в данном направлении” [13]. Тираж монографии разошелся по всему миру. По воспоминаниям В.С. Шибаковой [13], в 1989 г. во время XXVIII сессии Международного геологического конгресса в Вашингтоне книга демонстрировалась на выставке. Научная общественность многих стран с большим интересом и удовлетворением встретила выход уникального труда. Об этом свидетельствует большое количество писем, полученных авторами и редакторами книги от читателей разных стран.

Научная и научно-организационная деятельность Е.М. Сергеева была чрезвычайно многогранной. Она выходила далеко за пределы кафедры грунтоведения и инженерной геологии МГУ, и круг решаемых им вопросов был чрезвычайно широк. Говоря о вкладе академика Е.М. Сергеева в развитие региональной инженерной геологии, нельзя не упомянуть о роли, которую сыграл в решении региональных инженерно-геологических проблем Научный совет АН СССР по инженерной геологии и гидрогеологии, созданный в 1966 г. по инициативе Евгения Михайловича. Научный совет представлял собой многоцелевой научно-координационный орган, руководивший работой во всей стране по региональному и тематическому принципу: он объединял 7 региональных секций и 28 проблемных комиссий. Общая численность Совета достигала к концу 1980-х гг. 109 человек. На заседаниях Совета обсуждались важнейшие вопросы инженерной геологии в нашей стране: инженерно-геологические проблемы Западной Сибири, охрана природного комплекса Кавказских Минеральных Вод, инженерно-геологические проблемы Москвы, проблемы Сарезского озера и т.д. Подробно о деятельности Научного совета под руководством Е.М. Сергеева рассказано в воспоминаниях В.С. Шибаковой [13] и в статье Е.М. Сергеева, В.И. Осипова, В.С. Шибаковой [10].

В заключение отметим, что авторитет Е.М. Сергеева как крупного ученого, его выдающийся талант организатора науки, умение видеть стратегические цели, ставить и брать на себя гражданскую ответственность за решение важных задач, высочайшие нравственные качества, умение сплотить вокруг себя огромные творческие коллективы специалистов различного возраста и научных интересов, преодолеть межведомственные и межличностные барьеры, умение создать благоприятный взаимоуважительный творческий климат в коллективе позволили достичь выдающихся успехов в работе в целом, и в региональной

инженерной геологии в частности. Созданная Е.М. Сергеевым теоретическая база ведения региональных работ выдвинула отечественную инженерную геологию на передовые позиции в мире. Е.М. Сергеев воспитал школу инженер-геологов Московского университета, ставшую одной из крупнейших мировых геологических школ. Вклад Е.М. Сергеева в развитие теоретических основ и методологических принципов региональной инженерной геологии, в формирование ее научного базиса огромен. Под его руководством региональная инженерная геология сформировалась как важнейшее направление инженерно-геологической науки и получила вектор своего развития на последующие десятилетия. Это научное направление продолжает успешно развиваться и в Российской академии наук, в созданном по инициативе академика Е.М. Сергеева Институте геоэкологии РАН, с 2006 г. носящем его имя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воспоминания об академике Е.М. Сергееве (к 90-летию со дня рождения) / Под ред. В.И. Осипова и В.Т. Трофимова. М.: ГЕОС, 2004. 230 с.
2. Воспоминания об академике Е.М. Сергееве (к 100-летию со дня рождения) / Под ред. В.И. Осипова. М.: РУДН, 2015. 178 с.
3. Герасимова А.С. Е.М. Сергеев и экспедиционные работы кафедры // Вторые Сергеевские чтения. (докл. и выст.) / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 2000. С. 16–26.
4. Зилинг Д.Г. Е.М. Сергеев – главный редактор и идеолог 8-томной монографии “Инженерная геология СССР” // Пятые Сергеевские чтения (докл. и выст.) / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 2003. С. 9–14.
5. История и итоги развития инженерно-геологического образования и исследований в Московском государственном университете / Под ред. В.Т. Трофимова, В.А. Королева, М.: ООО “СамПолиграфист”, 2022. 440 с.
6. Красилова Н.С. Е.М. Сергеев – организатор Амурской экспедиции // Третьи Сергеевские чтения (докл. и выст.) / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 2001. С. 25–36.
7. Осипов В.И., Кутепов В.М. Жизненный путь Е.М. Сергеева // Воспоминания об академике Е.М. Сергееве (к 90-летию со дня рождения) / Под ред. В.И. Осипова и В.Т. Трофимова. М.: ГЕОС, 2004. 230 с.
8. Осипов В.И. Человек, ученый, патриот. К 100-летию со дня рождения академика Е.М. Сергеева // Геоэкология. 2014. № 2. С. 99–113.
9. Сергеев Е.М. Взгляд сквозь годы. Воспоминания / Под ред. В.И. Осипова. М.: ГЕОС, 2014. 478 с.
10. Сергеев Е.М., Осипов В.И., Шибакова В.С. О деятельности Научного совета АН СССР по проблемам инженерной геологии и гидрогеологии за 25 лет (1966–1991 гг.) // Инженерная геология. 1992. № 3. С. 3–11.
11. Трофимов В.Т. Е.М. Сергеев в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова // Первые Сергеевские чтения / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 1999. С. 8–19.
12. Шаумян Л.В. Евгений Михайлович Сергеев – человек, ученый, патриот // Пятые Сергеевские чт. (докл. и выст.) / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 2003. С. 14–23.
13. Шибакова В.С. Инженерная геология – события и люди. М.: ООО “Геомаркетинг”, 2014. 160 с.

ACADEMICIAN E.M. SERGEEV AS THE LEADER OF REGIONAL ENGINEERING GEOLOGY (TO THE 110-TH ANNIVERSARY OF BIRTHDAY)

V. I. Osipov^{a, #}, A. S. Gerasimova^a, L. V. Shaumyan^a, O. N. Eremina^a, N. A. Rumyantseva^a

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

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

The paper is prepared to commemorate the 110th anniversary of birthday of academician Evgenii Mikhailovich Sergeev, and it shows his contribution to the development of one of the main branches of the modern engineering geology, i.e., regional engineering geological investigations. The brief review of the works in regional engineering geology is given that were performed by the staff of the department of soil and rock engineering and engineering geology at the Lomonosov Moscow State University under the leadership by E.M. Sergeev during 30 years (1950–1980).

REFERENCES

1. [Reminiscences about academician E.M. Sergeev (to the 90th anniversary of birthday)]. V.I. Osipov, V.T. Trofimov, Eds. Moscow, GEOS Publ., 2004, 230 p. (in Russian)
2. [Reminiscences about academician E.M. Sergeev (to the 100th anniversary of birthday)]. V.I. Osipov, Ed. Moscow, RUDN Publ., 2015, 178 p. (in Russian)
3. Gerasimova, A.S. [E.M. Sergeev and field expeditionary works at the department]. In: [The 2nd Sergeev's readings (reports and speeches)]. V.T. Trofimov, Ed. Moscow, MSU Publ., 2000, pp. 16–26. (in Russian)
4. Ziling, D.G. [E.M. Sergeev as the editor-in-chief and the inspirer of the 8-volume monograph "Engineering geology of the USSR"]. In: [The 5th Sergeev's readings (reports and speeches)]. V.T. Trofimov, Ed. Moscow, MSU Publ., 2003, pp. 9–14. (in Russian)
5. [History and results of development of engineering geological education and research at the Moscow state university]. V.T. Trofimov, V.A. Korolev, Eds. Moscow, "Sampoligrafist" Publ., 2022. 440 p. (in Russian)
6. Krasilova, N.S. [E.M. Sergeev as the organizer of the Amur expedition]. In: [The 3rd Sergeev's readings (reports and speeches)]. V.T. Trofimov, Ed. Moscow, MSU Publ., 2001, pp. 25–36. (in Russian)
7. Osipov, V.I., Kutepov, V.M. [The life path of E.M. Sergeev]. In: Reminiscences about academician E.M. Sergeev (to the 90th anniversary of birthday)]. V.I. Osipov, V.T. Trofimov, Eds. Moscow, GEOS Publ., 2004, 230 p. (in Russian)
8. Osipov, V.I. [A man, a scientist, and a patriot. To the 100th anniversary of academician E.M. Sergeev birthday]. Geokologiya, 2014, no. 2, pp. 99–113. (in Russian)
9. Sergeev, E.M. [Sight through years. Reminiscences]. Osipov, V.I., Ed. Moscow, GEOS Publ., 2014, 478 p. (in Russian)
10. Sergeev, E.M., Osipov, V.I., Shibakova V.S. [About the activity of the Scientific Council RAS for the problems in engineering geology and hydrogeology during 25 years (1966–1991)]. Inzhenernaya geologiya, 1992, no. 3, pp. 3–11. (in Russian)
11. Trofimov, V.T. [E.M. Sergeev in the Lomonosov Moscow State University]. In: [The 1st Sergeev's readings (reports and speeches)]. V.T. Trofimov, Ed. Moscow, MSU Publ., 1999, pp. 8–19. (in Russian)
12. Shaumyan, L.V. [Evgenii Mikhailovich Sergeev as a man, a scientist and a patriot]. In: [The 5th Sergeev's readings (reports and speeches)]. V.T. Trofimov, Ed. Moscow, MSU Publ., 2003, pp.14–23. (in Russian)
13. Shibakova, V.S. [Engineering geology – events and people]. Moscow, "Geomarketing" Publ., 2014, 160 p. (in Russian)

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 556.5

ОСОБЕННОСТИ ВОДНОГО РЕЖИМА ВЕРХНЕЙ СВИЯГИ И ЕЕ ПРИТОКОВ В УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ КАРСТОВЫХ ПРОЦЕССОВ

© 2024 г. И. А. Жуков^{1,*}, Д. Н. Айбулатов^{1,**}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

*E-mail: les-96@yandex.ru

**E-mail: gidroden@mail.ru

Поступила в редакцию 27.11.2023 г.

После доработки 22.02.2024 г.

Принята к публикации 25.03.2024 г.

В настоящее время изученность гидрологических характеристик малых рек России крайне мала. Учитывая возрастающее ухудшение экологического состояния поверхностных водотоков, влияющее в первую очередь на внутригодовое распределение стока воды именно на малых и средних реках, изучение процессов формирования стока, его изменчивости и внутригодовых изменений становится важнейшей задачей гидрологии. В статье рассмотрены показатели внутригодового распределения стока рек в верховьях р. Свияга при практически полном отсутствии изученности изменений стока малых и средних рек на исследуемой территории. Цель исследования – выявить, как изменяется сток воды малых и средних рек в верхнем течении р. Свияга, в бассейне которой проявляются карстовые процессы. В работе представлен анализ внутригодового распределения стока воды для рек на исследуемой территории, дана оценка его вариаций на фоне изменений климата, приведено описание выявленных типов водного режима и природных факторов, максимально влияющих на него. По результатам исследований предложена типизация рек по годовому стоку воды, проанализировано внутригодовое распределение уровней и расходов воды, дана оценка влияющих на них факторов и выявлены наиболее значимые из них.

Ключевые слова: речной сток, карст, внутригодовое распределение стока воды, малые реки, логгеры, комплекс GrWat 3.0.M

DOI: 10.31857/S0869780924030028 EDN: SPRYXP

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования являются верховья бассейна р. Свияга. Свияга – правый приток первого порядка р. Волга. Исследуемая территория расположена в центральной части Ульяновской области, в Среднем Поволжье на юго-востоке Европейской части России, на восточной части Русской платформы, охватывающей большую часть европейской территории России [7]. Исследуемая часть бассейна располагается в лесостепной зоне. По обеспечению атмосферными осадками бассейн относится к зоне с недостаточным увлажнением. Бассейн Свияги – территория с минимальной антропогенной нагрузкой.

Предметом исследования служат изменения в показателях внутригодового распределения стока и термического режима рек в бассейне р. Свияга.

Актуальность работы обусловлена малой изученностью вариаций стока малых рек, связанных с изменением климата, необходимостью

изучения проблем с водоснабжением вновь присоединенных территорий и выявления опасных гидрологических явлений (в первую очередь затопление территорий), уточнения характеристик и распределения внутригодового стока воды рек исследуемой территории, а также получения данных для гидрогеологических фильтрационных моделей.

В бассейне р. Свияга достаточно широко распространены карстовые процессы, что определяется, прежде всего, геологическим и гидрологическими условиями. Карст распространен в местах залегания на поверхности или близко к ней отложений маастрихтского яруса верхнего отдела меловой системы (K_2m), представленных мелом, мелоподобными известняками с прослоями мергелей [2]. Трещиноватость отложений маастрихтского яруса довольно высокая, могут присутствовать каверны; в целом отложения маастрихтского яруса характеризуются высокими значениями открытой пористости.

Исследование карста в Поволжье началось с XXVIII в. Основоположителем исследований стал М.В. Ломоносов. Основные исследования карста Нижнего Поволжья проведены в академических экспедициях И.И. Лепехина, Н.П. Рычкова, П.С. Палласа, И.П. Фалька, И.А. Гюльденштедта в 1768–1774 гг., в которых обследовались и описывались карстовые явления Поволжья. И.И. Лепехин обратил внимание на провальные карстовые озера в нижней части бассейна Свияги и, вслед за В.Н. Татищевым, утверждал, что карстовые пещеры есть результат деятельности воды и медленно действующих гидрогеологических процессов [6].

Исследования карста продолжались и в XXI в. На развитие карстовых процессов нередко указывает нарушение залегания слоев под родниками, выходящими в основании крутых склонов из маастрихтского мела. Эти нарушения вызваны выщелачиванием мела потоком подземных вод и последующим обрушением вышележащих пород. Такие подобные карстовые формы были обнаружены в верховьях р. Свияга¹.

Карстовые формы чаще всего представлены провальными воронками. Самая крупная воронка (диаметр 350 м и глубина 20 м) была отмечена на левом склоне долины Свияги у восточной окраины д. Смышляевка. Отдельные воронки и группы воронок наблюдались в бассейнах рек Сельдь, Чамбул, Барыш, Ус, Терешка [13].

Известны случаи образования крупных карстовых провалов в меловых отложениях и в настоящее время. Интенсивное движение подземных вод на крыльях тектонических структур типа валов и антиклиналей обуславливает приуроченность значительного количества провальных воронок именно к этим элементам тектонических структур. Двигаясь по уклону пластов, подземные воды приобретают напорный характер. Местами они поднимаются вверх по тектоническим трещинам под давлением, образуя восходящие напорные родники, приуроченные к днищам речных долин. С растворяющей деятельностью восходящих напорных вод связано образование в меловых породах воронок выщелачивания [12].

Переход поверхностного стока в подземный, и наоборот, обуславливает своеобразие морфологии русел рек и пойм, а также и схем деформаций в зонах питания и разгрузки подземных вод. В этих зонах меняются активные руслообразующие факторы – сток воды и наносов. Нарушается баланс между количеством взвешенных и донных наносов [11].

¹ Туняк А.П. Геологическое строение правобережья р. Волги в районе с. Б. Ундоры и бассейна р. Свияги от с. Бурцево до ст. Алейкино (в районе Ульяновской области и ТАССР по работам 1951–1952 гг.). М: ВНИГРИ, 1952. Отчет. Инв. номер ФГИ 00138. https://eco.tatarstan.ru/file/pub/pub_1269179.pdf

В зонах питания поверхностный сток поглощается как проранами и трещинами в породах, так и заполненными аллювием русловыми порами. Реки имеют наибольшую водность при подходе к зоне питания карстового района. Далее их водность уменьшается [8]. Малые реки часто полностью исчезают под землей. Практически это наблюдается в областях питания подземных вод с маломощным покровом рыхлых отложений во всех карстовых районах.

На малых реках зона “эрозии”, образующаяся в начале зоны снижения расхода, характеризуется интенсивным размывом ложа с образованием “микророгов” и вертикальных уступов, у основания которых расположены воронки размыва. Зона эрозии сменяется транзитно-аккумулятивной зоной, в которой происходит отложение части наносов с образованием своеобразных “побочней” и “перекатов” [2].

В закарстованных районах наблюдается внутригодовое перераспределение стока воды. Годовой сток воды увеличивается (до 15%). Наблюдается уменьшение максимальных расходов в период половодья (до 12%), половодье становится более распластанным, а его продолжительность увеличивается. В закарстованных районах наблюдается существенное увеличение меженного стока (до 30%), особенно во время прохождения летне-осенней межени. Также карст способствует увеличению максимальных расходов паводков (до 25%).

Реки бассейна Свияги относятся к рекам с восточно-европейским типом водного режима (по классификации Б.Д. Зайкова). Для них характерно прохождение более 50% годового стока за период весеннего половодья [5].

На исследуемой территории преобладают малые реки длиной менее 5 км (77%), имеющие смешанное питание. Их водный режим характеризуется следующими фазами: весеннее половодье, летняя и зимняя межени, летние и осенние дождевые паводки. Руслу большинства рек на исследуемой территории хорошо разработаны, имеют глубокие эрозионные врезы.

Весеннее половодье длится около одного месяца. Объем стока в бассейнах исследуемых рек в это время может изменяться от 35 до 95% годового. Летняя межень наступает в мае-июне и характеризуется малой водностью. Основное питание в этот период осуществляется за счет подземных вод, поступление которых по длинам рек осуществляется неравномерно в связи с различием структурно-гидрогеологических условий.

По классификации М.И. Львовича реки исследуемой территории относятся к рекам с преимущественно снеговым питанием. По П.С. Кузину, местные реки можно отнести к рекам

с половодьем и паводками (реки с весенне-летним половодьем и паводками в теплую часть года).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для комплексного анализа внутригодового стока воды р. Свияга и ее притоков изучен и проанализирован внутригодовой ход метеорологических величин (температура воздуха и осадки) с ближайших метеорологических станций. Район исследования по действующей нормативной базе имеет степень метеорологической изученности – изученная. Наиболее репрезентативной для исследуемой территории является метеостанция в г. Ульяновск, так как она расположена в одном районе с гидрологическим постом Вырыпаевка на р. Свияга.

Из всех метеорологических величин для анализа выбраны годовая сумма осадков, их сезонное распределение и годовой ход температуры воздуха.

Для анализа внутригодовых и долгопериодных изменений составляющих годового стока воды р. Свияга взяты ежедневные расходы воды в период с 1953 по 2018 г. по данным гидрологического поста в пос. Вырыпаевка.

Также на исследуемой территории создана сеть из 10 временных гидрологических постов, оборудованных логгерами, фиксирующими уровень и температуру воды в установленных временных интервалах. Измерения проводились синхронно раз в полчаса.

Для анализа водного режима рек и их источников питания проводят расчленение гидрографа на генетические составляющие, представляющие собой стоки разного типа. Расчленение гидрографа позволяет определить суммарную величину подземного и паводочного стока. Типовой гидрограф представляет собой линию, описывающую пик половодья, кривые его спада и подъема, летнюю и зимнюю межень. Площадь под этой линией определяет объем подземного и поверхностного стока [10].

При расчленении гидрографа учитывают гидрогеологические условия территории. Режим стока подземных вод, гидравлически связанных с рекой, характеризуется минимумом подземного питания в момент максимума поверхностного стока [14].

Имея непрерывные ряды данных по ежедневным наблюдениям за уровнями и расходами Свияги с 1975 г., а также данные по осадкам и температуре воздуха с метеостанции в г. Ульяновск за этот же период, выполнено расчленение гидрографов с помощью программного комплекса GrWat 3.0.M.

Используемый в этом комплексе алгоритм автоматического расчленения гидрографа по генетическим составляющим разработан коллективом авторов: к.г.н. М.Б. Киреевой (МГУ, кафедра гидрологии суши), к.г.н. Е.П. Рец, к.г.н.

Т.Е. Самсоновым (МГУ, кафедра картографии и геоинформатики) в рамках проекта по изучению современного режима рек Европейской территории России [9]. Алгоритм заключается в автоматическом отделении весеннего половодья, подземного стока, дождевых и оттепельных паводков в зависимости от особенностей водного режима и изменения главных гидрологических характеристик каждой отдельной реки. В основе принципа работы алгоритма лежит методика расчленения гидрографа Б.И. Куделина [10].

Методика создания и анализа сетей постов на исследуемой территории

На исследуемой территории отсутствуют постоянные наблюдения за уровнями и расходами воды на малых реках, что определило потребность в создании временной гидрологической сети.

Для организации автоматического дистанционного наблюдения за гидрологическими характеристиками рек на каждом посту установлен логгер для автономной автоматической записи измерений уровня воды и температуры. Каждая запись включает дату, время, значения уровня и температуры воды.

После снятия всех показаний логгеров проведена обработка данных, записанных на них, которая подразделялась на три этапа:

- обработка данных в специализированной программе Solinst, в процессе которой на значения уровней воды вводилась поправка по атмосферному давлению;
- совмещение откалиброванных рядов данных об уровнях воды и ее температуре с температурой воздуха и динамикой выпадения осадков;
- построение графиков хода уровней воды с выделением основных фаз водного режима и генетически однородных составляющих стока в исследуемых реках.

Для получения данных временной гидрологической сети совершено два выезда – зимой 2018 г. и летом 2019 г. Кроме этого, организовано 6 выездов в верховья бассейна р. Свияга с целью измерения расходов воды на малых реках. Измерения расходов производились на всех створах 5 раз (в июле и ноябре 2018 г., в феврале, апреле и августе 2019 г.). Уровни воды (Н) пересчитаны в расходы воды (Q), после чего построены зависимости (рис. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ метеорологических показателей. Максимально влияют на внутригодовой ход уровня воды и внутригодовое распределение стока воды

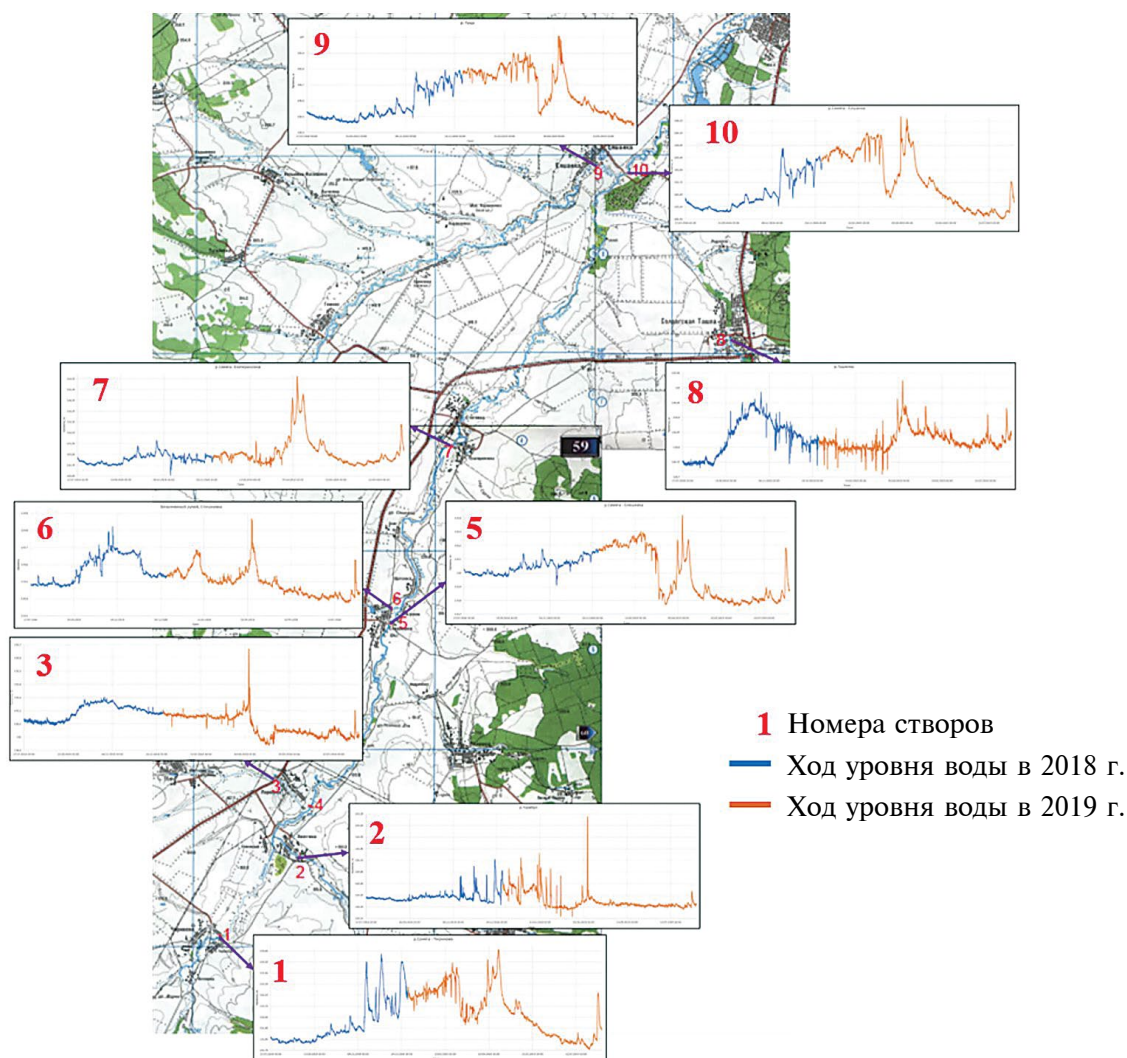


Рис. 1. Схема расположения привлеченных к исследованию рек в бассейне р. Свияга с графиками хода уровней воды. На карте обозначены створы: 1 – р. Свияга (створ Чириково); 2 – р. Чамбул (створ Хвостиха); 3 – руч. Чечерка (створ Порецкое); 5 – р. Свияга (створ Спешневка); 6 – руч. б/н (створ Спешневка); 7 – р. Свияга (створ Екатериновка); 8 – р. Ташелка (створ Солдатская Ташла); 9 – р. Гуша (створ Елшанка); 10 – р. Свияга (створ Елшанка). Створ 4 (р. Свияга (створ Порецкое) располагается в 50 м ниже устья руч. Чечерка (наблюдения на створе не удалось завершить из-за поломки логгера).

такие метеорологические характеристики, как температура воздуха и динамика внутригодового распределения осадков, которые необходимы для анализа многолетних колебаний стока Свияги и калибровки модели для выделения различного по генезису речного стока.

Величина суммы годовых осадков в бассейне р. Свияга имеет явный восходящий тренд: в 1964 г. она составляла 440 мм, в 1975 г. – 458 мм, в 2014 г. – 500 мм, а в исследуемый дождливый период 2018–2019 гг. среднегодовое их количество достигло 651 мм/год [3].

В последние десятилетия существенное влияние на водный режим рек бассейна Свияги оказало изменение климата. Годовой сток рек на большей части территории превысил

среднемноголетнюю норму (до 15–40%) [1]. Еще более усугубились некоторые сезонные изменения. Так, в зимний период сток на 50–100% выше среднемноголетней нормы [3].

Средняя многолетняя температура увеличилась с 4.1°C в 1953 г. до 5.4°C к 2018 г., т.е. более чем на один градус. Это не могло не сказаться и на водном режиме изучаемых рек.

Колебания величин осадков происходили в достаточно большом диапазоне – от 180 мм (1945 г.) до 675 мм (2011 г.) [4]. Построенные линейные тренды как для годовой суммы, так и для жидких и твердых осадков демонстрируют увеличение их количества. Зафиксировано внутригодовое перераспределение осадков: уменьшается количество твердых осадков, и одновременно увеличивается

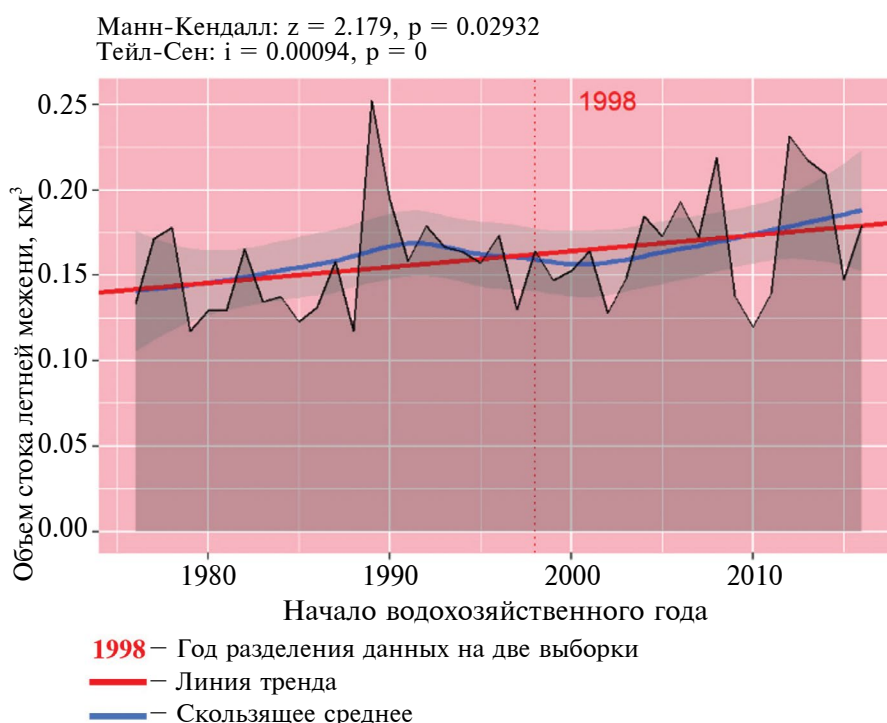


Рис. 2. Динамика меженного стока р. Свияга.

количество жидких. Анализ изменения количества осадков по месяцам за период 1975–2019 гг. показывает, что увеличение количества осадков наблюдается в марте, мае, июне, сентябре, октябре, а их снижение — в июле, августе, апреле и ноябре.

Работа в программном комплексе GrWat. Расчлененные гидрографы получены для 1975–2019 гг. водохозяйственных² лет. Посредством программного комплекса составлены динамические карты на межгодовые и долгопериодные изменения параметров стока Свияги по данным с поста Вырыпаевка.

В результате обработки ряда наблюдений на р. Свияга (пост Вырыпаевка) и метеостанции в Ульяновске получены графики межгодового распределения составляющих стока воды.

Для Свияги четко прослеживаются значимые положительные тренды увеличения стока летне-осенней и зимней межени. Рост летнего меженного стока (рис. 2) связан, прежде всего, с увеличением запасов подземных вод в ее начале, вследствие уменьшения глубины промерзания и площади его распространения, а также за счет увеличения частоты дождей паводков.

Сокращение максимальных значений половодного стока р. Свияга достигает 30% от значений

начала 1980-х гг. (рис. 3). Сокращение максимального половодного стока реки обусловлено повышением температуры воздуха в холодное время года, что приводит к увеличению повторяемости оттепелей и, как следствие, снижению глубины промерзания почв и во многих случаях уменьшению запасов снега в снежном покрове к началу снеготаяния.

Полученные результаты в целом совпадают с данными гидрологических исследований изменений стока воды на более крупных реках европейской территории России [8].

Минимальные расходы воды (летне-осенний и зимний), характеризующие долю подземного стока в питании рек, имеют тенденцию к увеличению. Речной сток летне-осеннего периода после 1983 г. составлял в среднем 128% многолетней нормы. Противоположная тенденция наблюдается при анализе динамики зимнего минимального стока: величина зимней межени с середины 1980-х гг. сократилась почти на 25%.

В результате анализа установлено, что объем годового стока р. Свияга имеет тенденцию на уменьшение (рис. 4).

На основании анализа составляющих годового стока установлено, что в бассейнах рек исследуемой территории произошло перераспределение внутригодового стока — сокращение его поверхностной составляющей в сторону увеличения подземного стока.

² Расчетный годичный период, начинающийся с самого многоводного сезона [СП 33-101-2003 “Определение основных расчетных гидрологических характеристик”. <https://docs.cntd.ru/document/1200035578>].

Манн-Кендалл: $z = -2.247$, $p = 0.02465$
 Тейл-Сен: $i = -1.87288$, $p = 0$

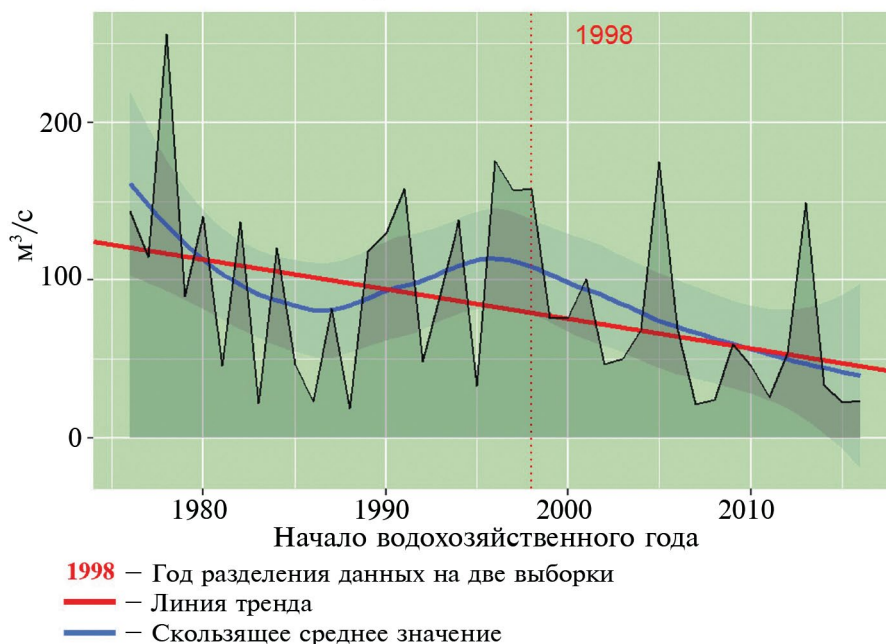


Рис. 3. Динамика максимальных расходов р. Свяга.

Манн-Кендалл: $z = -1.786$, $p = 0.07412$
 Тейл-Сен: $i = -0.00193$, $p = 0$

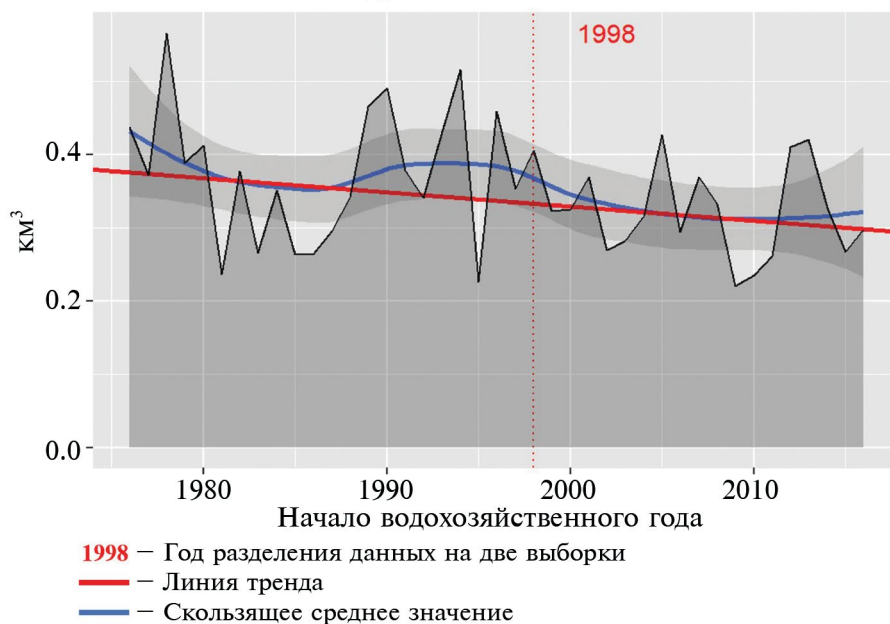


Рис. 4. Динамика годового стока р. Свяга.

Основной причиной перераспределения стока воды между фазами водного режима на исследуемой территории является увеличение количества жидких осадков. По повышению уровня подземных вод, снижению глубины промерзания почвы, сокращению объемов половодного стока можно сделать вывод о том, что процессы формирования речного стока в бассейне Свяги

претерпели существенное изменение, что связано с вторжением более теплых атлантических воздушных масс.

Наблюдается увеличение максимального расхода оттепельных паводков, что обусловлено частыми и более продолжительными переходами температуры воздуха через 0°C и приводит к увеличению снеготаяния в течение зимы.

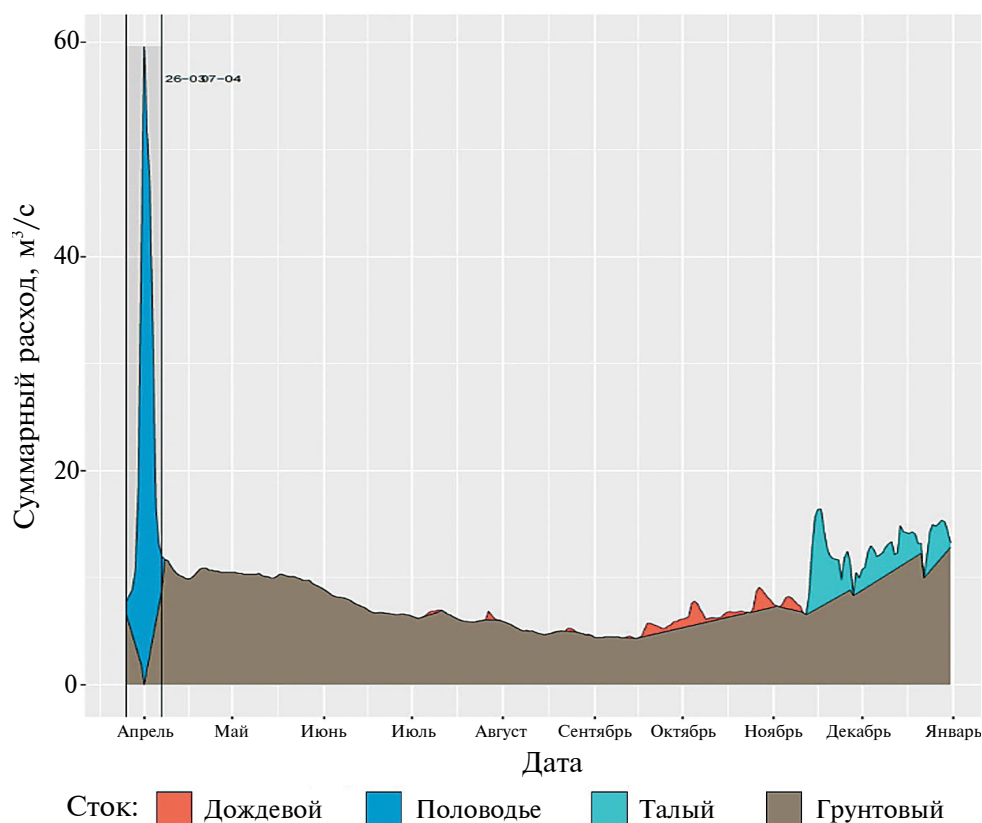


Рис. 5. Выделение типов питания р. Свияга (створ Елшанка).

Зафиксирован сдвиг дат оттепельных паводков на весенний период, ранее наблюдаемые оттепели в декабре-январе стали отмечаться в феврале-марте, а осенние паводки из оттепельных стали дождевыми.

В результате выполненных исследований установлено, что из-за изменившихся условий формирования речного стока на исследуемой территории изменились и его объем, и его внутригодовое распределение по фазам водного режима. По результатам анализа тенденций речного стока установлено, что объем годового стока воды за последние 43 года сократился более чем на 10%, объем подземного стока сократился почти на 6%, объем половодья сократился более чем на 35%, объем дождевого стока более чем на 25%, объем оттепельного стока сократился почти 26%, объем стока зимней межени сократился более чем на 10%, объем стока летней межени увеличился на 10%, продолжительность зимней межени уменьшилась на 2%, продолжительность летне-осенней межени увеличилась более чем на 5%, продолжительность половодья сократилась почти на 10%.

Обработка данных с логгеров. После обработки единого ряда наблюдений, предпринята попытка аналогичным образом выделить типы питания водотоков и на всех наблюдаемых створах (рис. 5).

Для этого проведен анализ ряда ежедневных расходов воды за 1953–2017 гг., целью которого являлся поиск похожих по форме гидрографов двух смежных годов, образующих единый водохозяйственный год. При поиске особое внимание уделялось среднегодовому расходу. Необходимо добиться примерного равенства между среднегодовыми расходами у исследуемых створов (створ Екатериновка – 3.46; створ Елшанка – 9.79; створ Спешневка – 4.69; створ Чириково – 3.15; р. Чамбул – 0.71; р. Ташелка – 0.64; р. Гуша – 3.55 м³/с) и искомым водохозяйственным годом.

В результате анализа подобран 2009–2010 водохозяйственный год как наиболее подходящий по форме гидрографа. Также 2009 г. наиболее подходит и по среднегодовому расходу – 3.98 м³/с, что является примерно средним значением для всех логгеров.

Добиться гидрологически обоснованного расчленения гидрографов удалось только для рек, для ручьев такого расчленения получить не удалось из-за малых расходов воды и слишком резких колебаний.

Выделение типов рек бассейна р. Свияга. После изучения показаний всех гидрографов по данным, полученным с логгеров за период 2018–2019 гг., створы сгруппированы по трем типам водного

режима рек, на которых они расположены. Выделенные типы отличаются по внутригодовому распределению стока воды и площади бассейнов исследуемых водотоков.

В *первый тип* сгруппированы створы на р. Свияга (Елшанка, Спешневка и Чириково) и ее притоках — р. Гуша и р. Чамбул (см. рис. 2), где наблюдались резкие подъемы и спады воды (по уровню эти колебания доходили до 0.7 м за 1–1.5 сут). Для этого типа рек характерно ярко выраженное высокое половодье с тремя пиками. Во время зимней межени наблюдается постепенное повышение расходов воды с начала октября до середины ноября, после чего происходит резкое увеличение расходов воды. Для летней межени характерно постепенное убывание расходов воды от окончания весеннего половодья до начала июля. Примерно в середине июля на всех постах отмечается довольно мощный летний паводок — расход воды увеличивается на 3–8 м³/с.

Ко *второму типу* относится только створ Екатериновка, расположенный на р. Свияга (см. рис. 2). На этом створе отражаются все признаки восточно-европейского типа рек по классификации Б.Д. Зайкова: маловодные зимняя и летняя межени, ярко выраженное весеннее половодье и один летний паводок. Это может быть вызвано трансформирующим влиянием мелового карста на сток воды именно в районе этого створа. Присутствие закарстованных пород подтверждается также наличием больших глубоких ям (до 6–8 м) в русле реки на данном участке, обнаруженных по результатам геофизического профилирования [12], а также выявленных западин и мочажин явно карстового происхождения на поверхности ее террасы.

Створ второго типа на р. Свияга в сравнении с другими створами, установленными на этой реке, имеет средний по площади водосбор. Объем годового стока в данном створе реки на 7% ниже, чем у вышележащего поста Чириково.

В *третий тип* объединены створы на ручьях и малой р. Ташелка (см. рис. 2). Главными их особенностями являются достаточно мощный и очень продолжительный подъем воды (с середины сентября до начала января), однопиковое половодье, по мощности сравнимое с осенне-зимним паводком. Летом отмечаются 2–3 паводка. Створы этого типа имеют самые малые водосборы из всех изученных.

Карст как фактор формирования стока воды. Вследствие гидроклиматических изменений за последнее столетие значительно трансформировалось внутригодовое распределение стока в пределах исследуемой территории. Установлено значительное снижение максимальных расходов половодья и увеличение водности меженного периода (более чем вдвое). Для поста на р. Свияга — Вырыпаевка, среднемесячные расходы февраля

в 1960-е гг. составляли 3.82 м³/с, в 1980-е гг.³ — 3.94 м³/с, в последнее десятилетие⁴ же составляют 7.18 м³. Средние расходы за ноябрь за аналогичные периоды составляют 3.72, 5.02 и 8.63 м³/с соответственно. С учетом того, что доля дождевого питания для Свияги в целом невелика, можно говорить об увеличении базисного (подземного) стока, что приводит к более ярким проявлениям его аномалий. Меженный период 2018–2019 гг., во время которого проводились измерения, характеризовался повышенной водностью по сравнению с предшествующими годами.

Результаты исследований свидетельствуют о сложной структуре формирования стока воды на водосборе верхней Свияги, что выражается в неравномерности распределения стока воды по длине основной реки и в целом по бассейну.

Измеренные расходы воды говорят о наличии на участке значительной аномалии, выражающейся в том, что на этом участке р. Свияга между селами Порецкое, Спешневка и Екатериновка в зимний меженный период 2019 г. происходило аномальное снижение расходов воды вниз по течению. Тогда как по результатам измерений в ноябре 2018 г. расходы, наблюдавшиеся в створах Спешневка и Екатериновка, меньше, чем расход воды выше по течению (в створе Порецкое).

На сток воды в пределах верхнего течения Свияги оказывают трансформирующее влияние проявления мелового карста. Этот факт подтверждается наличием глубоких ям (до 6–8 м) в русле р. Свияга на исследуемом участке реки, выявленных по результатам построения продольного профиля реки по точкам максимальных глубин, а также существованием западин и мочажин явно карстового происхождения на террасах реки в районе водомерного створа на р. Чамбул.

В результате исследований установлено, что междуречье рек Свияга, Чамбул и Ташелка, отличается от остальных створов по внутригодовому распределению стока воды в течение года — если на остальных реках сток в феврале уменьшился по сравнению с ноябрем, то на этих двух реках вырос. Локальные неравномерности подземного стока являются дополнительным свидетельством значительного влияния карстовых процессов и особенностей залегания меловых закарстованных пород на гидрологический режим.

Результаты проведенных исследований подтверждают наличие на участке между впадением

³ По данным справочника “Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши” / Гос. ком. СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды, Сев.-Зап. территор. упр. по гидрометеорологии и контролю природной среды. Ленинград: Гидрометеоиздат, за период 1953–2018 гг.

⁴ База данных Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных

р. Чамбул и створом Спешневка на р. Свяга зоны транзита стока воды, где ее часть уходит на наполнение подземных горизонтов с темпами, значительно превышающими естественные скорости подрусловой фильтрации. Ниже по течению, где Свяга врезается в более древние и плотные горизонты мезозойских пород, происходят разгрузка данной воды и межбассейновый переток с водосборов, находящихся на волжском склоне.

Факторы, влияющие на внутригодовое распределение стока воды. В результате исследования выявлены факторы, оказывающие ведущее воздействие на условия формирования стока воды исследуемых рек. К таковым относятся: климатические особенности территории (внутригодовой ход температуры воздуха и распределение осадков, а также связанные с ними особенности ледового режима, мощности снежного покрова и запасов воды в нем) и гидрогеологические особенности строения территории. Также существенное влияние оказывают размер реки, ее порядок, а также площадь ее бассейна. К локальным особенностям условий формирования стока воды следует отнести закарстованность речных бассейнов, величина которой в бассейнах малых рек может достигать 60%. Антропогенная деятельность представлена слабо в бассейнах всех исследуемых рек и не оказывает существенного влияния на формирование и внутригодовое распределение стока воды. Заболоченность и озерность исследуемой территории равна 0.

ВЫВОДЫ

Для исследований водного режима малых рек бассейна р. Свяга использованы различные методики, подходы и программные средства.

Важной составляющей примененной в данном исследовании методики явилось использование перспективного программного комплекса с алгоритмом автоматического расчленения гидрографа GrWat для упрощения обработки большого объема данных, в результате его применения была сформирована сводная таблица характеристик.

Результатом всех проведенных исследований метеорологических и гидрологических характеристик является ряд выводов.

Установлено, что водный режим рек претерпел значительные изменения ввиду потепления климата. Доля стока половодья в общем годовом стоке исследуемых территорий заметно падает, а доля дождевых и оттепельных паводков растет.

Установлено, что по условиям формирования речного стока исследуемая территория является аномальной. Основной причиной данной аномалии являются ландшафтные характеристики водосбора. Традиционно считается, что с увеличением его площади неравномерность

формирования стока между отдельными подбассейнами приводит к сглаживанию средних значений. В частности, модули стока на бассейнах притоков в нижней части территории (реки Гуца, Ташелка) превышают модуль стока основной реки. Для притоков верхней части (р. Чамбул) наблюдается обратная ситуация. На самых малых водотоках (с площадью водосбора менее 100 км²) модуль стока практически не меняется во время всего межлетнего периода.

Измерения расходов и сопоставление модулей стока говорят о наличии на участке значительной аномалии, выражающейся в том, что на участке р. Свяга между селами Порецкое, Спешневка и Екатериновка в межлетний период происходит аномальное снижение расходов воды и модулей стока вниз по течению.

По результатам исследований можно выделить несколько закономерностей:

- в верхней части водосборного бассейна Свяги (створ Чириково) отмечаются повышенные модули стока для межприточных пространств;
- на транзитном участке, выявленном измерениями расходов, наблюдается уменьшение модуля стока вплоть до отрицательных значений, что может свидетельствовать о возникновении обратной гидравлической связи между рекой и подземными горизонтами на данном участке. Ниже по течению (до створа Спешневка) модуль межприточного стока увеличился, но по-прежнему остался ниже среднего;
- значительное увеличение модулей межприточного (подземного) притока наблюдается на р. Свяга, ниже створа Спешневка.

Приведенные результаты измерений дополнительно подтверждают наблюдаемое на участке между впадением р. Чамбул в Свягу и створом Спешневка наличие зоны транзита стока, где часть речной воды уходит на наполнение подземных горизонтов с темпами, значительно превышающими естественные скорости подрусловой фильтрации. Ниже по течению, где Свяга врезается в более древние и плотные горизонты мезозойских пород, происходят разгрузка данной воды, а также межбассейновый переток с водосборов, находящихся на волжском склоне.

Установлено, что влияние закарстованных массивов на формирование стока увеличивается при уменьшении величины зонального стока и особенно велико для рек с площадью водосбора до 250 км². С увеличением площади водосбора степень их влияния на сток уменьшается. На основании анализа многолетних данных на гидрологическом посту р. Свяга – Вырыпаевка установлено, что площадь речного бассейна, при которой влияние карста на сток становится неощутимым, превышает 3000 км².

Таблица 1. Изменения генетических составляющих стока в фоновых бассейнах и бассейне Свияги за период 1975–2019 гг.

Показатель	Фоновые бассейны, %	Бассейн р. Свияга, %
Среднегодовой модуль стока	+45	+90
Минимальный летний модуль стока	+100	+250
Минимальный зимний модуль стока	+100	+200
Максимальный модуль стока	+75	+75
Модуль стока для половодья	–30	–45
Модуль стока для паводков	–30	–60

Установлена трансформация речного стока в условиях закарстованности бассейна. В качестве фоновых значений взяты данные о расходах воды, модулях и слоях стока соседних речных бассейнов – левобережье и правобережье р. Волга. Общие многолетние закономерности изменения генетических составляющих стока за период 1975–2019 гг. для закарстованных участков бассейна Свияги такие же, как и для фоновых бассейнов (табл. 1), однако они отличаются более резкими изменениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Антонова М.М., Игнина М.И. Оценка влияния изменений климата на водный режим и сток рек бассейна Волги // *Вода: химия и экология*. 2013. № 4. С. 3–12.
2. Балков В.А. Влияние карста на водный баланс и сток // *Уч. Зап. Пермского гос. ун-та им. А.М. Горького. Гидрология и метеорология*. 1969. Вып. 4. Пермь: [б. и.], 112 с.
3. Болгов М.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д. и др. Современные изменения минимального стока на реках бассейна р. Волги // *Метеорология и гидрология*. 2014. №3. С. 75–85.
4. Болгов М.В., Трубецкова М.Д., Филимонова М.К., Филиппова И.А. Современные изменения климатических характеристик и вероятностная оценка изменений минимального стока в бассейне р. Волги // *Водное хозяйство России*. 2014. №3. С. 83–99.
5. Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л. Гидрологический режим и водные ресурсы // *Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем*. М.: Планета, 2012. С. 53–85.
6. Дедков А.П. Экзогенное рельефообразование в Казанско-Ульяновском Поволжье. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1970. 215 с.
7. Демьянов В.И., Кравцов С.И., Жукова Г.А. и др. Геологические, гидрогеологические и инженерно-геологические условия р. Свияги в пределах листов N-39-49-A, B, Г, N-39-61-A, Б (результаты съемки м-ба 1 : 50 000 в 1975–78 гг. для целей мелиорации). Т. I–VII. Средне-Волжский филиал ТГФ ЦРГЦ, 1978.
8. Жук В.А., Бовыкин И.В., Романова Е.А. и др. Условия формирования и изменчивость годового стока рек бассейна Волги // *Тр. V Всесоюзного гидрологического съезда*. Т. 6. Л.: Гидрометеиздат, 1989. С. 420–429.
9. Киреева М.Б., Рец Е.П., Самсонов Т.Е., Фролова Н.Л. Изучение современного водного режима рек европейской территории России с помощью автоматизированного алгоритма расчленения гидрографа GrWat // *Сб. докл. междунар. научной конф. “Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения”*. Нижний Новгород. 2019. С. 160–165. [электронное изд. URL: <https://conf.iwp.ru/book/>]
10. Куделин Б.И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. М.: Изд-во Московского университета, 1966. 312 с.
11. Милановский Е.В. Очерк геологии Среднего и Нижнего Поволжья. М.: Гостопиздат, 1972. 178 с.
12. Сельникова Н.В., Филиппов Б.С. Геологическое строение среднего течения р. Свияги. М.: Гостопиздат, 1956. 275 с.
13. Сеньков В.М. Геологическое строение Ульяновско-Саратовской синеклизы. М.–Л.: Гостопиздат, 1947. 178 с.
14. Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Агафонова С.А. и др. Внутригодовое распределение стока равнинных рек Европейской территории России и его изменение // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2015. № 4. С. 4–20.

WATER REGIME SPECIFICS IN THE UPPER SVIYAGA RIVER AND ITS TRIBUTARIES UPON KARST DEVELOPMENT

I. A. Zhukov^{a, #}, D. N. Aybulatov^{a, ##}

^aLomonosov Moscow State University, Leninskie gory 1, Moscow, 119991 Russia

[#]E-mail: les-96@yandex.ru

^{##}E-mail: gidroden@mail.ru

At present, the hydrological characteristics of small rivers are understudied in Russia. Taking into account the increasing deterioration of the ecological state of surface watercourses, which primarily affects the intra-annual distribution of water runoff on small and medium-sized rivers, in particular, the study of runoff

formation, its variability and intra-annual changes become the most important task of hydrology. The paper considers changes in the indicators of intra-annual distribution of river flow in the upper reaches of the Sviyaga River in the almost complete absence of knowledge of changes in the flow of small and medium-sized rivers in the study area. It was necessary to identify what changes the water runoff from small and medium-sized rivers undergoes in the upper reaches of the Sviyaga River, which is complicated by the occurrence of karst. The paper presents an analysis of the intra-annual distribution of water runoff, and natural factors that have the maximum effect on the intra-annual distribution of water runoff for rivers in the study area, as well as its assessment against the background of climate change. The identified types of water regime are described. Based on the research results, a typification of rivers is proposed according to the annual water flow and zoning of cross-sections by river types. The intra-annual distribution of water levels and discharges are analyzed, the factors influencing them are assessed, and the most significant of them are identified.

Keywords: karst, river flow, intra-annual distribution of water run-off, small rivers, loggers, GrWat 3.0.M complex

REFERENCES

1. Alekseevskii N.I., Frolova N.L., Antonova M.M., Igonina M.I. [Evaluation of the climate change impact on water regime and stock of the Volga River basin]. *Voda: khimiya i ekologiya*, 2013, no. 4, pp. 3–12. (in Russian)
2. Balkov V.A. [The influence of karst on water balance and runoff]. *Uch. Zap. Permskogo gos. un-ta. Gidrologiya i meteorologiya*, Perm, 1969, issue 4, 112 p. (in Russian)
3. Bolgov M.V., Korobkina E.A., Trubetskova M.D., Filimonova M.K., Filippova I.A. [Modern changes in the minimum flow of rivers in the Volga River basin]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2014, no. 3, pp. 75–85. (in Russian)
4. Bolgov M.V., Trubetskova M.D., Filimonova, M.K., Filippova I.A. [Modern changes in climatic characteristics and probabilistic assessment of changes in the minimum flow in the Volga River basin]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii*, 2014, no. 3, pp. 83–99. (in Russian)
5. Georgievskii V.Yu., Shalygin A.L. [Hydrological regime and water resources]. In: [Methods for assessing the consequences of climate change for physical and biological systems]. Moscow, Planeta Publ., 2012, pp. 53–85. (in Russian)
6. Dedkov, A.P. [Exogenous relief formation in the Kazan-Ulyanovsk Volga region]. Kazan, Kazan University Publ., 1970, 215 p. (in Russian)
7. Demyanov V.I., Kravtsov S.I., Zhukova G.A. et al. [Geological, hydrogeological and engineering geological conditions of the Sviyaga River within sheets N-39-49-A, B, D, N-39-61-A, B (survey results to scale 1 : 50,000 in 1975–1978 for reclamation purposes)]. Vol. I–VII. Middle Volga branch of TGF CRGC, 1978. (in Russian)
8. Zhuk V.A., Bovykin I.V., Romanova E.A., Skorniyakov V.A., Frolova N.L. [Formation conditions and variability of the annual runoff of rivers in the Volga basin]. In [Proc. of the 5th All-Union Hydrological Congress], vol. 6, Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989, pp. 420–429. (in Russian)
9. Kireeva M.B., Retz E.P., Samsonov T.E., Frolova N.L. [Study of the modern water regime of rivers in the European territory of Russia using an automated algorithm for dividing the GrWat hydrograph]. In: [Proc. Intern. Sci. Conf. “Scientific problems in improving Russian rivers and ways to their solution”]. Nizhny Novgorod, September 8–14, 2019, pp. 160–165. [<https://conf.iwp.ru/book/>] (in Russian)
10. Kudelin B.I. [Principles of regional assessment of natural groundwater resources]. Moscow, Moscow University Publ., 1966, 312 p. (in Russian)
11. Milanovskii E.V. [Essay on the geology of the Middle and Lower Volga region]. Moscow, Gostopizdat Publ., 1972, 178 p. (in Russian)
12. Sel'nikova N.V., Filippov B.S. [Geological structure of the middle course of the Sviyaga River]. Moscow, Gostopizdat Publ., 1956, 275 p. (in Russian)
13. Senyukov V.M. [Geological structure of the Ulyanovsk-Saratov syncline]. Moscow–Leningrad, Gostopizdat Publ., 1947, 178 p. (in Russian)
14. Frolova N.L., Kireeva M.B., Agafonova S.A., Evstigneev V.M., et al. [Intra-annual distribution of the flow of lowland rivers in the European territory of Russia and its changes]. *Vodnye khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, 2015, no. 4, pp. 4–20. (in Russian)

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 550/46

ОСОБЕННОСТИ ГЕОЭКОЛОГИИ МИКРОПРИЛИВНЫХ УСТЬЕВ МАЛЫХ РЕК С НАЛИЧИЕМ ДЕЛЬТЫ В РАЙОНАХ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИ В ЛЕТНЕ-ОСЕННЮЮ МЕЖЕНЬ НА ПРИМЕРЕ УСТЬЯ РЕКИ КАДЬ В БЕЛОМ МОРЕ

© 2024 г. И. В. Мискевич^{1,*}, Д. С. Мосеев^{1,**}, А. Е. Яковлев^{1,***}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Нахимовский пр., 36, Москва, 117997 Россия

*E-mail: subarct@gmail.com

**E-mail: viking029@yandex.ru

***E-mail: jakich1@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.08.2023 г.

После доработки 16.01.2024 г.

Принята к публикации 25.03.2024 г.

Рассмотрены гидрологические, гидрохимические и гидробиологические условия устья р. Кадь, впадающей в губу (лагуну) Сухое Море в Двинском заливе Белого моря. Выявлено, что процессы седиментации взвесей наиболее развиты в дельте реки и на ее мелководном устьевом взморье. На этих же устьевых участках формируются обширные заросли галофитов, и отмечается максимальное накопление тяжелых металлов в донных отложениях. Наибольшие концентрации металлов в донных отложениях в устье р. Кадь характерны для марганца, цинка и никеля. Подобная картина наблюдается и в уровнях загрязнения снежного покрова в рассматриваемом районе (в юго-западной части Беломорско-Кулойского плато). Это указывает на значительный вклад снега в накопление тяжелых металлов в устьевой области реки и прилегающего к ней участка лагуны Сухое Море. Возможно, такая ситуация является типичной для устьев рек арктической зоны. В условиях наблюдаемого потепления климата зафиксированные в устье Кади процессы позволяют предположить, что в микроприливных устьях рек арктических морей они будут приводить к заболачиванию и сокращению площадей лагун. При этом маргинальные фильтры устьев рек арктических островов будут увеличивать свою пространственную протяженность в пределах лагун, в первую очередь, за счет коагуляционно-сорбционной и биологической ступеней.

Ключевые слова: *река Кадь, дельта, лагуна, маргинальный фильтр, прилив, взвеси, металлы, седиментация, Арктика, потепление, мерзлота, заболачивание*

DOI: 10.31857/S0869780924030037 **EDN:** SPRYQN

ВВЕДЕНИЕ

Среди устьев малых рек российской Арктики широко распространены водные объекты лагунно-дельтового типа. Они, в частности, характерны для низменных участков побережий таких островов, как Колгуев, Новая Земля в Баренцевом и Карском морях и Котельный в море Лаптевых. Здесь под малой рекой, в соответствии с ГОСТ 19179-73 “Гидрология суши. Термины и определения”, будем понимать водоток с площадью водосбора не более 2000 км². В устьях таких рек, как правило, наблюдаются микроприливные условия, когда величина прилива в сизигию превышает 0.3 м, но не выходит за пределы уровня в 1.6 м [3].

Геоэкологическое изучение вышеупомянутых устьев рек практически не проводилось, если не считать их геоморфологических исследований

путем анализа космических снимков (карт) [6]. Возможно, это исторически обусловлено сосредоточением основного интереса к изучению устьев арктических рек на примере больших рек (Печора, Обь, Енисей, Лена, Колыма и т.д.). В отличие от них устья малых рек в подавляющем большинстве недоступны для морского, речного и другого транспорта, за исключением вертолетов, использование которых требует больших финансовых затрат. С другой стороны, учитывая наличие развитой гидрографической сети малых водотоков на арктической территории, возникает проблема оценки условий обмена различными веществами, включая загрязняющие примеси, между сушей и морем на фоне наблюдаемого потепления климата на множестве локальных участков российской Арктики, в том числе с расположением

промышленных объектов по эксплуатации месторождений полезных ископаемых.

Исследование особенностей геоэкологических условий микроприливных устьев малых рек в арктических регионах можно провести в районах со сравнительно развитой транспортной инфраструктурой, используя метод аналогового моделирования. В частности, можно получить необходимые характеристики, анализируя результаты комплексных исследований устья р. Кадь, впадающей в лагунообразную губу Сухое море в Двинском заливе Белого моря. Устье р. Кадь можно отнести к лагунно-дельтовому типу.

Несмотря на сравнительно мягкие климатические условия, гидрологические характеристики Кади схожи с параметрами, типичными для многих устьев арктических рек, в первую очередь в западном секторе российской Арктики – в Баренцевом, Печорском и Карском морях. Здесь наблюдается продолжительный период существования ледового покрова (около 7 месяцев), относительно короткая летняя межень (не более 2-х месяцев) и хорошо выраженный максимум весеннего стока реки.

Таким образом, геоэкологические характеристики в устье р. Кадь, учитывая, в первую очередь, схожесть гидрологических условий, можно использовать для аналогового моделирования условий, наблюдаемых во многих устьях рек арктических морей, по крайней мере, располагающихся в зоне лесотундры.

МЕТОДИКА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения необходимой информации были использованы данные исследований Северо-Западного отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (СЗО ИО РАН), проведенных в начале сентября 2021 г. Схема расположения створов в пределах исследуемой части устьевой области р. Кадь отражена на рис. 1.

Исследования в устье р. Кадь проводились 3–7 сентября 2021 г. Река имеет длину около 96 км, площадь водосбора 341 км² и относится к малым рекам. При впадении в лагуну Сухое море она формирует небольшую много рукавную дельту. В свою очередь, лагуна Сухое море располагается на устьевом взморье большой р. Северная Двина.

В состав проведенных полевых работ входили:

- полусуточные наблюдения с дискретностью 2 ч в вершине дельты на станции, удаленной на 1.3 км от морского края дельты реки, за уровнем воды, температурой и соленостью воды, содержанием кислорода и величиной рН, также осуществлялся отбор проб воды для определения содержания взвеси и растворенного общего фосфора на поверхностном горизонте; эти наблюдения

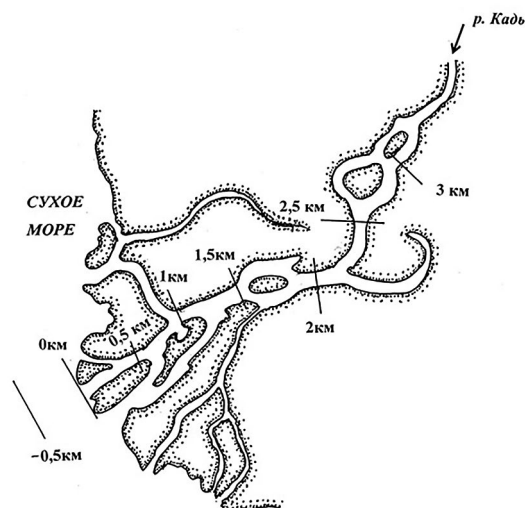


Рис. 1. Схема расположения створов наблюдений в устье р. Кадь в губе Сухое море в 2021 г.

сопровождались синхронным отбором проб воды на створе 1 км выше морского края дельты;

- гидрологический разрез на 5 створах (–0.5, 0, 1, 2, 3 км) вдоль устья реки в зоне смешения морских и речных вод в полную воду приливного цикла; на всех створах на поверхностном горизонте производились измерения температуры и солености воды, кислорода, величины рН и отбор проб на содержание взвеси и общего фосфора;

- отбор проб донных отложений для определения содержания тяжелых металлов на трех створах: на морском крае дельты реки и на створах 1 и 2 км выше морского края дельты;

- фиксация характера галофитной растительности в устье реки.

Для замера температуры, солености (минерализации), кислорода и величины рН в поверхностных водах использовался многопараметрический анализатор жидкости Multi 3420 фирмы WTW (Германия), позволяющий, в том числе, определять суммарное содержание всех растворенных веществ. Уровень воды определялся по водомерной рейке с привязкой к условному нулю поста. Выделение взвеси проводилось методом мембранной ультрафильтрации под вакуумом через чистые ядерные фильтры (обработанные 4-процентной соляной кислотой и тщательно промытые бидистиллированной водой). Фильтрация каждой пробы воды проводилась через 3 параллельных операций.

При определении растворенного общего фосфора пробы воды предварительно фильтровались через ядерные фильтры с диаметром пор 0.45 мкм. Затем проводилось окисление фосфорсодержащих органических соединений до фосфатов, концентрации которых измерялись

на спектрофотометре модели DR3900 фирмы "HACH-LANGE", Германия.

Содержание тяжелых металлов в донных отложениях определялось по методике атомно-абсорбционной спектроскопии "холодного пара" (ААС ХП) согласно требованиям М-МВИ-80-2008¹.

Галофитный растительный покров в устье р. Кадь изучался в ходе маршрутных обследований на малой воде приливного цикла и методом закладки геоботанических площадок в пределах естественных контуров фитоценозов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Микроприливное устье реки можно разделить на:

- открытое устьевое взморье протяженностью около 0.5 км, располагающееся в лагуне Сухое Море;
- дельту протяженностью около 1.5 км;
- устьевой участок реки длиной около 3 км.

Глубины на устьевом взморье реки в малую воду прилива были очень незначительными и колебались в пределах 0.1–0.3 м. В дельтовых протоках на их отдельных участках в эту фазу прилива они могли возрастать до 1 м. На устьевом взморье и в дельтовых протоках донные отложения представлены серыми илами, местами встречается черный ил. В вершине дельты и на нижнем отрезке устьевых участков реки в малую воду прилива максимальные глубины могли достигать 2–3 м и даже более. Здесь донные отложения вне зон приливных осушек, ширина которых чаще всего колеблется в интервале 2–5 м, представлены в основном песком, илистым песком с включениями ила, местами глиной и гравием.

За пределами устьевой области наибольшие глубины в летне-осеннюю межень в р. Кадь обычно колеблются в диапазоне 0.5–1.0 м. Исключение здесь могут составлять лишь редкие ямы в омутах, где глубины достигают нескольких метров. Ихтиофауна реки представлена кумжей, сигом, хариусом, щукой, окунем, язем, ельцом и налимом, отмечаются заходы горбуши.

Отмеченное распределение глубин в устьевой области реки указывает, что наиболее интенсивно процессы седиментации взвешенного материала происходят в дельте и на устьевом взморье реки, где заросли галофитов и ослабление приливных течений способствуют выпадению взвесей в осадок, а также дополнительно формируют взвешенные вещества биологического происхождения

за счет деструкции многочисленной водной растительности.

В вершине дельты и на нижнем отрезке устьевых участков рек за счет усиления приливных течений при уменьшении поперечного сечения водотока происходит размыв мелкодисперсных осадков. Это позволяет здесь формироваться более значительным глубинам и препятствует массовому разрастанию галофитов.

Результаты проведенных гидролого-гидрохимических наблюдений показаны в табл. 1–4. Их анализ производился в рамках модели маргинального фильтра, которую предложил академик А.П. Лисицын [1]. Эта модель отражает процессы обмена веществами между сушей и морем в зоне смешения речных и морских вод. Она подразумевает, что при возрастании солёности устьевых вод формируются три последовательные зоны (ступени): 1) гравитационная (мутевая "пробка"), 2) коагуляционно-сорбционная, 3) биологическая (биологическая "пробка").

На первой ступени отмечается максимальная мутность устьевых вод, на последующей наибольшую активность получают геохимические процессы, а в третьей зоне фиксируется значительное повышение биомассы планктона и бентоса. Например, в Белом море для устьевой области р. Северная Двина первой зоне соответствует диапазон солёности 0.5–5‰, второй – 5–20‰, и третьей – >20‰ [5].

В период проведения полевых работ величина прилива в вершине дельты р. Кадь колебалась около 0.8 м. Солёные воды в фазу прилива проникали вглубь устья реки на расстояние около 3–4 км от морского края дельты. В дельте Кади максимальная солёность на приливе может достигать 14‰, но она зависит от колебаний расходов Северной Двины, которые, в свою очередь, определяют степень распреснения вод губы Сухое Море.

Анализ зависимостей исследуемых показателей от распределения солёности показал следующее. Содержание взвешенных веществ имеет нелинейную связь с солёностью устьевых вод, отражая их уменьшение не только за счет разбавления морских вод речными (седиментацию) в пределах дельты и устьевых участков реки (рис. 2а).

Одновременно в пределах дельты реки наблюдается повышение кислородонасыщения вод (выше 100%) (см. 2б) и величины pH (см. рис. 2в), очевидно, связанное с процессами фотосинтеза при вегетации микроводорослей и водных макрофитов.

Для растворенного общего фосфора фиксируется наличие линейной зависимости с возрастанием его концентраций по мере увеличения солёности устьевых вод (см. рис. 2г), что позволяет предположить явное доминирование в его составе

¹ Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии. <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293824/4293824289.htm>

Таблица 1. Результаты гидролого-гидрохимических полусуточных наблюдений на поверхностном горизонте на створе 1 км выше морской границы дельты р. Кадь, 05.09.2021 г.

Номер серии	Время (MSK)	T, °C	S, ‰	pH	Кислород	
					мг/л	%
I	10:00	9.8	3.8	7.80	11.11	99.2
II	12:00	10.8	2.7	7.81	11.25	102.3
III	14:00	9.7	10.8	7.67	11.63	103.2
IV	16:00	9.3	13.6	7.82	11.54	99.2
V	18:00	9.6	11.4	7.91	11.39	100.5
VI	20:00	9.6	10.7	7.77	11.51	100.3
VII	22:00	9.0	6.2	7.77	11.33	98.2

Таблица 2. Результаты гидролого-гидрохимических полусуточных наблюдений на поверхностном горизонте в вершине дельты р. Кадь (створ 1.3 км выше морской границы дельты), 05.09.2021 г.

Номер серии	Время (MSK)	H, см	T, °C	S, ‰	Взвеси, мг/л	pH	Кислород		Общий фосфор, мкг/л
							мг/л	% насыщения	
I	10:00	5	9.8	2.7	7.3	7.82	11.02	98.0	11.2
II	12:00	4	10.6	1.3	5.3	7.89	11.34	103.2	10.7
III	14:00	32	10.1	4.0	4.7	7.73	11.34	101.4	14.3
IV	16:00	59	9.9	7.4	7.7	7.78	11.4	101.1	18.2
V	18:00	80	9.4	11.2	15.3	7.92	11.43	100.2	30.9
VI	20:00	48	9.1	9.3	6.0	7.81	11.41	99.0	16.6
VII	22:00	18	9.0	5.0	5.7	7.82	11.26	97.8	16.0

Таблица 3. Результаты гидролого-гидрохимических наблюдений на разрезе в полную воду приливного цикла на поверхностном горизонте в устье р. Кадь, 04.09.2021 г.

Створ	Время (MSK)	T, °C	S, ‰	Взвеси, мг/л	Кислород		pH	Общий фосфор, мкг/л
					мг/л	% насыщения		
–0.5 км	17:15	10.4	9.1	12.4	11.09	99.8	7.97	14.3
0 км	17:24	10.3	8.5	16.0	11.19	100.7	8.02	16.6
1 км	17:36	10.5	5.6	8.0	11.41	102.5	8.05	11.8
2 км	17:48	10.5	4.3	6.0	11.36	102.7	7.92	11.8
3 км	18:01	10.2	0.6	5.0	11.31	101.7	7.83	7.9

Примечание. Створы указаны относительно морской границы дельты реки.

Таблица 4. Содержание тяжелых металлов в донных отложениях устья р. Кадь в сентябре 2021 г., [мг/кг]

Металл	Створы в устье р. Кадь		
	0 км Ил	1 км Илистый песок	2 км Илистый песок + песок
Mn	134	78	43
Ni	140	31	50
Zn	51	40	43
Cu	8.7	4.6	5.6
Pb	3.4	4.7	1.8
Cd	<1	<1	<1

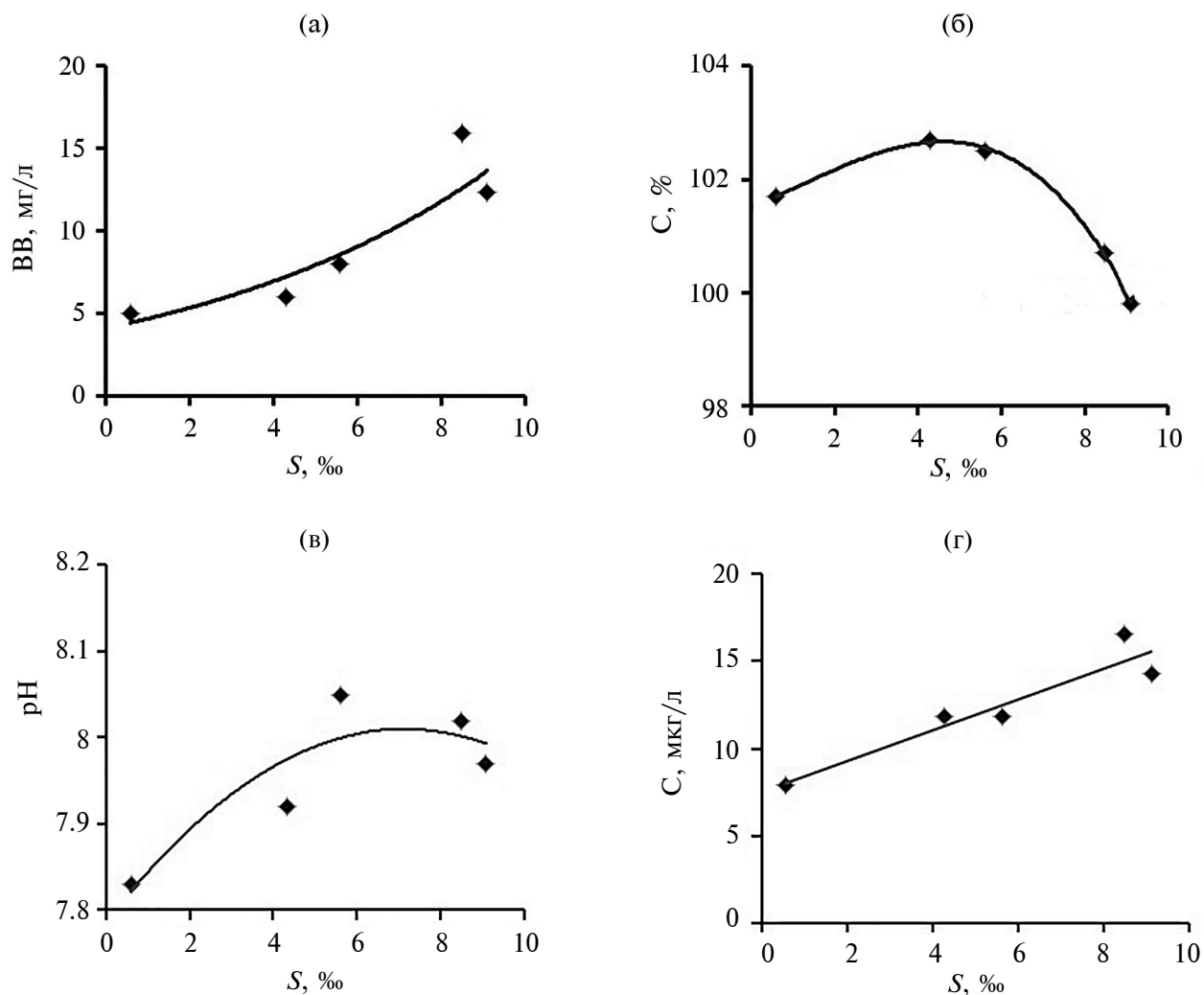


Рис. 2. Графики взаимосвязи солености со взвесью (а), кислородонасыщением (б), величиной pH (в) и содержанием общего фосфора (г) на поверхностном горизонте в устье р. Кадь, 04.09.2021 г.

органических соединений, не вовлекаемых в процессы фотосинтеза.

В пространственной изменчивости содержания взвеси в устье Кади наблюдалась локализация мутьевой “пробки” на морской границе дельты, где отмечаются наиболее мощные иловые отложения и минимальные глубины. Это, в частности, влечет за собой фиксацию максимума мутности устьевых вод в вершине дельты реки не в начале прилива, что характерно для мезоприливных и макроприливных эстуариев, а на полной воде приливного цикла, когда водная масса от границы морского края дельты смещается на устьевой участок реки.

В свою очередь, подобное пространственное распределение взвешенного материала влечет за собой постепенное выдвижение дельты в лагуну с увеличением проективного покрытия устьевых взморья реки галофитной растительностью. В этих условиях формируется так называемая

дельта выполнения [4], впадающая в лагуну, где осаждаются основной объем аллювиального материала.

Распределение исследуемых тяжелых металлов в донных отложениях в устье р. Кадь характеризуется наличием их минимума на речной границе дельты реки (рис. 3). Максимальное содержание тяжелых металлов отмечается в илах, т.е. в тонкодисперсных осадках, обладающих высокой сорбционной способностью и накапливаемых в более спокойной в гидродинамическом отношении зоне. Наибольшие концентрации характерны для марганца, цинка и никеля. Подобная картина наблюдается и в уровнях загрязнения снежного покрова в рассматриваемом районе (в юго-западной части Беломорско-Кулойского плато) [2]. Можно предположить, что снег дает определенный вклад в формирование химического состава донных отложений в устьевой области р. Кадь и на прилегающем к ней участке лагуны Сухое

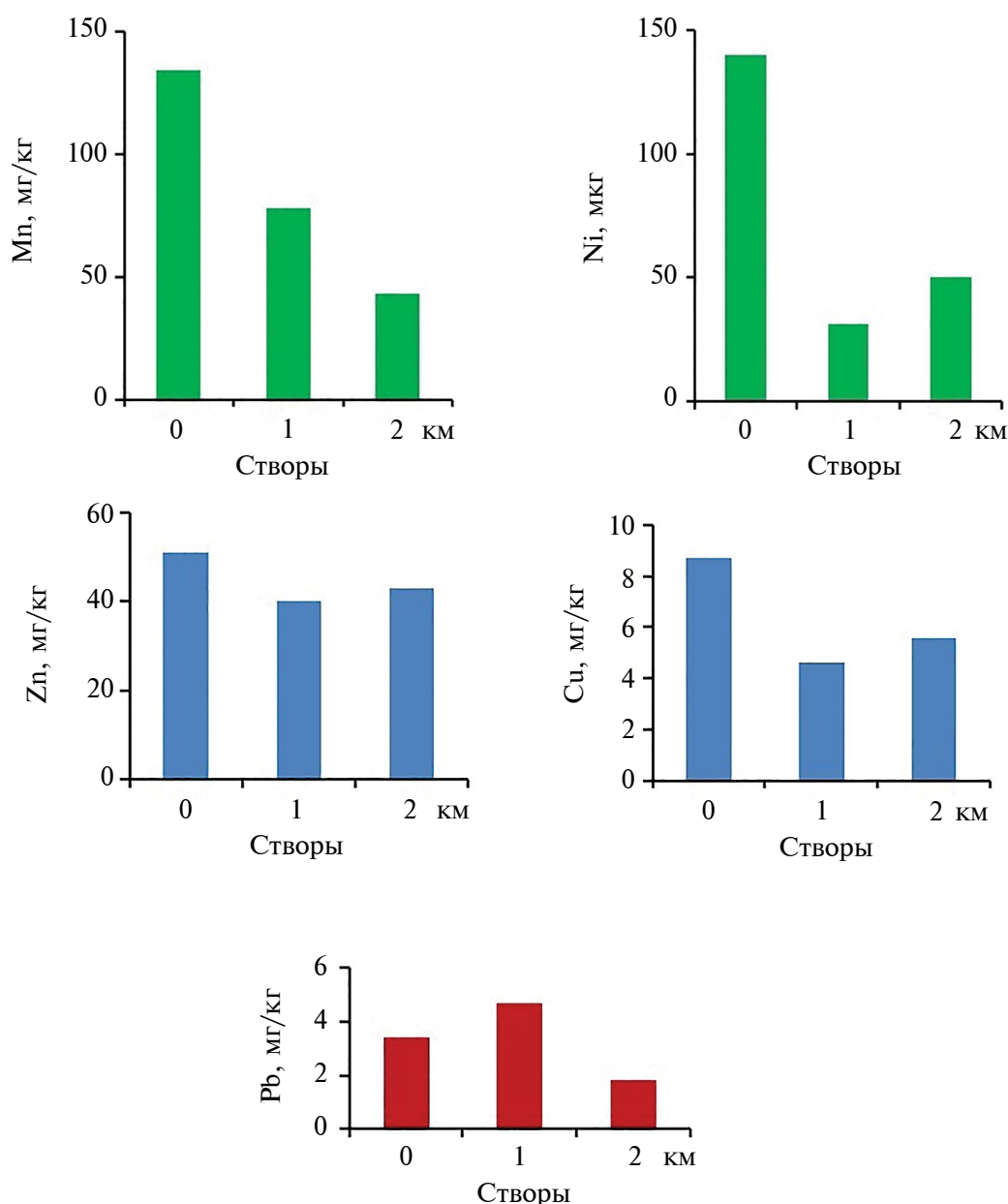


Рис. 3. Пространственное распределение тяжелых металлов в донных отложениях в устье р. Кади в летнюю межень 2021 г.

Море. Возможно, такая ситуация является типичной для устьев рек арктической зоны.

В растительном покрове исследуемого водного объекта хорошо выделяются несколько поясов. Пояс водной (погруженной) растительности состоит из сообществ с доминированием рдеста гребенчатого (*Stuckenia pectinata*). Сообщества рдеста занимают илистые грунты по всей дельте и на устьевом взморье Кади в Сухом Море, где при повышении солености воды они соседствуют с ценозами зеленой водоросли ульвы (*Ulva prolifera*). Воздушно-водная растительность в основном образована монодоминантными сообществами крупного высокотравного гидрофильного

злака — тростника обыкновенного (*Phragmites australis*). Сообщества тростника занимают приливные осушки по всей дельте Кади. На ее устьевом взморье, кроме сообществ тростника, значительные площади занимают более глубоководные сообщества другого крупного гидрофита — камыша Табернемонтана (*Schoenoplectus tabernaemontani*). Они формируются на илистых донных отложениях, которые не обсыхают в фазу отлива. Наиболее высокий пояс прибрежной растительности образован сообществами вейника пурпурного (*Calamagrostis purpurea*), сменяющих сообщества тростника по направлению к суше. В микропонижениях (микроямках) в поясе прибрежной растительности располагаются нитрофилильные

группировки из *Oxybasis rubra*. Зафиксированная ситуация по галофитам является признаком развивающейся эвтрофикации водного объекта.

Здесь следует заметить, что заболачивание и зарастание арктических приливных лагун за счет формирования обильных зарослей галофитов будет способствовать расширению территорий, попадающих под статус Рамсарской Конвенции о водно-болотных угодьях и создающих благоприятные условия для обитания (гнездования) водоплавающих и околоводных птиц, включая многие охраняемые виды. Для ихтиофауны какие-либо последствия указанного процесса не так очевидны. Однако негативное влияние для полупроходных и проходных рыб, включая их ценные виды (голец, горбуша, нельма, сиги), при возможной эвтрофикации лагун наблюдаться не будет, так как их нерест и зимовки происходят вне лагун на устьевом участке реки и выше. Здесь за счет сильных приливных течений и резкого уменьшения ширины приливной осушки эвтрофикация не может получать значительного развития.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лагунные типы устьев рек получили наибольшее распространение на арктических островах, где все водотоки имеют статусы малой реки или ручьев. Их биогеоценозы в настоящее время испытывают значительные изменения под воздействием наблюдаемого климатического потепления территории Арктики. Учитывая результаты проведенных исследований, можно предположить, что при разрушении многолетнемерзлых грунтов маргинальные фильтры устьев островных рек, определяющих перенос продуктов разрушения таких грунтов в море, будут увеличивать свою пространственную протяженность, в первую очередь, за счет коагуляционно-сорбционной и биологической ступеней, но только в пределах лагун. При этом поверхностные слои почвы на арктических островах, как правило, закреплены разнообразной растительностью, что минимизирует попадание их частиц в водные объекты. Исключением в данном отношении могут быть эрозионные процессы, обусловленные протаиванием нижележащих грунтов и ведущие к нарушениям целостности поверхностного почвенного покрова.

Продукты выноса многолетнемерзлых пород и поверхностного почвенно-растительного покрова могут содержать как биогенные вещества, способствующие повышению трофности устьевых экосистем, так и токсические вещества, лимитирующие их развитие. Особенностью подобных

процессов будет затрудненный перенос взвешенных и влекомых наносов за пределы устьевых лагун. В данной ситуации будут наблюдаться постепенное заболачивание устьевых лагун и сокращение их площади за счет формирования дельтовых островов.

Данный фактор, в частности, необходимо учитывать при разработке схем водоотведения при разработке полезных ископаемых на островах российской Арктики. При этом не рекомендуется сбрасывать дренажные и другие виды сточных вод в речные водотоки для предотвращения накопления токсических веществ в заболачиваемых лагунах и их последующего включения в пищевые цепочки промысловых видов рыб и водоплавающих птиц, включая объекты любительской и промысловой охоты. В рассматриваемой ситуации целесообразными могут быть их удаление в непроточные озера или сброс в морские воды за пределами устьевых лагун.

Работа выполнена в рамках темы госзадания № FMWE-2021-0006 “Современные и древние донные осадки и взвесь Мирового океана — геологическая летопись изменений среды и климата: рассеянное осадочное вещество и донные осадки морей России, Атлантического, Тихого и Северного Ледовитого океанов — литологические, геохимические и микропалеонтологические исследования; изучение загрязнений, палеообстановок и процессов в маргинальных фильтрах рек”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
2. Мискевич И.В., Котова Е.И. Влияние состава снега на состав донных отложений малой реки на примере реки Лапа в дельте Северной Двины // Успехи современного естествознания. 2023. № 4. С. 49–54.
3. Михайлов В.Н. Принципы типизации и районирования устьевых областей рек (аналитический обзор) // Водные ресурсы. 2004. Т. 31. № 1. С. 5–14.
4. Морская геоморфология. Терминологический справочник. Береговая зона: процессы, понятия, определения. М.: Мысль, 1980. 280 с.
5. Шевченко В.П., Филиппов А.С., Новигатский А.Н., Гордеев В.В. и др. Рассеянное осадочное вещество пресноводных и морских льдов // Система Белого моря. Т. II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера / Отв. ред. Лисицын А.П. М.: Научный мир, 2012. С. 169–200.
6. Школьный Д.И., Айбулатов Д.Н. Типизация устьевых областей рек острова Южный (архипелаг Новая Земля) // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2016. С. 50–57.

GEOENVIRONMENTAL SPECIFICS IN THE MICROTIDAL MOUTHS OF SMALL RIVERS WITH DELTAS IN THE RUSSIAN ARCTIC ZONE DURING THE SUMMER-FALL LOW WATER SEASON BY THE EXAMPLE OF THE KAD RIVER MOUTH, THE WHITE SEA

I. V. Miskevich^{a,#}, D. S. Moseev^{a,##}, A. E. Yakovlev^{a,###}

^a*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences
Nakhimovskii pr., 36, Moscow, 117997 Russia*

[#]*E-mail: subarct@gmail.com*

^{##}*E-mail: viking029@yandex.ru*

^{###}*E-mail: jakich1@yandex.ru*

The hydrological, hydrochemical and hydrobiological conditions of the Kad River mouth are considered that flows to the Sukhoe More lagoon, the Dvina Bay, the White Sea. It is revealed that suspension sedimentation is most developed in the river delta and on its shallow estuarine seashore. Extensive thickets of halophytes are formed in these areas, and the maximum accumulation of heavy metals is noted in bottom sediments. Manganese, zinc and nickel show the highest concentrations in the bottom sediments within the Kadi River mouth. A similar pattern is observed for the snow cover pollution in the considered area (the southwestern part of the Belomorsko-Kuloiskoe plateau). This indicates a significant contribution of snow to the heavy metal accumulation in the estuary area of the Kadi River and the adjacent section of the Sukhoe More lagoon. Perhaps this situation is typical for the river mouths in the Arctic zone. Under the observed climate warming, the processes noted in the Kadi River mouth suggest that they will lead to waterlogging and a reducing the lagoon area in the micro-tidal estuaries of the rivers of the Arctic seas. They will accumulate suspended material carried out with river runoff during the destruction of permafrost soils. It can contain both biogenic substances that contribute to an increase in the trophic capacity of estuarine ecosystems, and toxic substances that limit their development. At the same time, marginal filters of the estuaries of the rivers in the Arctic islands will increase their spatial extent within the lagoons, primarily due to coagulation-sorption and biological stages.

Keywords: river Kad, delta, lagoon, marginal filter, high tide, suspended matter, metals, sedimentation, Arctic, warming, permafrost, waterlogging

REFERENCES

1. Lisitsyn, A.P. [Marginal filter of oceans]. *Okeanologiya*, 1994, vol. 34, no. 5, pp. 735–747. (in Russian)
2. Miskevich, I.V., Kotova, E.I. [The influence of snow composition on the composition of bottom sediments of a small river on the example of the Lapa River in the Northern Dvina delta]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2023, no. 4, pp. 49–54. (in Russian)
3. Mikhailov, V.N. [Principles of typification and zoning of river estuarine regions (analytical review)]. *Vodnye resursy*, 2004, vol. 31, no. 1, pp. 5–14. (in Russian)
4. [Marine geomorphology. Terminological reference. Coastal zone: processes, concepts, definitions]. Moscow, Mysl' Publ., 1980, 280 p. (in Russian)
5. Shevchenko, V.P., Filippov, A.S., Novigatskii, A.N., Gordeev, V.V. et al. [Dispersed sedimentary matter of freshwater and sea ice]. In [System of the White Sea. Vol. II. Water column and the atmosphere interacting with it, cryosphere, river runoff and biosphere]. A.P. Lisitsyn, I.A. Nemirovskaya, Eds. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2012, pp. 169–200. (in Russian)
6. Shkolnyi, D.I., Aibulatov, D.N. [Typification of the mouth areas of the rivers of Yuzhny Island (Novaya Zemlya archipelago)]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Series 5. Geografiya*, 2016, pp. 50–57. (in Russian)

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 911.2

ГЕОБОТАНИЧЕСКАЯ ИНДИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ НАРУШЕННЫХ ТОРФЯНИКОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОЖАРООПАСНОСТИ

© 2024 г. Т. В. Орлов^{1,*}, М. В. Архипова¹, В. В. Бондарь¹, Р. О. Разумовский¹,
В. А. Смагин², К. Л. Шахматов³

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

²Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН,
ул. Профессора Попова, 2, Санкт-Петербург, 197376 Россия

³Тверской Государственный технический университет,
ул. Желябова, 33, Тверь, 170100 Россия

*E-mail: tim.orlov@gmail.com

Поступила в редакцию 01.04.2024 г.

После доработки 19.04.2024 г.

Принята к публикации 03.06.2024 г.

Проблема пожароопасности заброшенных торфяников в настоящее время является особенно актуальной, так как негативные последствия торфяных пожаров приводят к ухудшению здоровья населения и влияют на общество. Однако взаимосвязям растительных сообществ с частотой пожаров уделяется недостаточно внимания. Исследование посвящено оценке состояния нарушенных торфяников с помощью геоботанической индикации торфяных грунтов на примере торфяников в Ленинградской и Псковской областях. Выбрано 3 ключевых объекта — заброшенные, разрабатываемые в середине XX в. торфяные месторождения. В основе методики оценки пожароопасности торфяников лежат комплексный подход, включающий в себя создание крупномасштабных карт растительности с помощью серии спутниковых снимков и полевых геоботанических описаний, и анализ пожаров на объектах за период с 2000 по 2023 г. с помощью спутниковых снимков и данных по термоточкам. В результате исследования получены карты частоты и длительности пожаров и карты групп ассоциаций растительности на каждый участок. Анализ взаимосвязи растительных сообществ с частотой пожаров показал, что видовой состав сообществ относительно хорошо коррелирует со временем, прошедшим с даты последнего пожара, и в меньшей степени — с длительностью пожаров. Связь между частотой пожаров и состоянием растительного покрова достаточно сильная, поэтому тип растительного покрова можно использовать как индикатор частоты пожаров на торфянике. На территориях с торфяными пустошами с редким березовым древостоем пожар происходит не менее одного раза в 5 лет. На территориях, занятых сфагновыми и тростниковыми сообществами на обводненной поверхности торфа, пожар происходит не чаще, чем один раз в 20 лет. Полученные результаты могут применены для экспресс оценки состояния нарушенных торфяников и прогноза их пожароопасности.

Ключевые слова: пожароопасность, торфяники, геоботаническая индикация, Северо-Западный федеральный округ

DOI: 10.31857/S0869780924030042 EDN: SPRJYW

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время осушенные, а также выработанные торфяники занимают большие площади в различных субъектах Российской Федерации [15]. В большинстве своем они заброшены, и работа мелиоративных систем не контролируется. Это приводит к тому, что торфяные грунты в их пределах находятся в осушенном состоянии и могут легко воспламениться.

Подобные объекты, с одной стороны, относительно труднодоступны, так как включают в себя

большое количество каналов, с другой стороны, находятся в непосредственной близости от населенных пунктов. Большинство из таких торфяных месторождений разрабатывались в целях добычи топлива для местных электростанций [15]. Поэтому возгорания на торфяниках зачастую напрямую влияют на жизнедеятельность человека.

Проблема пожароопасности торфяных болот является общемировой, так, например, на основе спутниковых снимков разрабатывался индекс пожароопасности торфяных лесов на территории

Малайзии [24]. В исследовании мощных пожаров Индонезии и острова Калимантан [23, 25] с помощью данных FIRMS анализировались площади выгоревших территорий, причины и частота возгораний, также разрабатывались алгоритмы для картирования лесных пожаров на юге Индии [27]. Huang и Rein [29] в своих исследованиях разработали модель, показывающую роль влажности торфа в возгораниях. Исследовались торфяники западного региона Канады [26, 28], где изучалась динамика площадей сгоревших территорий.

Проблемой пожароопасности заброшенных торфяных месторождений и их мелиорации в России занимались многие исследователи [3, 9, 10]. Множество работ посвящено картографированию торфяных болот в различных регионах Российской Федерации. М.А. Медведева с соавторами [11] оценивали состояние растительности торфяников по данным космической съемки. Они использовали 6 основных классов растительного покрова, которые выделялись с помощью космической съемки: открытый торф (участки открытого торфа с разреженным растительным покровом; кипрейные, вейниковые и березово-вейниковые сообщества; сообщества с преобладанием сосны различной степени угнетенности; сообщества с преобладанием ивы и березы; гидрофильные сообщества с рогозом и камышом на обводненных участках; водоемы. Выполнено картографирование торфяных болот на примере Рязанской области [7]. А.В. Соношкин, А.В. Шумилин [20] проводили мониторинг возгораний на территории России с помощью спутниковой съемки.

А.Н. Субботин [21], а вслед за ним А.М. Гришин [4] разработали и использовали упрощенную математическую модель торфяных пожаров, с помощью которой была решена задача о стационарном распространении фронта торфяного пожара. Было установлено, что структура фронта торфяного пожара в качественном отношении совпадает со структурой фронта лесного пожара, и горение носит диффузионный характер, т.е. лимитируется притоком окислителя.

А.И. Фильков [22] отмечает, что повышенная пожарная опасность торфа обусловлена его пористой структурой, малой плотностью и наличием в составе до 40% кислорода, и обращает внимание на важную роль растительных сообществ, как индикаторов типов торфяных пожаров. Существенным фактором является то, что процесс развития пожаров зависит от влажности верхнего слоя торфяной залежи. Большая влажность торфяного пласта не позволяет огню проникать в глубину залежи. Поэтому пожары на торфяниках, как правило, распространяются по поверхности массива. Поэтому необходима оценка факторов пожароопасности при торфодобыче, к числу основных из которых относятся горимость абсолютно сухого вещества торфа, метеорологические факторы, первоначальная влажность верхнего слоя

торфяной залежи, такие метеорологические факторы, например, скорость ветра, и др. Н.П. Ахметьева с соавторами отмечает [1], что физико-химические свойства торфа в природной обстановке свидетельствуют о том, что торф имеет склонность к возгоранию лишь при возникновении аномальных погодных и техногенных условий. Основная причина возникновения пожаров — хозяйственная деятельность человека (осушение торфа, создание высоких безнадзорных буртов торфа, разведение костров, пал травы, применение на торфяниках неисправной техники).

Н.П. Ахметьева с соавторами [2] детально проанализировала состав и скорость появления отдельных видов растений на месте гарей для двух ключевых участков.

В.В. Панов с соавторами [16, 18] выделил несколько основных типов пространственного распространения гарей и отметил, что различные виды гарей на торфяниках зарастают по-разному. Так на “моховой” гари, для которой характерно выгорание сухих центральных частей моховых сплавин, моховой покров восстанавливается уже при следующей вегетации. На “поверхностной” гари (выгорание ровного слоя торфа глубиной до 2 м) характерны медленное зарастание рудеральными видами и колонизация березой. Подобный характер зарастания свойственен также для “холмисто-ямной” и “грядовой” гарей. Для “ямо-западинной” гари характерно медленное зарастание луговыми лесными видами. В [17] были определены основные факторы пожароопасности выработанных торфяников, основные из них: наличие остаточного слоя торфа, наличие окраек с лесом высокого бонитета, способ добычи, складирование остатков торфяного сырья, населенные пункты на торфяниках, наличие дорог внутри торфяника, и разработан классификатор, на основе которого с помощью бальной оценки разработаны классы от I до V техногенной пожарной опасности торфяных участков.

В.В. Панов [14, 15] разработал концептуальные схемы восстановления торфяников в естественных условиях и в условиях вторичного обводнения. Начиная с XXI в. широко изучаются и разрабатываются методы предотвращения и сокращения торфяных пожаров на осушенных болотах [12]. Активно применяются методы вторичного обводнения заброшенных торфяников с целью восстановления естественного состояния растительности на болотах, снижения частоты торфяных пожаров и сокращения эмиссии парниковых газов [13].

Несмотря на обширные исследования в этой области, взаимосвязям растительных сообществ с частотой пожаров уделяется недостаточно внимания. Оценка пожароопасности торфяников особенно актуальна, когда нарушенные торфяники располагаются в непосредственной близости от населенных пунктов, которые страдают от пожаров и задымления торфяными возгораниями,

особенно для некоторых областей Северо-Западного федерального округа.

Целью работы являлась оценка состояния нарушенных торфяников с помощью геоботанической индикации для оценки их пожароопасности на примере торфяников в Ленинградской и Псковской областях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве ключевых участков исследования были выбраны торфяники: Гладкий Мох и Малодубровское в Ленинградской обл. и Заячий Отрог в Псковской обл. (рис. 1). Они представляют собой торфяные месторождения, добыча торфа на которых, преимущественно фрезерным способом, активно велась в советское время и была остановлена в период с 1990 по 2005 г. Участки расположены в южной подзоне тайги с развитием подзолистых, дерново-подзолистых и болотных почв.

Методика оценки пожароопасности нарушенных торфяников включала в себя несколько этапов: составление карт растительности, анализ частоты и длительности пожаров на участках и анализ взаимосвязи растительности с характеристиками (площадью, частотой, длительностью) пожаров.

Составление карт растительности базируется на использовании различных дистанционных съемок с опорой на полевые наблюдения и измерения. Первый этап включает построение предварительных карт растительности на основе разносезонной космической съемки, второй этап — построение детальных карт растительного покрова на основе совместного использования космической и аэрофотосъемки.

В основе обоих этапов лежат следующие универсальные подходы:

- использование методов машинного обучения, таких как Random Forest при полуавтоматизированной классификации изображений;
- использование полевых описаний.

Авторским коллективом разработаны методика детального индикационного картографирования торфяников с помощью космической съемки с опорой на съемку с БПЛА и эталонные описания для оценки пожароопасности. Методика состоит из нескольких этапов:

- подбор снимков;
- картографирование состояния групп ассоциаций растительности по экологическим свойствам природных комплексов;

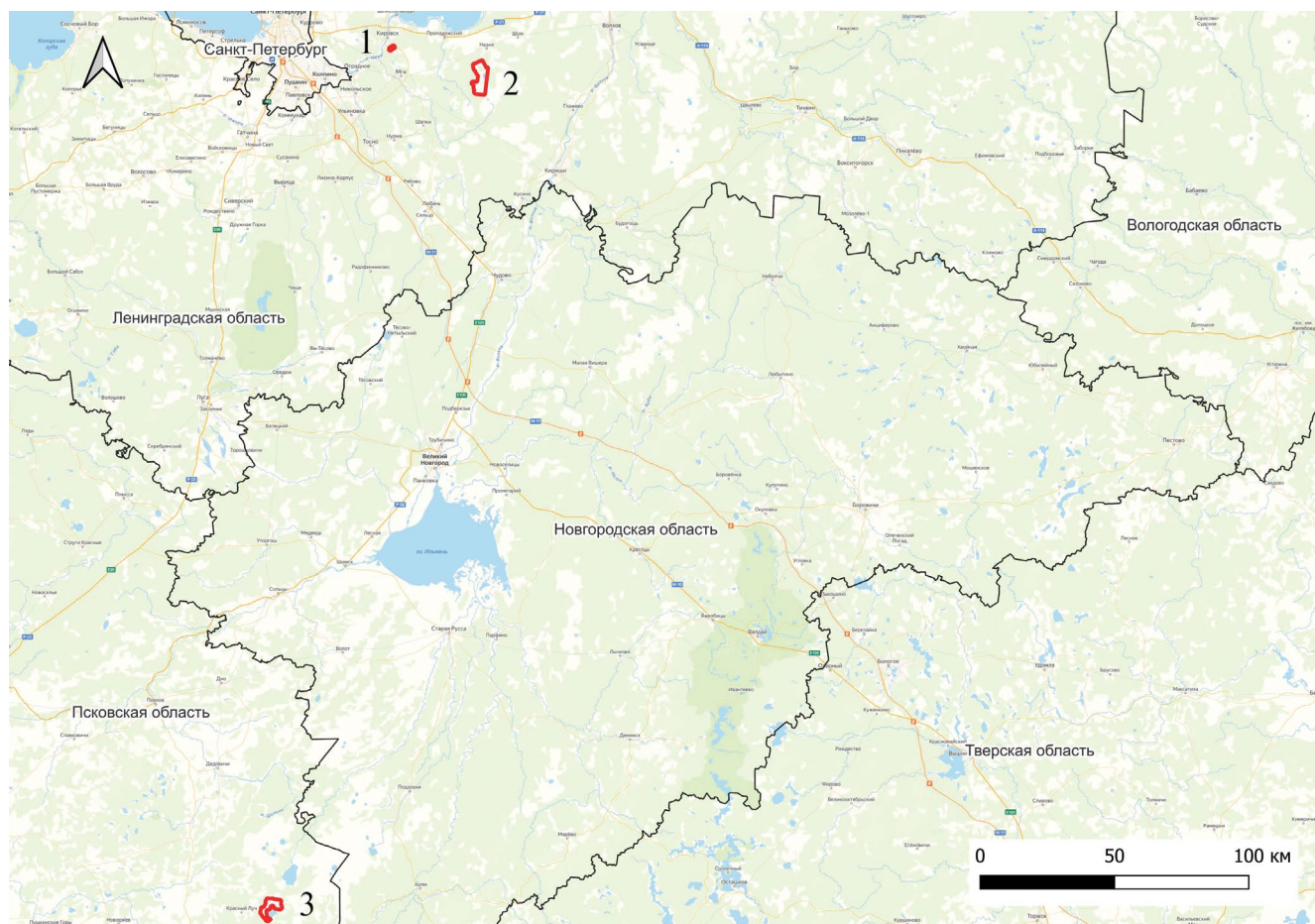


Рис. 1. Расположение эталонных участков: 1 — Малодубровское, 2 — Гладкий Мох, 3 — Заячий Отрог.

- картографирование участков, пройденных огнем в разное время;
- описание растительности;
- разработка классификационных единиц для картографирования.

В работе использованы следующие материалы космической съемки:

- для анализа пожаров – серия космических снимков среднего разрешения на период с 1984 по 2023 г. При дешифрировании процессов возгораний использовались снимки Landsat 4–5 MT (1985–1998) с разрешением 30 м/пикс; Landsat 7 (1999–2012) с разрешением 15 м/пикс; Landsat 8 (2013–2015) с разрешением 15 м/пикс и Sentinel-2 (2016–2023) с разрешением 10 м/пикс;
- для картографирования состояния растительного покрова – разносезонные снимки Sentinel-2 (2023) с разрешением 10 м/пикс; снимки сверхвысокого разрешения с разрешением 0.5 м/пикс; ортофотопланы, полученные на основе съемки БПЛА с разрешением 0.1 м/пикс.

На рис. 2 приводится принципиальная схема методики, разработанной авторами.

С помощью анализа данных NASA FIRMS, которые фиксируют даты возникновения пожаров, можно выявить все возгорания за выбранный период времени на исследуемых торфяниках. Каждый очаг пожара дешифрируется по оптическому снимку на тот момент, когда он перестает увеличиваться. Продолжительность каждого пожара определяется разницей дат “термоточек”, его

фиксирующих, или по разнице дат ближайших оптических снимков (до и после пожара) (рис. 3).

Описания растительности проводились по стандартной методике на площадках 10×10 м на открытых участках и на площадках 20×20 м на лесных участках. Всего было сделано 69 геоботанических описаний. Для оценки связи обилия видов с частотой, длительностью и временем, прошедшем после последнего пожара, использовался коэффициент корреляции Пирсона. На каждом участке проводились замеры мощности торфяной залежи, отбирались пробы торфа на анализ основных свойств и состава торфяного грунта.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ частоты пожаров. Ключевые торфяники за весь период наблюдений подвергались возгораниям с различной частотой и длительностью. Наибольшее количество пожаров отмечено на торфянике Заячий Отрог (19) и Малодубровское (12), в меньшей степени на торфянике Гладкий Мох (10). Краткая характеристика пожарной активности на участках показана в табл. 1.

Анализ торфа и растительности. На торфянике Малодубровское мощность торфяной залежи варьируется от 0.5 до 1.7 м, на наиболее часто горящих участках преимущественно верховой тип торфа с относительной влажностью от 86.3 до 87.7%. Степень разложения торфа составляет 30–50%. На торфянике Гладкий Мох мощность торфа составляет от 0.2 до 2.5 м, на наиболее часто горящих участках распространен верховой

Таблица 1. Пожарная активность на участках

Торфяник	Количество пожаров за 38 лет	Описание возгораний
Малодубровское	12	В основном после окончания торфоразработок (1990 г.). Наиболее продолжительный пожар наблюдался в июле 1999 г., до 20 дней, охватил 44% участка. Сильные пожары отмечались в августе 1996 г., в сентябре 2006 г. и в мае 1990 г. Наиболее частые пожары до 7 лет, наблюдаются в самой центральной части заброшенного торфяника. Единичные случаи возгораний наблюдаются на периферии участка
Гладкий Мох	10	В основном в южной и центральной части, где преобладают слаболесенные участки открытого торфа. Наиболее мощный пожар произошел в августе 2002 г., охватил несколько участков и длился больше месяца (21% всей площади). Также длительный пожар с середины июня до конца октября наблюдался в 2023 г. Максимальная длительность пожаров составила 82 дня, преимущественно также в западной и юго-западной части торфяника. Средняя продолжительность – около 15 дней
Заячий Отрог	19	Наиболее продолжительный пожар (около 2-х месяцев) наблюдался на всем восточном секторе (27%). Наиболее частые пожары, но менее обширные, фиксируются именно в западной части. Здесь максимальная частота составляет 5 лет, в основном это более открытые и более дренированные северные территории

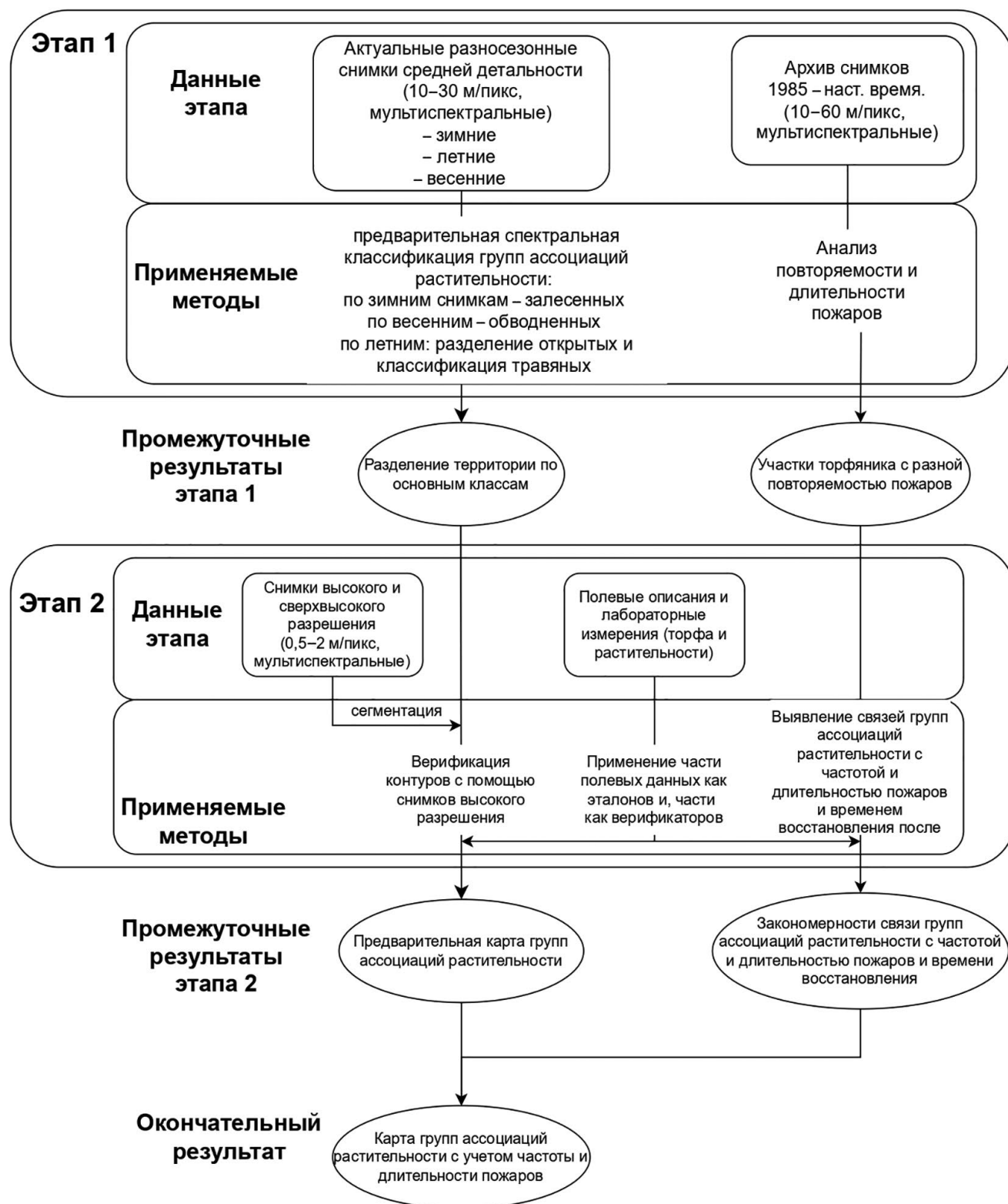


Рис. 2. Принципиальная схема методики детального индикационного картографирования торфяников.

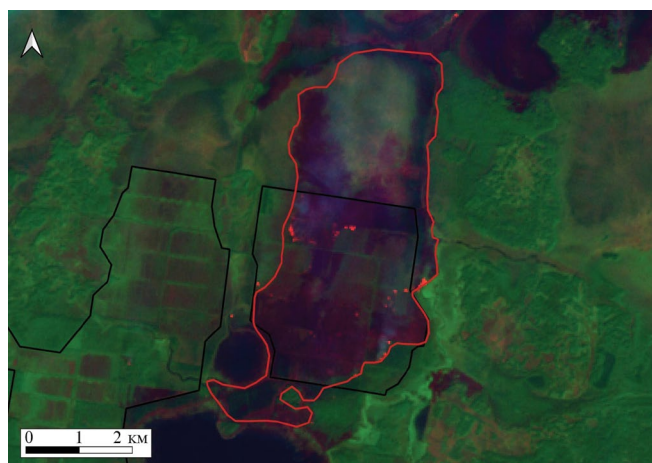


Рис. 3. Распространение пожара на торфянике Заячий Отрог, 30 августа 2002 г.

тип торфа с относительной влажностью от 85.5 до 90.0%. Степень разложения торфа составляет 50–70%. На торфянике Заячий Отрог мощность торфа от 0.8 до 2.5 м, тип торфяной залежи смешанный низинно-верховой.

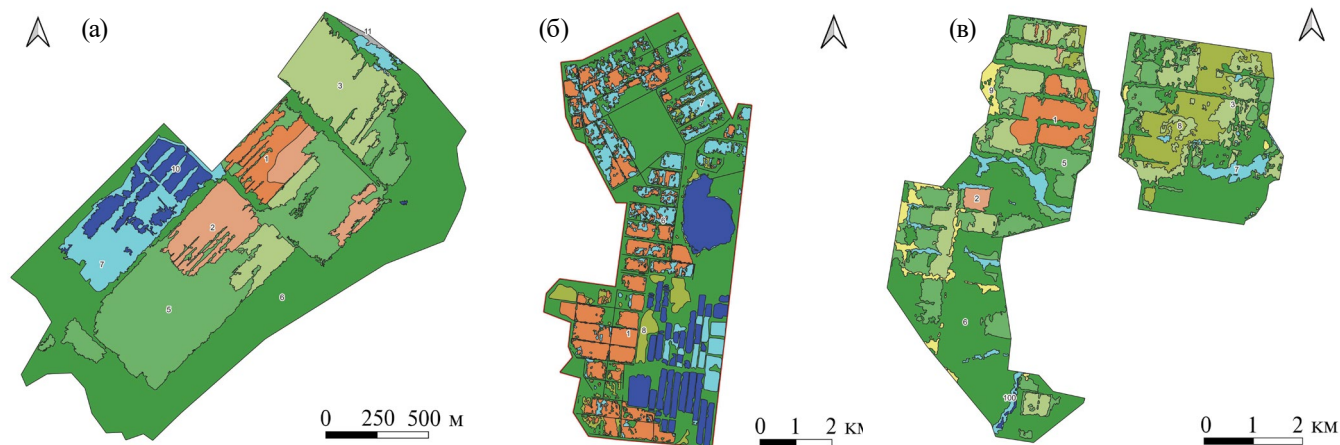
На экспертной основе были выделены следующие группы ассоциаций растительности:

- 1 – участки открытого торфа с отдельными кочками пушицы влагалищной (*Eriophorum vaginatum*), пятнами политрихума (*Politrichum strictum*);
- 2 – пушицево-политриховые сообщества;

- 3 – кустарничково (*Calluna vulgaris*)-политриховые сообщества с пушицей влагалищной;
- 4 – осоково (*Carex spp*)/тростниково (*Phragmites australis*)-политриховые сообщества;
- 5 – березовые (*Betula pubescens*), сосновые (*Pinus sylvestris*) пушицево-политриховые сообщества с кустарничками (преимущественно вереском);
- 6 – леса березовые, леса сосновые, леса березово-сосновые злаковые или зеленомошные;
- 7 – тростниковые, осоковые, очеретниковые (*Rhynchospora alba*), ивовые (*Salix spp.*) сообщества часто обоводненные;
- 8 – березовые/сосновые кустарничковые (*Ledum palustre*, *Vaccinium uliginosum*) сфагновые сообщества, частью с ковром из сфагновых мхов;
- 9 – разнотравно-злаковые сообщества (луга).

Данные группы связаны как со свойствами пожарной опасности территории, так и с возможностью картографирования по дистанционным данным. Данные дистанционного зондирования позволяют выявить лишь основные доминанты растительных сообществ. Для осушенных торфяников в большинстве случаев этого достаточно.

В результате получены карты групп ассоциаций растительности на каждый участок (рис. 4), на которых основной картографируемой единицей являются растительные сообщества ранга группа ассоциаций. Всего было выделено 9 групп ассоциаций (табл. 2). Осоково/тростниково-политриховая



Природно-территориальные комплексы:

- 1 – Участки открытого торфа с отдельными кочками пушицы влагалищной, пятнами политрихума (1)
- 2 – Пушицево-политриховые участки (2)
- 3 – Кустарничково-политриховые участки с пушицей влагалищной (3)
- 5 – Березово/сосново-пушицево-политриховые участки с кустарничками (преимущественно вереском) (5)
- 6 – Лесные сообщества с преобладанием березы и/или сосны злаковые или зеленомошные (6)
- 7 – Тростниковые, осоковые, очеретниковые участки, часто обоводненные (7)
- 8 – Березовые/сосновые кустарничковые сфагновые участки или со значительным участием сфагнума (8)
- 9 – Луговые сообщества (9)
- 10 – Вода (10)

Рис. 4. Карты групп ассоциаций растительности участков: а – Малодубровское, б – Гладкий Мох, в – Заячий Отрог.

Таблица 2. Площади групп ассоциаций растительности

Группа	Название	Площадь, га	% от общей площади	Средняя частота пожаров
Малодубровское				
1	Участки открытого торфа с отдельными кочками пушицы влагалищной и пятнами политрихума	7.03	3.08	0.1
2	Пушицево-политриховые участки	16.19	7.09	0.13
3	Кустарничково-политриховые участки с пушицей влагалищной	25.93	11.36	0.08
5	Березово/сосново-пушицево-политриховые участки с кустарничками (преимущественно вереском)	58.03	25.42	0.11
6	Лесные сообщества с преобладанием березы и/или сосны злаковые или зеленомошные	94.00	41.18	0.001
7	Тростниковые, осоковые, очеретниковые участки, часто обводненные	17.37	7.61	0.05
Общая площадь			228.271	
Гладкий Мох				
1	Участки открытого торфа с отдельными кочками пушицы влагалищной и пятнами политрихума	784.63	17.44	0.1
6	Лесные сообщества с преобладанием березы и/или сосны злаковые или зеленомошные	2109.42	46.90	0.001
7	Тростниковые, осоковые, очеретниковые участки, часто обводненные	736.33	16.37	0.05
8	Березовые/сосновые кустарничковые сфагновые участки или со значительным участием сфагнума	243.98	5.42	0.03
Общая площадь			4498.087	
Заячий Отрог				
1	Участки открытого торфа с отдельными кочками пушицы влагалищной и пятнами политрихума	143.76	4.60	0.1
2	Пушицево-политриховые участки	24.35	0.78	0.13
3	Кустарничково-политриховые участки с пушицей влагалищной	481.07	15.41	0.08
5	Березово/сосново-пушицево-политриховые участки с кустарничками (преимущественно вереском)	520.22	16.66	0.11
6	Лесные сообщества с преобладанием березы и/или сосны злаковые или зеленомошные	1239.67	39.70	0.001
7	Тростниковые, осоковые, очеретниковые участки, часто обводненные	125.63	4.02	0.05
8	Березовые/сосновые кустарничковые сфагновые участки или со значительным участием сфагнума	267.80	8.58	0.03
9	Луговые сообщества	87.00	2.79	0.53
Общая площадь			3122.483	

группа ассоциаций растительности (под номером 4) не выделялась на картах при данном масштабе, так как занимает незначительные площади, но была встречена при описании растительного покрова осушенных торфяников.

Исходя из анализа площадей растительных сообществ и средней частоты пожаров, можно сделать вывод, что наиболее пожароопасным участком является Малодубровское, так как наиболее часто горящие сообщества, такие как пушицево-политриховые с частотой 0.13, березово/сосново-пушицево-политриховые участки с кустарничками (преимущественно вереском) с частотой 0.11 занимают 7.1 и 25% от общей площади соответственно, что гораздо больше, чем на других участках.

Корреляционный анализ обилия видов болотных сообществ и характеристик пожаров показал, что с частотой пожаров значимую положительную корреляцию обнаруживает обилие пушицы влагилистной и политрихума сжатого, а значимую отрицательную — обилие видов кустарничков.

Проведенный анализ зависимости параметров пожаров (частота, длительность, время восстановления после даты последнего пожара) с группами ассоциаций растительности в целом показал слабую взаимосвязь (рис. 5).

По полученным данным индикации частоты пожаров с группами ассоциаций растительности были составлены карты частоты пожаров групп растительных сообществ на каждый участок. Частота пожаров в пределах каждого сообщества рассчитывалась в долях от всего периода наблюдений — 38 лет (табл. 3).

Из анализа табл. 3 можно сделать вывод, что выделенные группы ассоциаций растительности связаны с параметрами прошедших пожаров следующим образом:

1 — участки открытого торфа с отдельными кочками пушицы влагилистной, пятнами политрихума, возникающие после пожаров и сохраняющиеся в таком состоянии до 5 лет;

2 — пушицево-политриховые участки возникают при частых пожарах; длительность их существования после пожара до 12 лет;

3 — кустарничково-политриховые участки с пушицей влагилистной возникают в условиях более редких пожаров, но могут оставаться довольно долго в таком состоянии;

4 — осоково/тростниково-политриховые участки возникают в условиях редких пожаров;

5 — березовые/сосновые пушицево-политриховые участки с кустарничками (преимущественно вереском) также возникают в условиях частых пожаров;

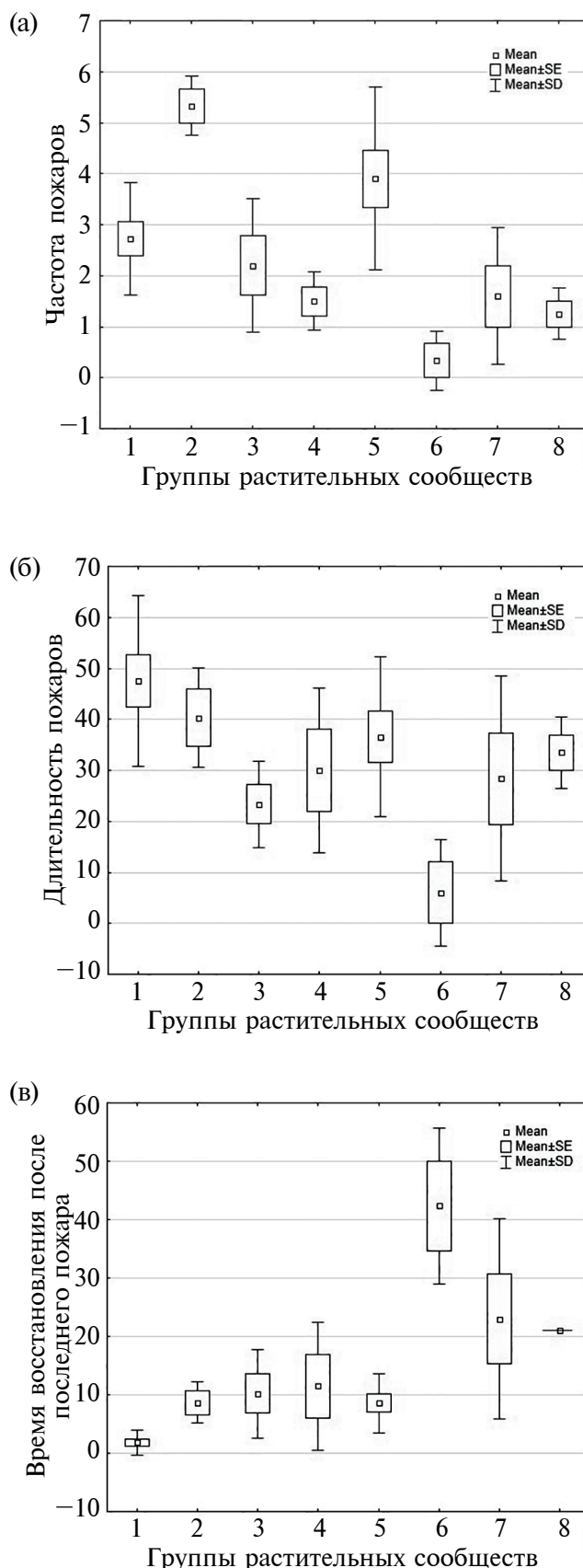


Рис. 5. Графики корреляций растительных сообществ с: а — частотой пожаров, б — длительностью пожаров, в — временем после последнего пожара.

- 6 – лесные сообщества с преобладанием березы и/или сосны злаковые или зеленомошные характерных для участков, на которых пожары редки и были давно;
- 7 – тростниковые, осоковые, очеретниковые, ивовые участки, часто обводненные характерные для участков с редкими пожарами;
- 8 – березовые/сосновые кустарничковые сфагновые участки или со значительным участием сфагнума возникают в условиях редких пожаров;

9 – луговые участки поддерживаются в таком состоянии при очень частых (вплоть до ежегодных пожаров).

Таким образом, лесные участки горят достаточно редко, как и сильно обводненные тростниковые и сфагновые. Участки открытого торфа с отдельными кочками пушицы или частично занятые политриховыми мхами горят чаще всего.

Соответственно, можно сделать вывод – если на территории представлены торфяные пустоши с редким березовым древостоем, кочками

Таблица 3. Связь групп ассоциаций растительности с параметрами прошедших пожаров

№	Группы ассоциаций растительности	Средняя частота пожаров	Средняя длительность пожаров (дни)	Среднее время, прошедшее после последнего пожара (год)
1	Участки открытого торфа с отдельными кочками пушицы влагищной, пятнами политрихума	0.1	40	2
2	Пушицево-политриховые участки	0.13	40	9
3	Кустарничково-политриховые участки с пушицей влагищной	0.08	25	12
4	Осоково/тростниково-политриховые	0.05	30	12
5	Березовые/сосновые пушицево-политриховые участки с кустарничками (преимущественно вереском)	0.11	37	9
6	Лесные сообщества с преобладанием березы и/или сосны злаковые или зеленомошные	0.001	6	>40
7	Тростниковые, осоковые, очеретниковые, ивовые участки, часто обводненные	0.05	28	23
8	Березовые/сосновые кустарничковые сфагновые участки или со значительным участием сфагнума	0.03	34	21
9	Луговые участки	0.53	30	1

Таблица 4. Процент площади ключевых торфяников с различной частотой пожаров, оцененной с помощью метода индикации

Характерная частота пожаров	Ключевые торфяники		
	Малодубровское	Гладкий Мох	Заячий Отрог
	% от общей площади		
пожары не встречаются	13.35	32.04	43.35
один раз в 30 лет	47.33	60.72	33.26
один раз в 15 лет	7.06	6.03	11.88
один раз в 10 лет	5.39	0.74	6.79
один раз в 7 лет	14.98	0.47	4.64
один раз в 6 лет	2.40	—	0.08
один раз в 5 лет	9.49	—	—

пушицы, то пожар на этих территориях происходит не менее чем один раз в 5 лет. Если на торфянике произрастают сообщества со сфагновым моховым ярусом или он залит слоем воды, поверх которого поднимаются густые заросли тростника, то пожар на этих территориях происходит не чаще чем один раз в 20 лет.

Приведенные выше сообщества в целом можно выстроить в сукцессионные ряды. Однако эти ряды будут индивидуальные для каждого торфяного массива, так как пожары, имеющие разную длительность и частоту, приводят к разнообразным изменениям экотопов, а, следовательно, и растительных сообществ. В качестве примера можно представить сукцессионный ряд на торфяном массиве Малодубровское:

1 – участки открытого торфа – пушицево-политриховые участки – березовые/сосновые пушицево-политриховые участки с кустарничками;

2 – участки открытого торфа – кустарничково-политриховые участки – березовые/сосновые пушицево-политриховые участки с кустарничками.

Первые возникают при длительных пожарах, вторые – в условиях менее длительных пожаров.

В соответствии с разработанной методикой, для выделенных групп ассоциаций растительности были построены карты частоты пожаров для ключевых торфяников (рис. 6). Разработанная методика позволяет проводить суммарную оценку торфяников по частоте пожаров, полученную с помощью методов индикации.

В табл. 4 приведена частота пожаров, характерная для разных участков ключевых торфяников. Из анализа данных, представленных в табл. 4, можно сделать вывод, что торфяник Малодубровское имеет наименьший процент площади, подверженной пожарам. Также он имеет около 27% площади, которые горят раз в 10 лет и чаще. Для торфяников Гладкий Мох и Заячий Отрог можно выделить от 50 до 70% площади, которые горят с частотой раз в 20–30 лет. Однако на этих торфяниках также есть участки, которые горят раз в 10 лет и чаще.

Можно ожидать, что при условии, что характер использования торфяников не изменится, то частота пожаров для этих торфяников останется такой же, как за предыдущие 30 лет наблюдений. Соответственно, частота пожаров является показателем их пожароопасности.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты корреляции групп ассоциаций растительности с показателями возгораний показали, что в целом разработанная методика может эффективно применяться в дальнейших исследованиях по прогнозу и оценке пожароопасности, однако требуется дальнейшее



Рис. 6. Карты частоты пожаров (в долях) за весь период наблюдений: а – Малодубровское, б – Гладкий Мох, в – Заячий Отрог.

ее развитие и более полное изучение взаимосвязей частоты пожаров на осушенных торфяниках с преобладающими на них типами растительных сообществ. Одними из важнейших показателей, влияющих на частоту возгораний, являются свойства и состав торфяных грунтов, что подробно описано в работе А.И. Филькова [22]. Повышенная возгораемость торфа обусловлена его пористой структурой, малой плотностью и наличием в составе кислорода до 40%. Степень пожароопасности зависит от ботанического состава торфа, степени его разложения и влажности. На исследуемых участках средняя влажность торфа варьируется в диапазоне от 80 до 90%, что является достаточно высоким показателем, и, казалось бы, должно снижать вероятность возгорания. Однако в работе С.Н. Грицкова и Г.Н. Исакова [4] говорится, что пористость влажного торфа приводит к фильтрационному режиму горения, влажность может сыграть положительную роль в процессе газификации, так как нагретые частицы углерода при взаимодействии с водяным паром выделяют водород и углекислый газ. На частоту самовозгораний также влияет вид и тип торфа. Так, например, верховой пушицевый торф имеет опасную степень самовозгорания [6], что в целом совпадает с полученными данными.

Также важными показателями пожароопасности являются теплофизические свойства торфа, на их основе строятся математические модели, описывающие процессы возгорания и горения торфа, они могут быть применены к оценке пожароопасности [8].

Н.П. Ахметьева [2] отмечает, что восстановление растительности одного из ключевых проанализированных торфяников после пожара происходило интенсивно, особенно в первые 2–3 года; через 5 лет сформировалось березово-ивово-пушицевое сообщество с участием ольхи и осины; на другом ключевом участке интенсивность зарастания ниже, с незначительным обилием отмечается сосна. В целом этот вывод соотносится с нашими результатами.

Стоит отметить, что существует классификация природной пожарной опасности лесов, утвержденная Федеральным агентством лесного хозяйства [19]. В основе классификации лежат типы лесов, оцененные по степени их пожарной опасности от I (высокая опасность — хвойные молодняки, места сплошных рубок по суходолам, сосняки лишайниковые и вересковые, сильно поврежденные древостои, сухостои) до V (опасность отсутствует — ельники, березняки, осинники, долгомошники, ольшаники). Данные классы пожароопасности частично применимы к оценке нарушенных торфяников, так как на таких участках встречаются лесные сообщества.

Однако процесс горения торфа очень специфичен, в первую очередь потому, что торф может

гореть долгое время в условиях отсутствия кислорода. По мнению авторов должна быть разработана универсальная классификация природной пожарной опасности нарушенных торфяников, которой в настоящее время не существует.

ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования разработан методический подход, позволяющий с помощью анализа данных дистанционного зондирования оценивать частоту пожаров на торфяниках и проводить их картирование.

Характер распространения пожара, его тип и вероятность можно оценить с помощью физических факторов, в том числе измеренных параметров торфяного грунта. Однако проведение таких измерений достаточно трудоемко, поэтому использование геоиндикационных подходов является перспективным решением.

Показано, что индикационные взаимосвязи между частотой пожаров и состоянием растительного покрова достаточно сильны, соответственно, можно использовать тип растительного покрова как индикатор частоты пожаров на торфянике.

Можно сделать вывод, что если на территории представлены торфяные пустоши с редким березовым древостоем, кочками пушицы, то пожар на этих территориях происходит не менее чем один раз в 5 лет. Если на территории представлены сфагновые и/или тростниковые обводненные ассоциации, то пожар на них происходит не чаще чем один раз в 20 лет.

Проведена апробация разработанной методики для ключевых торфяников. В результате апробации было показано, что торфяник Малодубровское имеет около 27% площади, которые горят раз в 10 лет и чаще. Для торфяников Гладкий Мох и Заячий Отрог можно выделить от 5 до 70% площади, которые горят с частотой раз в 20–30 лет. Однако на этих торфяниках также есть участки, которые горят раз в 10 лет и чаще.

Публикация осуществлена при финансовой поддержке Всероссийской общественной организации “Русское географическое общество”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахметьева Н.П., Лапина Е.Е., Кудряшова В.В. Влажность торфа и возникновение пожаров на болотах // Мелиорация и природная среда. 2014. № 3. С. 26–29.
2. Ахметьева Н.П., Михайлова А.В., Федорова Л.П. Восстановление растительного покрова на начальной стадии зарастания гарей на выработанных торфяниках // Лесоведение. 2018. № 2. С. 119–129.
3. Вомперский С.Э., Глухова Т.В., Смагина М.В., Ковалев А.Г. Условия и последствия пожаров в сосняках на осушенных болотах // Лесоведение. 2007. № 6. С. 35–44.

4. Грицков С.Н., Исаков Г.Н. Моделирование и мониторинг ландшафтных торфяных пожаров // *Вестник кибернетики*. 2018. № 2. С. 175–182.
5. Гришин А.М. О математическом моделировании торфяных пожаров // *Вестник Томского государственного университета*. Сер. Математика и Механика. 2008. № 3(4) С. 85–94.
6. Евграфов А.В. Мониторинг уровня грунтовых вод с целью предупреждения лесоторфяных пожаров // *Природообустройство*. 2012. № 1. С 19–22.
7. Ильясов Д., Сиринов А., Макарова Л. и др. ГИС-картографирование торфяных болот и антропогенно измененных торфяников Рязанской области // *Вестник РГА-ТУ*. 2019. № 1 (41). С. 30–38.
8. Кулеш Р.Н., Субботин А.Н. Математическое моделирование тепломассопереноса при воспламенении торфа // *Известия Томского политехнического университета*. Инжиниринг георесурсов. 2013. Т. 323. № 4. С. 85–90.
9. Маслов А.А., Гульбе Я.И., Макаров Д.А., Сиринов А.А. Восстановление допожарных характеристик лесных насаждений на гари по данным космической съемки и полевых наблюдений // *Лесохозяйственная информация*. 2017. № 4. С. 73–83.
10. Маслов Б.С. Вопросы истории мелиорации торфяных болот и развитие науки // *Вестник ТГПУ*. 2008. Выпуск 4 (78). С. 64–69.
11. Медведева М.А., Возбранная А.Е., Барталев С.А., Сиринов А.А. Оценка состояния заброшенных торфоразработок по многоспектральным спутниковым изображениям // *Исследование земли из космоса*. 2011. № 5. С. 80–88.
12. Минаева Т.Ю., Сиринов А.А. Биологическое разнообразие болот и изменение климата // *Успехи современной биологии*. 2011. Т. 131. № 4. С. 393–406.
13. Орлов Т.В., Шахматов К.Л. Анализ эффективности работ по вторичному обводнению торфяников Тверской области с помощью данных дистанционного зондирования // *Геоэкология*. 2020. № 6. С. 74–82.
14. Панов В.В. Восстановление торфяных болот: учеб. пос. Томск: Издательство Томского государственного педагогического университета, 2006. 70 с.
15. Панов В.В. Восстановление торфяных болот: учеб. курс. Тверь-Москва: Изд-во “Триада”, 2021. 184 с.
16. Панов В.В. О роли гидростатики в развитии торфяного болота // *Труды Инсторфа*, 2011. № 3 (56).
17. Панов В.В. Перспективное использование выработанных торфяных болот. Тверь: Изд-во “Триада”, 2013. 218 с.
18. Панов В.В., Цымлякова С.С. Пространственная структура пожаров и гари на техногенно нарушенных торфяных болотах // *Известия РГО*. 2013. Т. 145. Вып. 1. С. 80–90.
19. Приказ об утверждении классификации природной пожарной опасности лесов и классификации пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды от 5 июля 2011 года № 287.
URL: <https://docs.cntd.ru/document/902289183>.
20. Сонюшкин А.В., Шумилин А.В., Кучейко А.А. Спутниковый мониторинг пожаров в России летом 2010 г. // *Земля из космоса – наиболее эффективные решения*. 2010. № 7. С. 56–59.
21. Субботин А.Н. Распространение торфяного пожара при разных условиях тепломассообмена с внешней средой // *Пожаровзрывобезопасность*. 2007. Т. 16. № 5. С. 42–49.
22. Фильков А.И. Физико-математическое моделирование возникновения природных пожаров. Томск: Издательский Дом ТГУ, 2014. 276 с.
23. Atwood E.C., Enghart S., Lorenz E., et al. Detection and Characterization of Low Temperature Peat Fires during the 2015 Fire Catastrophe in Indonesia Using a New High-Sensitivity Fire Monitoring Satellite Sensor (FireBird). 2016. PLoS ONE11(8): e0159410.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159410>
24. Krishna Prasad Vadrevu, Eaturu Anuradha, K.V.S. Badarinath. Fire risk evaluation using multicriteria analysis – a case study // *Environ Monit Assess*. 2010. 166:223–239.
<https://doi.org/10.1007/s10661-009-0997-3>
25. Sheriza M. Razali, Ahamad Ainuddin Nuruddin, Ismail A. Malek, Norizan A. Patah. Forest fire hazard rating assessment in peat swamp forest using Landsat thematic mapper image // *J. of Applied Remote Sensing*. 2010. V. 4. 043531. 1–7 p.
<https://doi.org/10.1117/1.3430040>
26. Tansey K., Beston J., Hoschilo A. et al. Relationship between MODIS fire hot spot count and burned area in a degraded tropical peat swamp forest in Central Kalimantan, Indonesia // *Journal of geophysical research*. V. 113. D23112. 1–8 p.
<https://doi.org/10.1029/2008JD010717>. 2008.
27. Turetsky M.R., Amiro B.D., Bosch E., Bhattachi J.S. Historical burn area in western Canadian peatlands and its relationship to fire weather indices // *Global biogeochemical cycles*. 2004. V. 18. GB4014.
<https://doi.org/10.1029/2004GB002222>
28. Wilkinson S.L., Verkaik G.J., Moore P.A., Waddington J.M. Threshold peat burn severity breaks evaporation-limiting feedback // *Ecohydrology*. 2019. 13(1): e2168. <https://doi.org/10.1002/eco.2168>
29. Xinyan Huang A., Guillermo Rein. Computational study of critical moisture and depth of burn in peat fires // *International Journal of Wildland Fire*. 2015. 24. P. 798–808.

GEOBOTANICAL INDICATION OF THE DRAINED STATE OF DISTURBED PEATLANDS FOR FIRE HAZARD ASSESSMENT

T. V. Orlov^{1, #}, M. V. Arkhipova¹, V. V. Bondar¹, R. O. Razumovsky¹,
V. A. Smagin², K. L. Shakhmatov³

¹*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
Ulansky per. 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia*

²*Komarov Botanical Institute, Russian Academy of Sciences,
ul. Professora Popova 2, St. Petersburg, 197376 Russia*

³*Tver State Technical University, ul. Zhelyabova 33, Tver, 170100 Russia*

[#]*E-mail: tim.orlov@gmail.com*

The issue of fire hazard in abandoned peatlands is particularly relevant nowadays, as the negative consequences of peatland fires lead to deterioration in public health and the functioning of the entire infrastructure system. The problem of predicting and assessing peat burning is a global one, with numerous studies being conducted not only in Russia but also abroad, i.e., in CIS countries, Southeast Asia, Canada, and the United States. However, the relationship between vegetation communities and the frequency of fires receives insufficient attention. The study is devoted to assessing the condition of degraded peatlands using geobotanical indicators of peat soils on the example of peatlands in Leningrad and Pskov regions. Three key objects were selected, which represent abandoned peat deposits. The methodology for assessing the fire hazard of peatlands is based on a comprehensive approach, including the creation of large-scale vegetation maps using a series of satellite images and field geobotanical descriptions, and the analysis of fires on objects for the period from 2000 to 2023 using satellite images and thermal data. As a result of the study, maps of fire frequency and duration and maps of natural-territorial complexes for each plot were obtained. The analysis of the relationship between vegetation communities and the frequency of fires showed that the species composition of the communities correlates relatively well with the time elapsed since the date of the last fire, and to a lesser extent with the duration of the fires. Indicative relationships between fire frequency and vegetation cover are quite strong, so the type of vegetation cover can be used as an indicator of fire frequency on a peatland. On territories with peat bogs with a sparse birch forest, fire occurs at least once every 5 years. On territories with sphagnum associations and reed swamp associations, fire occurs no more than once every 20 years.

Keywords: fire hazard, peatlands, geobotanical indicators, North-Western federal district

REFERENCES

- Akhmetyeva, N.P., Lapina, E.E., Kudryashova, V.V. [Peat moisture and the consequences of fires in swamps]. *Melioratsiya i prirodnaya sreda*, 2014, no. 3, pp. 26–29. (in Russian)
- Akhmetyeva, N. P. Mikhailova, A.V., Fedorova, L.P. [Restoration of vegetation cover at the initial stage of overgrowth of burnt areas on exhausted peatlands]. *Lesovedenie*, 2018, no. 2, pp. 119–129. (in Russian)
- Vompersky, S.E., Glukhova, T.V., Smagina, M.V., Kovalev, A.G. [Conditions and consequences of peatland fires in drained bogs]. *Lesovedenie*, 2007, no.6, pp. 35–44. (in Russian)
- Gritskov, S.N., Isakov, G.N. [Modeling and monitoring of landscape peatland fires]. *Vestnik kibernetiki*, 2018, no. 2, pp. 175–182. (in Russian)
- Grishin, A.M. [Mathematical modeling of peatland fires]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Matematika i mekhanika*, 2008, no 3(4), pp. 85–94. (in Russian)
- Evgrafov, A.V. [Monitoring of groundwater levels for the prevention of forest peatland fires]. *Prirodoobustroystvo*, 2012, no. 1, pp. 19–22. (in Russian)
- Il'yasov, D, Sirin, A., Makarova, L., Bukin, A., Korablina, N. [GIS mapping of peat bogs and anthropogenically modified peatlands in the Ryazan region]. *Vestnik RGATU*, 2019, no. 1 (41), pp. 30–38. (in Russian)
- Kulesh, R.N., Subbotin, A.N. [Mathematical modeling of heat and mass transfer during peat ignition] *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2013, vol. 323, no. 4, pp. 85–90. (in Russian)
- Maslov, B.S. [Questions of the history of peat bog reclamation and the development of science]. *Vestnik TGPU*, 2008, issue 4 (78), pp. 64–69. (in Russian)
- Maslov, A.A., Gul'be, Ya. I., Makarov, D.A., Sirin, A. A. [Restoration of pre-fire characteristics of forest plantations in burnt areas according to satellite imagery and field observations]. *Lesokhozyaistvennaya informatsiya*, 2017, no. 4, pp. 73–83. (in Russian)
- Medvedeva, M.A., Vozbrannaya, A.E., Bartalev, S.A., Sirin, A.A. [Assessment of the condition of abandoned peat mines using multispectral satellite images]. *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, no. 5, pp. 80–88. (in Russian)
- Minaeva, T. Yu., Sirin, A.A. [Biological diversity of swamps and climate change]. *Uspekhi sovremennoi biologii*, 2011, vol. 131, no. 4. pp. 393–406. (in Russian)
- Orlov, T.V., Shakhmatov, K.L. [Analysis of the effectiveness of work on secondary watering of peatlands in the Tver region using remote sensing data]. *Geoekologiya*. 2020, no. 6, pp. 74–82. (in Russian)
- Panov, V.V. [Restoration of peat bogs: Textbook]. Tomsk, Tomsk State Pedagogical University Publ., 2006, 70 p. (in Russian)
- Panov, V.V. [Restoration of peat bogs: training course]. Tver-Moscow, Triada Publ., 2021, 184 p. (in Russian)
- Panov, V.V. [On the role of hydrostatics in the development of a peat bog]. *Trudy Instorfa*, 2011, no. 3 (56). (in Russian)
- Panov, V.V. [Prospective use of exhausted peat bogs]. Tver, Triada Publ., 2013, 218 p. (in Russian)
- Panov, V.V., Tsymlyakova, S.S. [Spatial structure of fires and burning in technologically disturbed peat bogs]. *Izvestiya RGO*, 2013, vol. 145, no. 1, p. 80–90. (in Russian)

19. [Order on approval of the classification of wildfire hazard in forests and the classification of fire hazard in forests depending on weather conditions dated July 5, 2011, no. 287]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902289183>.
20. Sonyushkin, A.V., Shumilin, A.V., Kucheiko, A.A. [Satellite monitoring of fires in Russia in the summer of 2010]. *Zemlya iz kosmosa – naibolee effektivnye resheniya*, 2010, no. 7, pp. 56–59. (in Russian)
21. Subbotin, A.N. [Propagation of a peat fire under different conditions of heat and mass exchange with the external environment]. *Pozharovzryvobezopasnost'*, 2007, vol. 16, no. 5, pp. 42–49. (in Russian)
22. Fil'kov, A.I. [Physico-mathematical modeling of the occurrence of natural fires]. Tomsk, TGU Publ., 2014, 276 p. (in Russian)
23. Atwood, E.C., Enghart, S., Lorenz, E., Halle, W., Wiedemann, W., Siegert, F. Detection and characterization of low temperature peat fires during the 2015 fire catastrophe in Indonesia using a new high-sensitivity fire monitoring satellite sensor (FireBird), 2016, PLoS ONE 11(8): e0159410. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159410>
24. Krishna Prasad Vadrevu, Eaturu Anuradha, K.V.S. Badarinath. Fire risk evaluation using multicriteria analysis—acasestudy. *Environ Monit Assess.*, 2010, 166:223–239. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0997-3>
25. Sheriza, M. Razali, A. Ainuddin Nuruddin Ismail A. Malek, Norizan A. Patah. Forest fire hazard rating assessment in peat swamp forest using Landsat thematic mapper image. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2010, vol. 4, 043531. 1–7 p.
26. Tansey, K., J. Beston, A. Hoscolo, S.E. Page, and C.U. Paredes Herna'ndez. Relationship between MODIS fire hot spot count and burned area in a degraded tropical peat swamp forest in Central Kalimantan, Indonesia. *Journal of geophysical research*, 2008, vol. 113, pp. 1–8 p. D23112. <https://doi.org/10.1029/2008JD010717>.
27. Turetsky, M.R., Amiro, B.D., Bosch, E. and Bhatti, J.S. Historical burn area in western Canadian peatlands and its relationship to fire weather indices. *Global biogeochemical cycles*, 2004, vol. 18. GB4014. <https://doi.org/10.1029/2004GB002222>
28. Wilkinson, S.L., Verkaik, G.J., Moore, P.A., Waddington, J.M. Threshold peat burn severity breaks evaporation-limiting feedback. *Ecohydrology*, 2019, no. 13(1): e2168. <https://doi.org/10.1002/eco.2168>
29. Xinyan Huang A., Guillermo Rein. Computational study of critical moisture and depth of burn in peat fires. *International Journal of Wildland Fire*, 2015, no. 24, pp. 798–808. <https://doi.org/10.1071/WF14178>

ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

УДК 624.131.1;631.482;551.8

ПРИЧИНЫ УНАСЛЕДОВАННОСТИ СОСТАВА И СВОЙСТВ КРАСНОЦВЕТНЫХ ГРУНТОВ СОВРЕМЕННОЙ КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ В ПРЕДЕЛАХ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ СЫЧУАНЬСКОЙ ВПАДИНЫ КИТАЯ

© 2024 г. И. Пэн^{1,*}, И. Ю. Григорьева^{1,**}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии; Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

*E-mail: 354151007pyz@gmail.com,

**E-mail: ikagrig@inbox.ru

Поступила в редакцию 13.11.2023 г.

После доработки 30.11.2023 г.

Принята в печать 25.03.2024 г.

В работе на примере западной части Сычуаньской впадины Китая экспериментально оценены и проанализированы особенности состава и свойств красноцветных пород из четырех типичных осадочных толщ мелового и юрского периодов и продуктов их выветривания. Рассчитаны геохимические показатели выветривания (The Chemical Index of Alteration; CIA_{corr}); сделаны выводы о направленности процессов выветривания и причинно-следственной связи между составом и свойствами материнских пород и превышении содержания химических элементов в выветрелых грунтах. Результаты показали, что образцы выветрелых (дисперсных) грунтов довольно схожи с материнскими породами по таким характеристикам, как: цвет, плотность твердого компонента, содержание органического углерода, гранулометрический состав, pH, минеральный состав и содержание основных химических элементов. Результаты расчета CIA_{corr} и анализ треугольных диаграмм A–CN–K показали, что все образцы выветрелых грунтов и материнских пород имеют схожий индекс и характеристики химического выветривания. Кроме того, можно утверждать, что все они достигли умеренной интенсивности химического выветривания, причем интенсивность выветривания образцов из пород мелового возраста (K_1c) значительно выше, чем у образцов, отобранных из пород юрского возраста (J_3p , J_3s , J_2s). Красноцветные породы при выходе на поверхность подвергаются быстрой физической дезинтеграции, а их химическое преобразование слабо выражено. Причиной подобной направленности процесса выветривания является однородная текстура, существенно глинистый состав материнской породы, легко разрушающейся в условиях повышенной влажности и обилия тепла. Незначительное химическое выветривание обусловлено тем, что сама материнская порода в процессе осадконакопления и последующего диагенеза претерпела заметное изменение химического состава и приобрела высокую степень устойчивости к последующему преобразованию в современных условиях. Таким образом, материнские породы в значительной степени определяют состав и свойства красно-желтых ферралитных грунтов.

Ключевые слова: Сычуаньская впадина, красноцветные материнские породы, красно-желтый ферралитный грунт, химический индекс выветривания (CIA)

DOI: 10.31857/S0869780924030057 EDN: SPQXSV

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях одним из ключевых требований является оценка экологического состояния территории, в пределах которой осуществляется или планируется тот или иной вид хозяйственной деятельности. Наиболее распространенным методом оценки является геохимический анализ состава депонирующих сред. Наиболее часто в практике исследований проводится анализ природных вод, донных осадков и почв. Последние, как известно, формируются из горных пород в результате выветривания и развития

процессов почвообразования. С позиций грунтоведения почвы, являясь грунтами, представляют собой современную кору выветривания материнских горных пород. Во многом состав, строение и свойства материнской породы будут определять состав, физические и физико-химические свойства грунтов коры выветривания (современных почв). В то же время химические свойства почвы, как правило, отличаются от свойств материнской породы из-за ряда воздействий, происходящих в процессе химического выветривания и диагенеза породы [4].

В пределах Сычуаньской впадины (Китай) широко распространены материнские горные породы, имеющие характерный красный цвет. Они представлены юрскими и меловыми озерно-болотными и аллювиальными осадочными породами. Источником осадочного материала для этих пород являлись в основном древние коры выветривания, состоящие из коллоидного или мелкозернистого материала, представляющего собой палеопочвы [40]. В последующем в ходе осадконакопления палеопочвы были преобразованы под высоким давлением в осадочные породы и цементированы глинистым, кремнистым, железистым и известковым цементом с образованием характерных красноцветных пород, однородных по текстуре и химическому составу. На крутых склонах Сычуаньской впадины в условиях высокой температуры и влажности воздуха в летний период в этих породах широко развивается склоновая эрозия [16].

В условиях современного климата в пределах рассматриваемого региона в результате быстрого выветривания красноцветных пород формируются так называемые красно-желтые субтропические лесные почвы. Эти почвы достаточно широко распространены преимущественно в юго-западной части Сычуаньской впадины. В России этот тип почв известен как желтоземы и красноземы влажных субтропических лесов [1]. Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций (ФАО) относит подобный тип почв к категории “Regosol” [10], а министерство сельского хозяйства США (USDA) – к категории “Entisols” [29]. Согласно классификации Китайского национального института стандартизации [6], этот вид почв получил название “Purple soils”. Красно-желтые почвы богаты питательными веществами (особенно фосфором и калием) и считаются “кладом питательных веществ” [15]. В сочетании с высоким уровнем содержания минеральных форм калия [13], красно-желтые субтропические лесные почвы имеют высокую сельскохозяйственную ценность. При этом они подвержены высокому риску подкисления из-за большого содержания глинистых минералов и низкого содержания оксидов Fe/Al [20]. Кроме того, красно-желтые субтропические лесные почвы структурно неустойчивы, из-за чего они сильно подвержены эрозии и потере фосфора [14].

При оценке существующего или допустимого уровня антропогенного воздействия в пределах рассматриваемого региона необходимо иметь четкое представление об особенностях происхождения красно-желтых ферралитных грунтов, а также основных характеристиках их состава и свойств. Подобные оценки делаются, прежде всего, в целях поддержания плодородия почв, формирующихся на этих породах, и обеспечения устойчивого развития сельского хозяйства. Исследованиям в этой

области посвящены многие работы [13–15, 20]. Тем не менее некоторые аспекты в их изучении до сих пор являются дискуссионными либо недостаточно исследованными.

Данная работа посвящена исследованию основных показателей состава и свойств, а также особенностей выветривания красноцветных меловых (K_1c) и юрских (J_3p , J_3s , J_2s) осадочных пород и образующихся в процессе их выветривания современных красно-желтых ферралитных грунтов, залегающих в пределах Сычуаньской впадины.

Цель работы – проанализировать связь между составом и свойствами материнских пород и выветрелых грунтов и выявить причины их унаследованности в процессе выветривания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследования. Сычуанская впадина расположена в южной и центральной частях Азиатского континента ($30^{\circ}30'$ с.ш., $105^{\circ}30'$ в.д.), на западной окраине плиты Янцзы, в области верхнего течения р. Янцзы. Бассейн р. Янцзы – один из четырех крупных бассейнов Китая, простирается на 1000 км с востока на запад и на 500 км с севера на юг, его общая площадь составляет 1.8×10^5 км². Климат здесь субтропический муссонный, с выпадением обильных дождей и высокими температурами воздуха. Причем высокие температуры и основная часть осадков приходятся на период с июня по сентябрь, а среднегодовая температура и количество осадков составляют 14–19°C и 1000–2000 мм соответственно. В бассейне широко распространены мезозойские триасовые, юрские и меловые красноцветные породы, которые обнажаются на поверхности и имеют явные следы выветривания с образованием красно-желтых субтропических лесных почв. В данном исследовании основное внимание уделяется нижнемеловому осадочному слою K_1c (формация Канси), верхнеюрскому осадочному слою J_3p (формация Пэнлайчжэнь), J_3s (формация Суйнинга) и среднеюрскому осадочному слою J_2s (формация Шаксимяо). Слой выветрелого дисперсного грунта, как правило, маломощный, обычно не более 1.2 м. За счет интенсивной эрозии под действием текучих вод выветрелый слой быстро обновляется, т.е. почвы находятся на ранних стадиях своего формирования.

Отбор проб. Районы для опробования красноцветных пород и продуктов их выветривания в пределах Сычуаньской впадины были выбраны на основе геологической карты Китая масштаба 1 : 200 000 [28], карты распространения типов почв в Китае [11], а также исходя из характерных визуальных признаков данных пород (цвета, текстуры). Проведено предварительное обследование и скрининг районов распространения исследуемых пород по данным Google Earth. Исключены



Рис. 1. Морфология анализируемых образцов: нижнемеловых K_{1c} (формация Канси), верхнеюрских J_{3p} (формация Пэнлайчжэнь), J_{3s} (формация Суйнинга) и среднеюрских J_{2s} (формация Шаксимяо) отложений.

участки, интенсивно затронутые антропогенной деятельностью, и выбраны только участки в пределах лесных и реже сельскохозяйственных угодий. На обследованных территориях в случайном порядке были определены точки отбора проб, в каждой из которых был снят верхний слой 0–20/30 см, чтобы максимально исключить возможное влияние антропогенного воздействия (в особенности на химический состав отбираемых образцов). В итоге было выбрано 25 точек отбора, пробы отбирались с двух интервалов: 20–50 и 50–80 см. Всего было отобрано 25 образцов невыветрелых (материнских) пород и 25 образцов выветрелого грунта (рис. 1). Из них, соответственно, по 6 образцов пород из нижнемеловых отложений K_{1c} , по 7 – из верхнеюрских отложений J_{3p} , по 5 – из верхнеюрских отложений J_{3s} и по 7 – из среднеюрских отложений J_{2s} . Расположение точек отбора проб показано на рис. 26.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Инструментальные исследования. Плотность твердого компонента отобранных образцов определялась пикнометрическим методом [32], содержание органического углерода по методу И.В. Тюрина [2], pH потенциометрическим методом [34], содержание $CaCO_3$ методом титрования [33]. Гранулометрический состав образцов материнских горных пород определялся ситовым и ареометрическим методом [6]; выветрелых грунтов – пипеточным и ареометрическим методом [35]. Минеральный состав был определен методом рентгеновской дифрактометрии на кафедре

инженерной и экологической геологии МГУ им. М.В. Ломоносова¹. После соответствующей подготовки образцов проводилось их насыщение магнем и этиленгликолем, с последующим нагреванием до 350°C. Глинистые минералы в ориентированном образце исследовались методом рентгеновской дифракции с использованием монокроматических $CuK\alpha$ -лучей. Интерпретация дифракционной картины проводилась в соответствии с методикой Brindley и Brown [8], а количественный анализ – путем полносекционной обработки неориентированных рентгенограмм по методу Ритвельда.

Элементный состав образцов изучался различными методами на кафедре геохимии МГУ им. М.В. Ломоносова². Для обеспечения достоверности данных основные химические элементы (Si, Al, Fe, Ti, Mn, Ca, Mg, K, Na, P) в образцах определялись одновременно тремя методами:

1) с помощью масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на масс-спектрометре

¹ Анализ проведен и обработан С.А. Гараниной и С.В. Закусным в лаборатории грунтоведения и технической мелиорации грунтов кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова на оборудовании, приобретенном за счет средств развития Московского университета.

² Анализ проведен и обработан Т.Н. Лубковой в лаборатории геохимии кафедры геохимии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова на оборудовании, приобретенном за счет средств развития Московского университета.

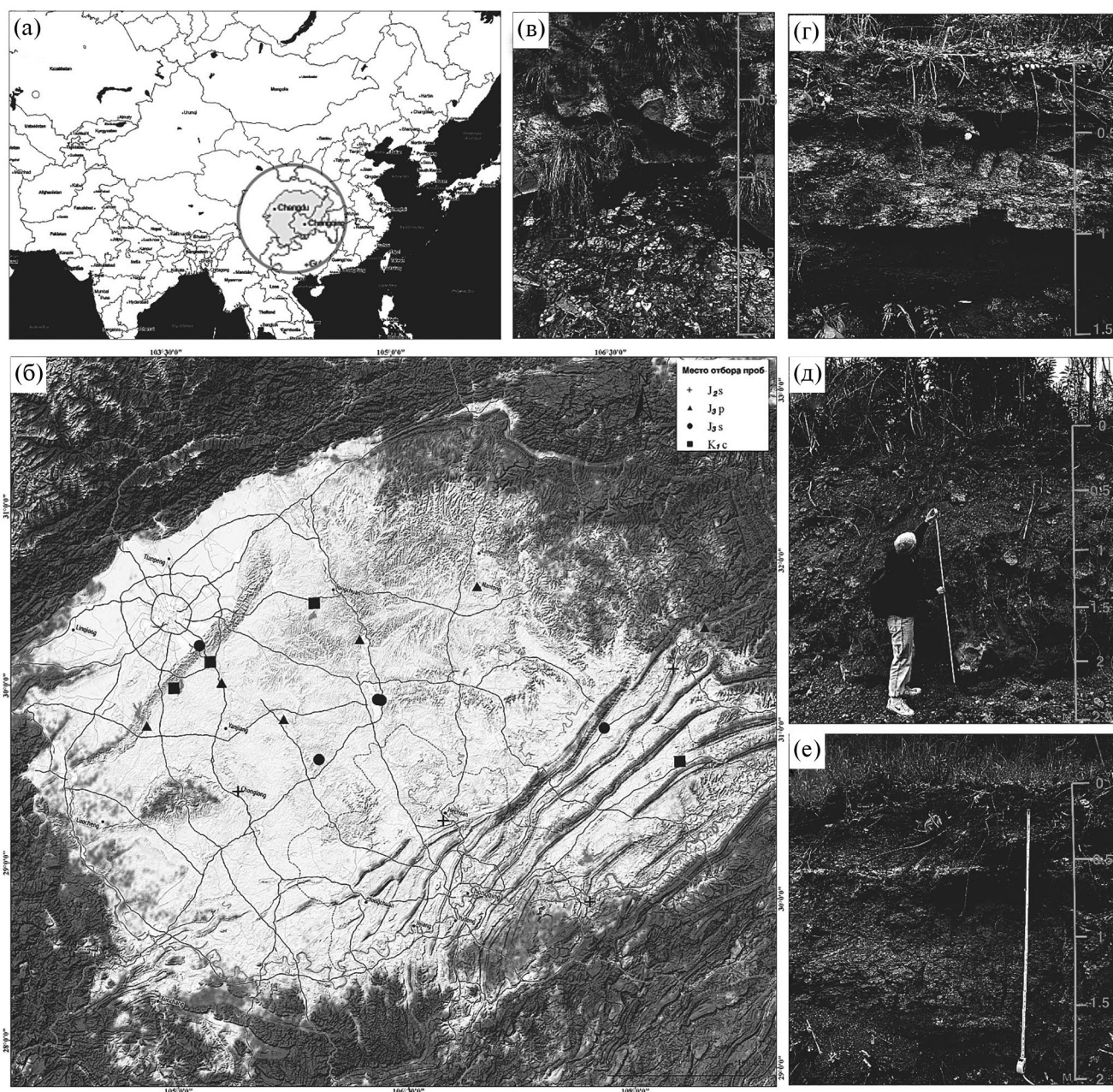


Рис. 2. Расположение точек отбора проб и профили выветрелых толщ, сформированных на красноцветных верхнемеловых и юрских отложениях: а – расположение Сычуаньской впадины на территории Китая (изучаемая часть региона выделена светло-серым); б – точки отбора проб в пределах Сычуаньской впадины: квадраты (K_{1c}), круги (J_{3p}), треугольники (J_{3s}) и крестики (J_{2s}) – места отбора проб из соответствующих отложений. Опробуемые профили в пределах отложений: в – нижнемеловых K_{1c} (формация Канси); г – верхнеюрских J_{3p} (формация Пэнлайчжэнь); д – верхнеюрских J_{3s}; е – среднеюрских J_{2s} (формация Шаксимяо).

ELAN-6100 после микроволнового сбраживания поликислоты (HF + HCl + HNO₃);

2) посредством микроволнового сбраживания поликислоты (HF + HCl + HNO₃) с использованием оптико-эмиссионного спектрометра Agilent 5110 для анализа методом фотоэмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой;

3) методом энергодисперсионной рентгеновской флуоресценции на приборах Thermo Niton FXL-950 и XL5 после продувки гелием.

Разница результатов, полученных при использовании каждого из трех методов, была проанализирована с целью исключения данных, отличающихся более чем на 10%, а для данных с разницей не более 10% принималось среднее значение.

Графики распределения строились с использованием ArcGis и Corel-DrawX5, остальные графики после построения в Excel и Origin 8.0 обрабатывались с помощью Corel-DrawX5. Статистический анализ проводился с помощью программы SPSS 11.0.

Таблица 1. Формулы, относящиеся к показателям химического выветривания

Индикаторы выветривания и их аббревиатуры	Расчетная формула	Литературный источник
Химический индекс выветривания (CIA_{corr})	$CIA_{\text{corr}} = 100 \times [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O^*)]$	Nesbit and Young, 1982 [24]
Индекс изменчивости состава (ICV)	$ICV = (Fe_2O_3 + K_2O_{\text{corr}} + Na_2O + CaO^* + MgO + MnO + TiO_2) / Al_2O_3$	Cox, 1995 [7]
К-метаморфизм (K_2O)	$K_2O^* = m \times (Al_2O_3) + m / (1 - m) \times [(CaO^*) + (Na_2O)]$, где $m = K_2O / [(Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)]$	Panahiet al., 2000 [26]

Примечание. Содержание каждого элемента относится к его молярной доле, CaO^* – к CaO в силикатах, т.е. к молярной доле CaO во всей породе за вычетом химически осажженного CaO , рассчитанной по формуле ($CaO^* = CaO - 10/3 \times P_2O_5$). Далее сравнивается величина скорректированных молярных долей CaO и Na_2O , и принимается меньшая молярная доля за молярную долю CaO^* [21].

Расчет геохимических индикаторов выветривания. Для оценки степени выветривания (изменения) материнских пород наиболее распространенным показателем является химический индекс выветривания (The Chemical Index of Alteration, (CIA)), предложенный H.W. Nesbit и G.M. Young [23–25] при изучении палеопротерозойских литотипов гуронской супергруппы с использованием геохимических методов по объемному процентному содержанию минералов в составе коры выветривания. Согласно рекомендациям вышеназванных авторов, при количественной оценке CIA и установлении условий палеоклимата на изучаемой территории следует принимать во внимание, что материнский материал мог быть неоднородным, поэтому необходимо учитывать также влияние некоторых других геологических факторов. В процессах переноса, осадконакопления и диагенеза обломочных пород в палеосреде происходит изменение состава исходных пород, наиболее заметными признаками которого являются сортировка по размеру и составу зерен, седиментационная дифференциация, переотложение, дополнительное выветривание в зоне осадконакопления и К-метаморфизм в процессе диагенеза. Чтобы гарантировать точность значений CIA при оценке уровня выветривания в исходной области, при отборе экспериментальных образцов следует обеспечить выполнение следующих условий.

А. Использование аргиллита в качестве объекта исследования. Чтобы исключить седиментационное расслоение, следует по возможности выбирать для изучения илистые мелкообломочные породы, где можно проследить состав исходной породы. Осадочное расслоение, происходящее при переносе и отложении продуктов выветривания материнской породы, может привести к тому, что в песчанике сохранится относительно небольшое количество глинистых минералов, что обусловит низкие расчетные значения CIA. Поэтому рассчитанные по песчаникам значения CIA

несопоставимы со значениями, рассчитанными по аргиллитам, т.е. степень выветривания в районе источника не может быть проанализирована по критериям, полученным для аргиллитов. Кроме того, по мнению некоторых исследователей, аргиллиты лучше других обломочных пород подходят для изучения степени выветривания и палеоклимата из-за их более высокой степени однородности и низкой проницаемости, что позволяет лучше сохранять информацию о районе источника сноса [12, 37].

Б. Отбор образцов первого осаджения ($ICV > 1$). Состав обломочных пород в более древних слоях часто изменяется в результате переотложения осадков, поэтому важно различать переотложение пород с помощью индекса изменчивости состава (ICV). Если для обломочных пород $ICV > 1$, то это свидетельствует о том, что они содержат мало глинистых минералов, представляя собой первое осаджение в тектонически активной зоне [18]; значение $ICV < 1$ означает, что порода содержит большое количество глинистых минералов, а значит, она могла быть переотложена или впервые отложена в условиях сильного химического выветривания [5].

В. Корректировка получаемых значений геохимических индикаторов выветривания. К-метаморфизм (метасоматизм калия в процессе диагенеза) в тонкообломочных породах в процессе диагенеза может приводить к добавлению новых К-элементов и изменению исходного состава пород, что обуславливает низкие значения CIA, поэтому необходима корректировка. Она может быть сделана либо по методу диаграммы A–CN–K, предложенному H.W. Nesbit и G.M. Young [25], либо по формулам поправок [24–26]. В данной работе корректировка значений проводилась по расчетным формулам (табл. 1).

Таблица 2. Состав и свойства изучаемых образцов красноцветных отложений в пределах Сычуаньской впадины Китая

Стратиграфический индекс	Количество образцов, n	Плотность твердого компонента, г/см ³	Содержание органического углерода, %	pH	Содержание карбонатов (CaCO ₃), %	Гранулометрический состав, %			
						размер фракций, мм			<0.002
						2–0.2	0.2–0.02	0.02–0.002	
K _{1c}	МП	2.45 ± 0.03	1.14 ± 0.23	8.63 ± 0.28	28.53 ± 4.82	2.05 ± 0.91	41.86 ± 5.63	38.85 ± 2.46	19.23 ± 4.32
	ВГ	2.41 ± 0.05	0.91 ± 0.14	8.67 ± 0.23	29.80 ± 3.90	0.91 ± 0.08	40.04 ± 4.38	39.91 ± 5.44	19.14 ± 1.05
J _{3p}	МП	2.40 ± 0.03	0.87 ± 0.15	8.47 ± 0.04	5.95 ± 1.06	1.83 ± 0.64	35.57 ± 3.85	29.57 ± 0.87	33.53 ± 1.63
	ВГ	2.48 ± 0.02	0.85 ± 0.13	8.53 ± 0.12	6.55 ± 0.21	2.34 ± 0.13	29.65 ± 0.07	32.27 ± 0.12	35.72 ± 0.11
J _{3sn}	МП	2.44 ± 0.02	0.91 ± 0.21	8.81 ± 0.26	9.20 ± 2.31	1.51 ± 0.15	28.15 ± 0.09	38.14 ± 0.32	32.21 ± 1.56
	ВГ	2.44 ± 0.03	0.94 ± 0.19	8.83 ± 0.27	14.00 ± 1.39	2.44 ± 0.07	24.26 ± 0.06	39.09 ± 0.76	34.21 ± 1.41
J _{2s}	МП	2.46 ± 0.06	1.65 ± 0.34	8.40 ± 0.12	1.10 ± 0.98	1.52 ± 0.50	26.73 ± 4.03	36.25 ± 1.53	35.50 ± 3.00
	ВГ	2.49 ± 0.04	1.32 ± 0.21	8.44 ± 0.27	1.75 ± 0.49	1.13 ± 1.08	37.62 ± 0.54	31.46 ± 2.19	29.79 ± 0.57
Критерий Стьюдента для парных выборок	T-тест	0.574	1.064	1.057	–0.147	1.086	–	–	–1.329
	Sig	0.584	0.382	0.325	0.887	0.314	–	–	0.225

Примечание. МП – соответствует значениям для материнских пород; ВГ – для выветрелых грунтов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Состав и свойства красноцветных пород и продуктов их выветривания

Как было отмечено выше, отложения осадочных пород изучаемых горизонтов (K_{1c}, J_{3p}, J_{3sn} и J_{2s}) образуют в разрезе однородный профиль без существенной стратификации. Разрез нижнемеловых пород K_{1c} представлен красновато-желтым, массивным, мелкозернистым, полевошпатовым песчаником, переслаивающимся с известковым конгломератом (см. рис. 2б), а грунт, образовавшийся в результате его выветривания, в целом красновато-желтый с мелкими, отчетливо заметными белыми зернами и ярко выраженной рыхлостью. Породы верхней юры J_{3p} представлены кирпично-красными аргиллитами, алевролитами, неравномерно переслаивающимися с фиолетово-красными, серовато-белыми, толстослоистыми, массивными, мелкозернистыми полевошпатовыми песчаниками и полевошпатовыми кварцевыми песчаниками, с прослоями серовато-белого тонкослоистого известняка в средней части и желтовато-зеленого сланца в верхней части (см. рис. 2г). Грунт, образовавшийся в результате выветривания, преимущественно коричнево-красного цвета, уплотненный, глинистый, крупнозернистый, с выраженными разноразмерными и неоднородными включениями. Профиль пород верхнеюрской толщи J_{3sn} состоит из красновато-бурых аргиллитов, песчаных аргиллитов, бледно-красных тонкослоистых алевролитов и промежуточных мелкозернистых полевошпатовых песчаников в верхней и средней частях профиля опробованной толщи пород, изредка серовато-зеленых тонкослоистых мергелей в нижней части (см. рис. 2д), а сформированные из этой породы дисперсные грунты имеют в основном красновато-бурый цвет, мелкозернистую и плотную структуру, однородный профиль без явной стратификации. Что касается пород среднеюрского возраста J_{2s}, их профиль в разрезе представлен светло-фиолетово-красным и желтовато-серым плотнослоистым массивным мелкозернистым песчаником, переслаивающимся с красными и желтовато-серыми песчанистыми аргиллитами и алевролитами (см. рис. 2е). Грунт, сформированный при выветривании этой породы, в целом имеет серо-коричневый цвет, грубую глинистую текстуру с присутствием отчетливых неровных агрегатов. В совокупности разновозрастные породы и образованные при их выветривании грунты, хотя и различаются по своим морфологическим характеристикам, но однородны по профилю и не имеют явной стратификации.

Плотность твердого компонента, pH, содержание органического вещества и CaCO₃, гранулометрический состав. В табл. 2 приведены результаты исследования материнских и выветрелых пород нижнемелового K_{1c}, верхнеюрского J_{3p}, J_{3s} и среднеюрского осадочного горизонта J_{2s}.

Таблица 3. Минеральный состав анализируемых материнских пород (МП) и перекрывающих их выветрелых грунтов (ВГ)

Стратиграфический индекс	Тип образца	Смектит + /С*	Иллит	Каолинит	Кварц	Плагиоклазы (альбит)	КПШ (микроклин)	Кальцит	Гематит	Нахколит
K _{1c}	МП	18.8	7.2	1.2	21	1.5	5.8	42.9	1.2	0.4
	ВГ	20.4	6.8	1	24.3	1.1	7.8	36.5	0.6	1.5
J _{3p}	МП	20.2	13.4	2.7	38.3	7.8	9.9	4.6	1	2.1
	ВГ	20.4	13.2	2.1	37.4	12	9.1	5	0.8	—
J _{3s}	МП	20.2	22.9	5	27.1	14.4	—	6.7	1.3	2.4
	ВГ	18.4	21.6	5	28.3	15.1	—	8.1	1.3	2.2
J _{2s}	МП	18.3	21.2	3.4	27.5	15.8	8.3	—	0.7	1.8
	ВГ	19.8	23.6	4.2	28.1	12.3	7.7	0.4	1.3	2.6

*С — смешанослойный минерал иллит-смектит, возможно вермикулит-смектит.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что материнские породы и вышележащие грунты имеют очень близкие значения плотности твердого компонента, pH, содержания CaCO₃ и гранулометрического состава. Так, породы и перекрывающие их грунты характеризуются преимущественно щелочной реакцией среды pH 8.47–8.83; плотность твердого компонента в них составляет 2.40–2.49 г/см³; содержание органического углерода — 0.85–1.65%. Содержание CaCO₃ в выветрелых грунтах и породах сильно различается в зависимости от возраста: наибольшее среднее содержание CaCO₃ отмечается в грунтах/породах — 28.53/29.80% в нижнемеловых отложениях (K_{1c}), а наименьшее — 1.10/1.75% в образцах среднеюрских пород (J_{2s}). Гранулометрический состав пород в основном зависит от дигенетических преобразований. Содержание песка (2–0.02 мм) в породах K_{1c}, J_{3p}, J_{3s}, J_{2s} и вышележащих грунтах составляет от 1.13 до 2.44%, содержание пылеватых зерен (0.02–0.002 мм) — 28.57–39.91%, глинистых частиц (<0.002 мм) — 19.14–35.50% (обозначения размерных фракций приведены по данным [22]).

Все образцы были разделены на две группы: “материнские горные породы” и “выветрелые грунты”. По всем показателям проведена статистическая обработка данных и получены соответствующие критерии (см. табл. 2). Результаты показали, что все породы и вышележащие грунты статистически не различались по плотности твердого компонента, содержанию органического углерода, pH, содержанию CaCO₃, песка (2–0.02 мм) и пылевой фракции (0.02–0.002 мм). Все величины анализируемых параметров были

значимо коррелированы и не имели существенных различий ($p < 0.05$). Это свидетельствует о том, что красно-желтый ферралитный грунт имеет значительную унаследованность от материнской породы.

Минеральный состав. В табл. 3 приведены данные о минеральном составе материнских пород K_{1c}, J_{3p}, J_{3s}, J_{2s} и перекрывающих их выветрелых образований. Видно, что в основном они состоят из монтмориллонита, иллита, каолинита, кварца, плагиоклаза, гематита, кальцита и нахколита, за исключением образцов из J_{3p}, все остальные горизонты содержат натриевый полевой шпат.

При этом наблюдаются существенные различия в содержании основных минералов в материнских породах и вышележащих выветрелых грунтах. Так, в образцах из отложений K_{1c} наибольший процент минералов приходится на кальцит, далее следуют кварц, монтмориллонит и иллит, причем содержание кальцита (31.8–38.1%) значительно выше, чем в образцах из других опробованных толщ. Минералы с более высоким процентным содержанием в образцах из отложений (J_{3p}, J_{3s}, J_{2s}) представлены в основном кварцем, монтмориллонитом и иллитом.

Минеральный состав и содержание минералов в образцах материнских пород и вышележащих выветрелых грунтов, взятых из осадочных слоев одного возраста из разных мест, в целом близки, но все же имеются незначительные различия. Можно предположить, что образцы из разных регионов могли подвергнуться разной степени выветривания в один и тот же период, что тесно связано с палеоэкологическими условиями. Еще

Таблица 4. Содержание основных оксидов в материнских породах и перекрывающих их красно-желтых ферралитных грунтах

Осадочный слой	Тип	n	%										
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	ППВ
K _{1c}	МП	6	45.35	8.83	2.81	0.35	0.06	20.62	1.19	1.48 a	0.60	0.07	19.00
	ВГ	6	46.16	8.21	3.32	0.30	0.06 a	19.26	1.00	1.48 a	0.62	0.06	17.90
	Ср	12	45.76	8.82	3.06	0.32	0.06 a	19.94	1.09	1.48	0.61 a	0.07	18.43
J _{3p}	МП	7	66.53	14.12	5.10	0.66	0.09	4.71	1.89	2.72	1.33	0.15	8.75
	ВГ	7	66.13	14.27	5.18	0.67	0.09 a	4.82	1.92	2.71	1.37	0.15	8.45
	Ср	14	66.33	14.20	5.14	0.67	0.09	4.76 a	1.90	2.71	1.35	0.15	8.62
J _{3s}	МП	5	60.30	15.78	6.30	0.74	0.10	7.32	2.48	3.05	1.31	0.19 a	9.73
	ВГ	5	58.55	15.83	6.44	0.74	0.10	8.00	2.71	2.78	1.23	0.19	11.71
	Ср	10	59.42	15.80	6.37	0.74	0.10	7.66	2.59	2.92	1.27 a	0.19	10.72
J _{2s}	МП	7	70.65	14.29	5.31	0.71	0.11	1.47	1.71	2.40	1.39	0.16	4.75
	ВГ	7	68.42	14.83	5.73	0.70 a	0.08	1.49	2.04 a	2.54	1.23	0.15	6.70
	Ср	14	69.54	14.56	5.52	0.70	0.09 a	1.48	1.87	2.47	1.31	0.15	5.75
Критерий Стьюдента для парных выборок	Т-тест	25	−1.516	−0.015	1.626	−0.717	−1.527	−0.56	1.24	−0.18	−0.941	−0.536	0.434
	Sig	25	0.143	0.988	0.117	0.48	0.14	0.581	0.227	0.858	0.356	0.597	0.678
UCC	−	−	66.00	15.20	5.00	0.50 a	0.06	4.20	2.20	3.40	3.90	0.50	−

Примечание. МП — соответствует значениям для материнских пород; ВГ — для выветрелых грунтов, Ср — среднее значение; буквой “a” обозначены кластеры, которые статистически различаются ($p > 0.05$); UCC — среднее содержание в верхней части континентальной земной коры; ППВ — потери при воспламенении.

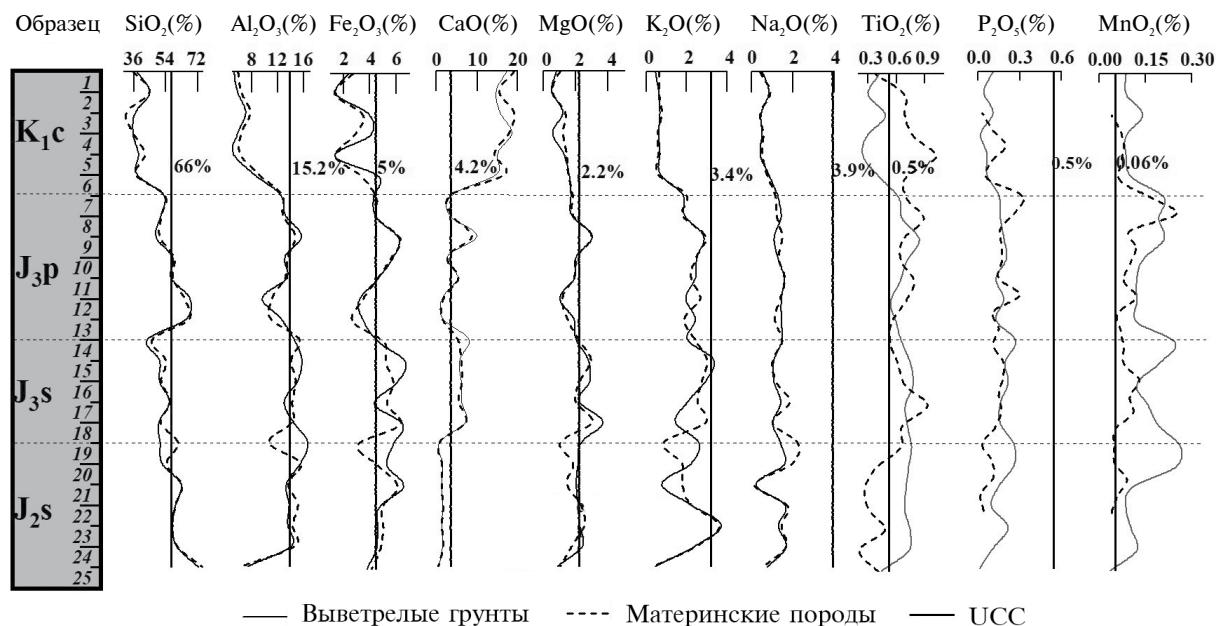


Рис. 3. Обобщенные профили содержания основных оксидов в анализируемых образцах из осадочных горизонтов K_{1c} , J_{3p} , J_{3s} , J_{2s} . Цифрами по вертикали обозначено общее количество образцов.

раз подчеркнем, что касается образцов выветрелой породы и вышележащей толщи того же периода, то они очень близки по минеральному составу к материнским породам.

Содержание основных оксидов. В табл. 4 приведены значения содержания основных химических элементов в исследованных образцах, а также средние значения основных элементов, содержащихся в верхней части континентальной земной коры [31].

Согласно полученным результатам, породы четырех различных геологических эпох (K_{1c} , J_{3p} , J_{3s} , J_{2s}) и современные продукты их выветривания имеют наибольшее процентное содержание оксида кремния (SiO_2), средние значения которого варьируют от 45.35 до 70.65%. За ним следует Al_2O_3 или CaO . Средние значения Al_2O_3 изменяются от 8.21 до 15.83%. Содержание CaO в образцах разного геологического возраста варьируют в довольно широких пределах. Так, средние значения изменяются от 1.47 до 20.62%. Среднее содержание Fe_2O_3 колеблется (в %) от 2.81 до 6.44; K_2O — от 1.48 до 3.05; MgO — от 1.00 до 2.71; Na_2O — от 0.60 до 1.39; TiO_2 — от 0.30 до 0.74; P_2O_5 — от 0.06 до 0.19; MnO_2 — от 0.06 до 0.11. Сравнивая изменение содержания основных элементов в материнских породах и вышележащих грунтах (рис. 3), можно отметить, что кривые изменения содержания SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O и P_2O_5 в породах и выветрелых грунтах разного возраста с высокой степенью согласованности повторяют друг друга. Содержание TiO_2 и MnO_2 в материнских породах и продуктах их выветривания не всегда одинаково и имеет небольшой диапазон

варьирования, причем в большинстве горизонтов содержание TiO_2 и MnO_2 в выветрелых разностях выше, чем в материнских породах, что может быть связано с накоплением щелочных металлов в процессе выветривания пород [14].

За исключением образцов из верхнемеловых отложений (K_{1c}), а также содержания Na_2O и K_2O в каждом из анализируемых типов отложений, характер распределения основных элементов практически одинаков и близок к среднему составу в верхней части континентальной земной коры (UCC composition). Таким образом, основной элементный состав пород из юрских отложений и продукты их выветривания близки к UCC, а элементный состав образцов из верхнемеловых отложений существенно отличается от UCC.

Согласно предыдущим исследованиям [38], исходным материалом в целом для формирования изучаемых пород (J_{3p} , J_{3s} и J_{2s}) в пределах Сычуаньской впадины могли быть кварцевые отложения фельзитовой зоны, однако происхождение материнских пород в осадочном слое K_{1c} может отличаться от происхождения других отложений. Это, вероятно, связано с тем, что в процессе формирования данного типа отложений при палеоклиматических условиях процесса осадконакопления, заметно ощущалось воздействие “экзотического” материала выветривания, принесенного из отдаленных районов, что привело к иной структуре распределения основных элементов, чем в других группах образцов и UCC.

Во всех образцах материнских пород и продуктов их выветривания анализируемых толщ содержание Na_2O и K_2O ниже, чем в UCC.

В большинстве образцов содержание Fe_2O_3 выше, чем в УСС. В то время как в образцах из K_1c содержание Fe_2O_3 близко к УСС. Это объясняется миграцией щелочных металлов и их оксидов и постепенным накоплением Fe и других стабильных элементов в процессе выветривания. Результаты проведенного нами анализа подтверждают выводы Y.R. He [15] о том, что красноцветные породы и продукты их выветривания имеют относительно высокое содержание Fe, Mn и Ti (см. рис. 3).

Результаты статистической обработки данных (см. табл. 3) показали, что элементные составы, как материнских пород, так и продуктов их выветривания значимо коррелируют и не имеют существенных различий ($p < 0.05$). Приведенный выше анализ показывает, что содержание основных оксидов в красно-желтых ферралитных грунтах и их материнской породе очень сходно.

Геохимические характеристики выветривания. Все 50 образцов, анализируемых в данной работе, представляют собой аргиллиты или алевролиты, а также дисперсные грунты, образовавшиеся при их выветривании. После расчета по вышеприведенным формулам значений ICV (см. табл. 1) 4 образца с $\text{ICV} < 1$ были исключены из дальнейшего расчета параметров химического выветривания. Значения ICV материнских пород варьировали от 1.00 до 1.28 при среднем значении 1.11 (стандартное отклонение 0.10), а для выветрелых грунтов — от 1.00 до 1.32 при среднем значении 1.13 (стандартное отклонение 0.09). Подобное обстоятельство свидетельствует о том, что все изученные образцы являются продуктами первого этапа осадконакопления. Значения CIA_{corr} для материнских пород варьировали от 63.04 до 76.64 при среднем значении 68.63 (стандартное отклонение 3.86); для грунтов значения CIA_{corr} варьировали от 61.17 до 74.87 при среднем значении 68.61 (стандартное отклонение 3.69). CIA_{corr} материнских пород и выветрелых грунтов из разных горизонтов отличаются по интенсивности химического выветривания (см. рис. 4а).

При этом материнские породы и перекрывающие их дисперсные грунты из одних и тех же осадочных горизонтов имеют единую закономерность по степени выветривания:

$$\begin{aligned} \text{K}_1\text{c} (73.26/71.59) &> \text{J}_3\text{s} (68.63/70.17) > \\ &> \text{J}_2\text{s} (67.41/67.82) > \text{J}_3\text{p} (66.16/66.04). \end{aligned}$$

Таким образом, все образцы из разных горизонтов достигли умеренной степени выветривания ($\text{CIA} > 60$). Причем образцы из раннемелового горизонта K_1c имели самый высокий уровень выветривания, тогда как значения CIA_{corr} в остальных образцах из отложений средней и поздней юры существенно не варьировали.

Треугольная диаграмма А–СN–К — это еще один способ выражения индекса химического

изменения CIA_{corr} , который наглядно отражает интенсивность и тенденцию химического выветривания. На рис. 4б видно, что все образцы породы и вышележащих грунтов параллельны линии смектит-иллит и приближаются к стороне А–К, но удалены от базовой линии плагиоклаз–К-полевой шпат, причем более половины образцов пересекли линию смектит-иллит. Это указывает на то, что в процессе химического выветривания их силикатные минералы подверглись явному выветриванию: потери Са и Na в плагиоклазе более значительны, а потери К в калиевом полевошпате очевидны. Все они достигли уровня умеренного химического выветривания (60–80). Что касается образцов из разных горизонтов, то все образцы из горизонта K_1c пересекли линию смектит-иллит и вступили в стадию выветривания калия, которая постепенно параллельна линии А–К: образцы из горизонтов J_3s и J_2s находятся по обе стороны линии смектит-иллит, а большинство образцов из горизонта J_3p — ниже линии смектит-иллит.

Подобное обстоятельство свидетельствует о том, что общая степень выветривания образцов из отложений K_1c самая высокая, с очевидным выветриванием калиевого полевого шпата. За ними следуют отложения J_3s и J_2s , которые выветрились в равной степени. В горизонте J_3p , который выветрился меньше остальных, выветривание калиевого полевого шпата отражается менее явно. В совокупности минеральный состав исходных пород и продуктов их выветривания колеблется в одном и том же диапазоне, а интенсивность и тенденция выветривания согласуются между различными горизонтами для образцов материнских пород и красно-желтых ферралитных грунтов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Между составом красно-желтых ферралитных грунтов и их материнскими породами прослеживается значительная преемственность. Все исследованные образцы красно-желтых ферралитных грунтов были отобраны с территорий сельскохозяйственных угодий или лесных массивов в холмистых и горных районах Сычуаньской впадины. На основании анализа полученных результатов видно, что дисперсные грунты образовались в результате выветривания пород четырех различных геологических возрастов. При этом наблюдается значительное их сходство с образцами материнских пород, что свидетельствует о преемственности между физическими свойствами и химическим составом выветрелых грунтов и их материнских пород. Это нашло отражение в следующих аспектах.

1. Профиль выветрелых грунтов однороден, явной стратификации на отдельные горизонты не наблюдается. Цвет их четко прослеживается

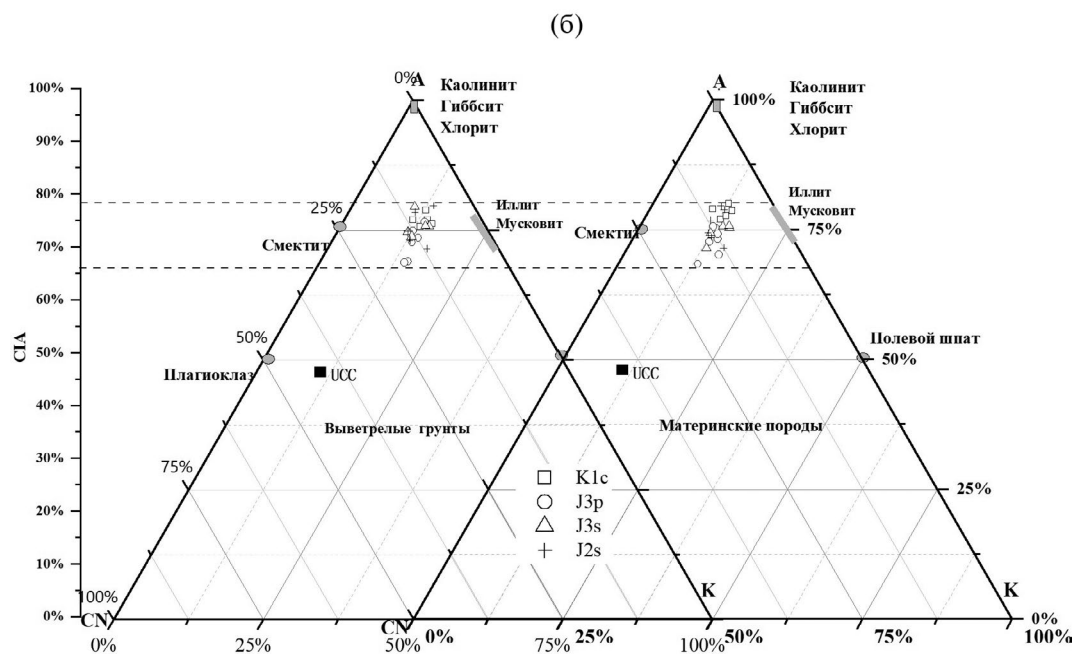
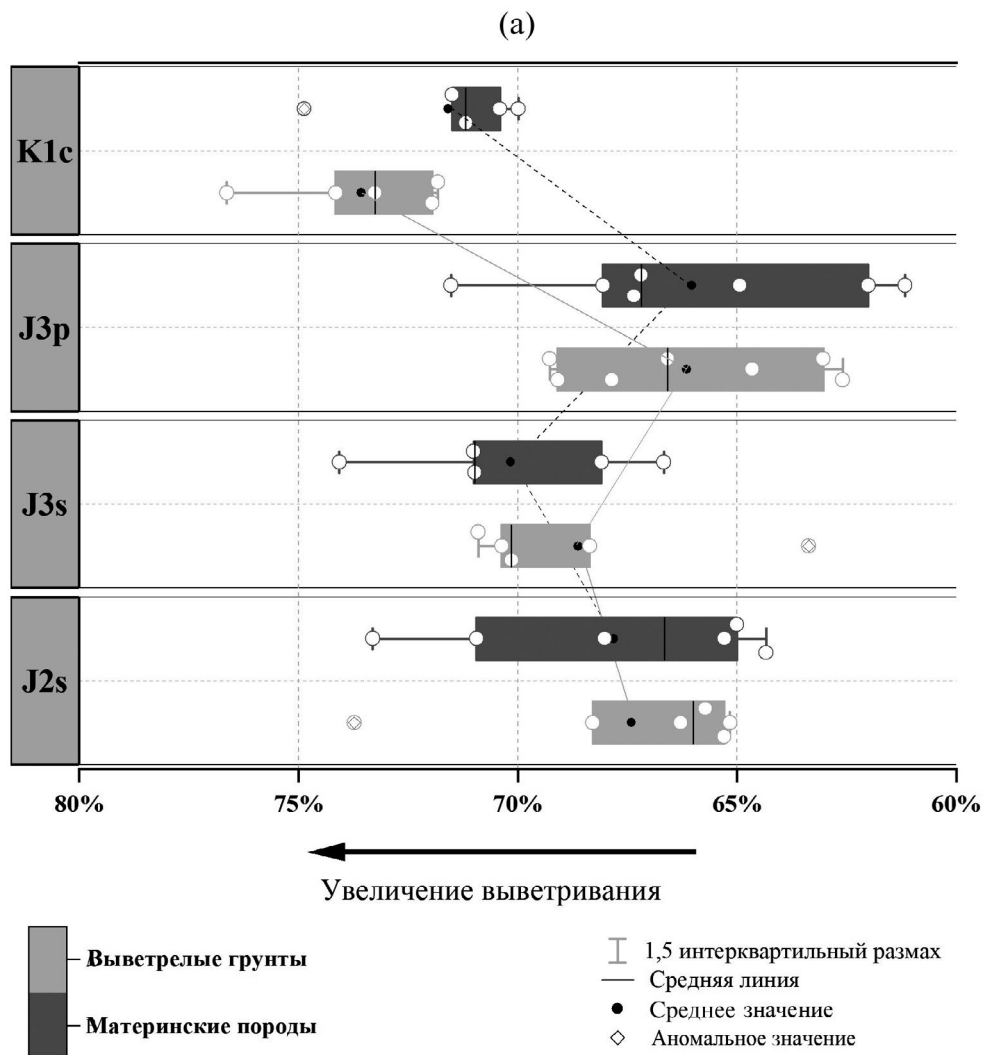


Рис. 4. Изменение индекса $CIA_{\text{сорт}}$ (а) и тренды выветривания А–CN–К для материнских пород и красно-желтых ферралитных (выветрелых) грунтов (б).

по всему профилю и соответствует цвету материнских пород (коре выветривания). Мощность выветрелого слоя, как правило, не превышает 100 см, в основном 30–50 см. Основной причиной этого является то, что данные отложения распространены на крутых склонах, а в районе исследований в летний период наблюдаются высокие температуры и обильные осадки, чем обусловлены интенсивный поверхностный сток и сильная эрозия, что приводит к образованию слабого и недифференцированного профиля выветривания материнских пород;

2. Плотность твердого компонента, содержание органического углерода, гранулометрический, минеральный и химический состав материнских пород и выветрелых грунтов также значительно сходны. Генезис красно-желтых ферралитных грунтов – это, по сути, процесс изменения горных пород под влиянием экзогенных факторов, протекающий в приповерхностной части литосферы [3, 30]. Как правило, выветривание обусловлено сочетанием градиентов химического и физического потенциалов [17, 39]. При физическом выветривании изменение пород происходит под действием механических воздействий, приводящих к их дезинтеграции и фрагментации, а при химическом выветривании процессы растворения, гидратации, гидролиза, окисления и карбонизации приводят к формированию минерального и химического состава выветрелых грунтов, отличающих ее от материнских пород. В данном исследовании образцы дисперсных грунтов были взяты непосредственно из коры выветривания материнских пород. Их морфология и текстура заметно отличаются от материнской породы (см. рис. 1). В то же время физические свойства и химический состав грунтов сохраняют высокую степень сходства с породой. Это указывает на то, что в процессе выветривания исследованных грунтов роль физических агентов выветривания гораздо выше, чем химических.

Высокая интенсивность выветривания и устойчивость материнских пород к химическому выветриванию приводят к слабой выраженности этого вида преобразования. Так, индекс химического выветривания, выраженный через $СИА_{\text{сорт}}$, показывает, что образцы пород из раннемелового K_1c , позднеюрского J_3s , J_3p и среднего J_2s отделов в пределах территории Сычуаньского бассейна в целом достигли стадии умеренного выветривания ($СИА_{\text{сорт}} > 60$). Согласно предыдущим исследованиям, материнские породы раннемелового периода K_1c , позднеюрского J_3s , J_3p и среднеюрского J_2s периодов в Сычуаньской впадине представлены озерно-аллювиальными осадочными породами [27], а климат бассейна в период от средней до поздней юры был неустойчивым и характеризовался чередованием умеренного и аридно-влажного типов. В период раннего

мела территория Сычуаньской впадины в целом характеризовалась умеренным палеоклиматом, который чередовался с полусухим и постепенно смещался к засушливо-жаркому [19]. Такие палеоклиматические условия предопределили более высокую интенсивность выветривания осадочных пород территории впадины. Все образцы красно-желтых ферралитных грунтов имеют одинаковую интенсивность выветривания и тренд выветривания в соответствующих материнских породах, что свидетельствует о слабо выраженной стадии химического выветривания в процессе преобразования пород. Причина слабого химического выветривания связана в основном с тем, что в материнских породах мелового и юрского периодов с течением геологического времени (от нескольких миллионов лет до более 100 млн лет) постепенно кристаллизовались аморфные оксиды железа, связанные с минеральными частицами пород [15]. При этом поверхность минеральных зерен в породе инкапсулировалась железом и марганцем, благодаря чему их химические свойства остаются стабильными даже при сильном воздействии диagenетических факторов.

Процесс формирования красно-желтых ферралитных грунтов характеризуется быстрыми процессами физического выветривания материнских пород. Материнские породы состоят из переслаивающихся песчаников и аргиллитов, которые в силу своей однородной текстуры и минералогических характеристик очень восприимчивы к процессам их физического выветривания. При изменении температуры и режима увлажнения-высушивания породы подвергаются неравномерному расширению и сжатию, в них образуются крупные трещины и обломки пород, дезинтеграция которых, в свою очередь, приводит к образованию песчаных и более мелких частиц. Из-за субтропического муссонного влажного климата Сычуаньской впадины обнаженные материнские породы быстро разрушаются и переходят в дисперсный красно-желтый ферралитный грунт. Хотя скорость выветривания варьирует в зависимости от возраста материнских пород, в целом красноцветные породы имеют к этому гораздо более высокую склонность, чем другие типы осадочных пород, распространенные на изучаемой территории. Особенно это касается отложений J_2s : для преобразования материнских пород до состояния выветрелого грунта с преобладанием частиц песчано-глинистой фракции в естественных условиях требуется всего около 5 лет, а при высокоплотном возделывании в процессе сельскохозяйственного производства – всего около 3 лет [36]. Быстрый процесс физического выветривания материнских пород также объясняет, почему физические свойства и минеральный состав красно-желтых ферралитных грунтов сильно зависят от химико-минерального состава материнских пород.

Особенности элементного состава красно-желтых ферралитных грунтов. В процессе почвообразования желто-красных субтропических лесных почв одновременно происходят процессы физического и химического выветривания [9]. Формирование красно-желтых ферралитных грунтов характеризуется вымыванием основных обменных ионов при химическом выщелачивании, но в то же время, благодаря быстрому физическому выветриванию материнской породы, вымываемые при выщелачивании обменные ионы могут быть в определенной степени компенсированы содержанием этих элементов в материнской породе. Поэтому концентрация основных обменных ионов в выветрелом грунте всегда высока. Обилие карбоната кальция в красно-желтых ферралитных грунтах обуславливает слабощелочную реакцию среды, что значительно замедляет процессы декарбонизации и десиликатизации сельскохозяйственных почв на данной территории [15]. Из-за влажных субтропических условий Сычуаньской впадины и того, что большинство пород расположены на склонах, красно-желтые ферралитные грунты подвергаются эрозии, а материнские породы, в свою очередь, обнажаясь на поверхности, снова подвергаются интенсивному воздействию экзогенных факторов. В результате чего красно-желтый ферралитный грунт и его материнские породы находятся в перманентном состоянии интенсивного выветривания и эрозии.

Подводя итог, можно сказать, что основная причина значительной преобладанности состава красно-желтых ферралитных грунтов и их материнских пород по сравнению с другими грунтами заключается в быстром физическом и слабом химическом выветривании, которая обусловлена легко дезинтегрируемыми и фрагментируемыми аргиллитами, петрографическими характеристиками самой материнской породы, а также ее собственными особенностями, выражающимися в устойчивости к химическому выветриванию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Красно-желтые ферралитные грунты в пределах Сычуаньской впадины образуются в процессе выветривания красноцветных пород нижнемелового K_1c (формация Канси), верхнеюрского J_3p (формация Пэнлайчжэнь), J_3s (формация Суйнинга) и среднеюрского J_2s (формация Шаксимяо) возраста и характеризуются явными наследственными признаками материнской породы. Это проявляется в однородности профиля выветрелой толщи, отсутствии явной стратификации, а также в сходстве продуктов выветривания и материнской породы по плотности твердого компонента, гранулометрическому, минеральному составу и содержанию основных химических элементов.

2. Индекс химического выветривания $CIA_{\text{сорт}}$ показывает, что интенсивность выветривания материнских пород и перекрывающих их грунтов сопоставима и достигла умеренной степени. Треугольная диаграмма $A-CN-K$ соответствует тренду, характерному для процессов химического выветривания, как в отношении материнских пород, так и в отношении красно-желтых ферралитных грунтов. Из чего можно сделать вывод, что материнские породы подвергались интенсивному химическому выветриванию в процессе осадконакопления и с течением времени приобрели устойчивость к воздействию химических агентов выветривания.

3. Высокая степень преобладанности между красно-желтыми ферралитными грунтами и их материнскими породами обусловлена как особенностями выветривания, так и свойствами самих пород. В современных природно-климатических условиях Сычуаньской впадины на первый план при выветривании красноцветных пород выходит довольно быстрая физическая дезинтеграция пород, которая обусловлена в основном однородной текстурой аргиллитовой материнской породы и ее свойством легко растрескиваться в условиях высокой температуры и влажности. Слабая выраженность процессов химического преобразования красноцветных пород при выветривании также обусловлена их природой. За счет чего образующиеся при их выветривании дисперсные красно-желтые ферралитные грунты во многом сходны по своим химико-минеральным характеристикам к исходным породам. Это обстоятельство должно учитываться при опробовании этих пород для оценки уровня антропогенного воздействия в пределах Сычуаньской впадины Китая.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Большая советская энциклопедия / Гл. ред. А. М. Прохоров. В 30 т., 3-е изд. М.: Сов. Энциклопедия, 1969. Т. 20. С. 448–449. [The Great Soviet Encyclopedia]. In 30 volumes. A.M. Prokhorov, Ed., 3rd edition. Moscow, Sov. Entsiklopedia Publ., 1969, vol. 20, pp. 448–449 (in Russian)
2. ГОСТ 26213–91. Почвы. Методы определения органического вещества. <https://docs.cntd.ru/document/1200023481> [ГОСТ 26213–91. Soils. Methods of organic matter determination]. <https://docs.cntd.ru/document/1200023481> (in Russian)
3. Золотарев Г.С. Инженерная геодинамика. М.: Изд-во МГУ, 1983. 328 с. Zolotarev, G.S. [Engineering geodynamics]. Moscow, MSU Publ., 1983, 328 p. (in Russian)
4. Amundson R., Jenny H. On a state factor model of ecosystems. *Bioscience*, 1997, no. 47, pp. 536–543.
5. Barshad I. The effect of a variation in precipitation on the nature of clay mineral formation in soils from acid and basic igneous rocks. In: Proc. Int. Clay Conference, 1996, pp. 167–173.
6. [Chinese soil classification and codes (GB-17396-2009)]. China National Institute of Standardization, 2009. (in Chinese)

7. Cox, R., Lowe, D.R., Cullers, R.L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, no. 59, pp. 2919–2940.
8. Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. Brindley G.W., Brown G., Eds., *Mineralogical Society of Great Britain and Ireland*, 1980, no. 5, chapter 6, 495 p.
9. Du, J., Luo, Y., Zhang, W., Xu, C., Wei, C. Major element geochemistry of purple soils/rocks in the red Sichuan Basin: China implications of their diagenesis and pedogen. *Environmental Earth Sciences*, 2013, no. 69, pp. 1831–1844.
10. FAO/UNESCO. Soil map of the World. Revised legend, with corrections. Rome: FAO, Technical Paper 20. Reprint of World Soil Resources Report 60, 1988.
11. Gao, Y.X., Li, J. [1:4 million China soil map]. Map Press Publ., 2000. (in Chinese)
12. Garzanti, E., Padoan, M., Setti, M., et al. Weathering geochemistry and Sr–Nd fingerprints of equatorial upper Nile and Congo muds. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2013, no. 14, pp. 292–316.
13. Han, G.Z., Huang, L.M., & Tang, X.G. Potassium supply capacity response to K-bearing mineral changes in Chinese purple paddy soil chronosequences. *J. of Soils and Sediments*, 2019, no. 19, pp. 1190–1200.
14. He, Y., Yang Zhuang W., Liu, C. et al. Crop residue removal effects on soil erosion and phosphorus loss in purple soils region, southwestern China. *Agronomy*, 2023, no. 13(4):1137.
15. He, Y.R. [Purple soils in China]. Chinese Science Press, Beijing, 2003, pp. 80–126 (in Chinese)
16. Hu, J., Huang, Z., Li, S. et al. Assessing profile uniformity of soils from weathered clastic sedimentary rocks in southwest China. *Catena*, 2023, no. 224, pp. 70–107.
17. Jenny, H. Factors of soil formation: a system of quantitative pedology. Dover Publications. 1994, 281 p.
18. Kamp, P.C., Leake, B.E. Petrography and geochemistry of feldspathic and mafic sediments of the northeastern Pacific margin. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh Earth Sciences*, 1995, no. 76(4), pp. 411–449.
19. Li Jun, Huang Chengmin, Wen Xingyue, Zhang Maochao. [Mesozoic paleoclimate changes in the Sichuan Basin: evidence from deep-time paleosols]. *J. of Sedimentary Sciences*, 2021, no. 39(5), pp. 1157–1170. (in Chinese)
20. Li, Z., Wang, P., Liu, L., et al. High negative surface charge increases the acidification risk of purple soil in China. *Catena*, 2021, no. 196, pp. 19–48.
21. McLennan, S.M. Weathering and global denudation. *Journal of Geology*, 1993, no. 101, pp. 295–303.
22. Methods of soil analysis: part 4. Physical methods. Dane, J.H., Topp, G.C., Eds. Soil Science Society of America, Book series, vol. 5, 2002, 866 p.
23. Nesbitt, H.W., Young, G.M. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, no. 48(7), pp. 1523–1534.
24. Nesbitt, H.W., Young, G.M. Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lites. *Nature*, 1982, no. 299, pp. 715–717.
25. Nesbitt, H.W., Young, G.M., McLennan, S.M., Keays, R.R. Effects of chemical weathering and sorting on the petrogenesis of siliciclastic sediments, with implications for provenance studies. *Journal of Geology*, 1996, no. 104, pp. 525–542.
26. Panahi, A., Young, G.M., Rainbird, R.H. Behavior of major and trace elements (including REE) during Paleoproterozoic pedogenesis and diagenetic alteration of an Archean granite near Vile Marie, Québec, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, no. 64(13), pp. 2199–2220.
27. Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources. Geology of Sichuan province. Geological Publ. House. 1991.
28. Sichuan Geological Bureau Oil Census Brigade. 1:200,000 Geological Map of China. China Geological Reference Library. 1960 Sichuan Basin Group H-48-10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18.
29. Soil Survey Staff. Keys to soil taxonomy (11th Edition). Washington, USDA, Natural Resources Conservation Service, 2010, 338 p.
30. Targulian, V.O., Krasilnikov, P.V. Soil system and pedogenic processes: Self-organization, time scales, and environmental significance. *Catena*, 2007, no. 71, pp. 373–381.
31. Taylor, S.R., McLennan, S.M. The continental crust: its composition and evolution. Blackwell, London, 1985, 277 p.
32. The state forestry administration of the People's Republic of China. Forestry industry standards of the People's Republic of China, LY/T 1224–1999, Determination of soil density in forests. 1999.
33. The state forestry administration of the People's Republic of China. Forestry industry standards of the People's Republic of China, LY/T 1250–1999, Determination of calcium carbonate in forest soil. 1999.
34. The state forestry administration of the People's Republic of China. Forestry industry standards of the People's Republic of China, LY/T 1239–1999, Determination of forest soil pH. 1999.
35. The state forestry administration of the People's Republic of China. Forestry industry standards of the People's Republic of China, LY/T 1225–1999 Determination of the particle composition (mechanical composition) of forest soils. 1999.
36. Wei, C.F., Ni, J.P., Gao, M. et al. Anthropogenic pedogenesis of purple rock fragments in Sichuan basin, China. *Catena*, 2006, no. 68(1), pp. 51–58.
37. Wronkiewicz, D.J., Condie, K.C. Geochemistry and provenance of sediments from the pongola supergroup, South Africa: Evidence for 3.0 Ga Old Continental Craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, no. 53, pp. 1537–1549.
38. Yizhou Peng, Grigorieva, I.Yu. Purple soil inheritance and source of parent rock material and tectonic background in the Sichuan Basin, China. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2023. <https://doi.org/10.1080/24749508.2023.2265125>.
39. Yu, F., Hunt, A.G. Predicting soil formation on the basis of transport-limited chemical weathering. *Geomorphology*, no. 301, pp. 21–27.
40. Zhong, S., Han, Z., Du, J. et al. Relationships between the lithology of purple rocks and the pedogenesis of purple soils in the Sichuan Basin. China, Scientific Reports, 2019.

THE REASONS FOR THE INHERITANCE OF THE COMPOSITION AND PROPERTIES OF RED-COLORED SOILS OF THE MODERN WEATHERING CRUST WITHIN THE WESTERN PART OF THE SICHUAN BASIN OF CHINA

Yizhou Peng^{a,#}, I. Yu. Grigorieva^{a,##}

^a*Geological Faculty, Lomonosov Moscow State University,
Leninskie gory 1, Moscow, 119991 Russia*

[#]*E-mail: 354151007pyz@gmail.com,*

^{##}*E-mail: ikagrig@inbox.ru*

In this work, we conducted an experimental evaluation and analysis of the characteristics and makeup of red-colored rocks from four representative Cretaceous and Jurassic sedimentary sequences in the western Sichuan Basin of China, as well as their weathering products. To determine the direction of weathering processes and the cause-and-effect link between the characteristics and composition of the parent rocks and the excess chemical components in the weathered soils, the chemical index of alteration was calculated. The findings demonstrated that, with regard to features like color, density of solid component, organic carbon content, granulometric composition, pH, mineral composition, and content of main chemical elements, all samples of weathered (dispersed) soils are quite comparable to the parent rocks. All samples of weathered soils and parent rocks exhibit similar chemical weathering characteristics and an index, according to the results of the CIA_{corr} calculation and the examination of the A–CN–K triangle diagrams. Furthermore, all of them have attained a moderate level of chemical weathering, with samples from Jurassic rocks (J_{3p}, J_{3s}, and J_{2s}) having far lower weathering intensities than those from Cretaceous rocks (K_{1c}). The red-colored rocks are characterized by weak chemical weathering and rapid development of physical weathering. This weathering characteristic can be attributed to the parent rock's uniform texture and mostly clayey composition, which break down readily in environments with high humidity and plenty of heat. The low level of chemical weathering is due to the fact that the parent rock itself has undergone a significant change in chemical composition during sedimentation and subsequent diagenesis, and has acquired a high degree of resistance to subsequent transformation under modern conditions. Therefore, the characteristics and makeup of purple soil are mostly determined by the parent rock.

Keywords: *Sichuan depression, parent rocks, purple soil, the Chemical Index of Alteration (CIA)*

ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

УДК 556:550.424.6

ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЛОМОЧНОГО МАТЕРИАЛА БУРЕЙСКОГО ОПОЛЗНЯ ПОСЛЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО ЗАМЕРЗАНИЯ/ОТТАИВАНИЯ *IN VITRO*© 2024 г. Л. М. Кондратьева^{1,*}, Е. М. Голубева^{2,3,**}, Н. С. Коновалова^{2,***}¹Институт водных и экологических проблем Дальневосточного отделения РАН,
ул. Дикопольцева, 56, Хабаровск, 680000 Россия²Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина Дальневосточного отделения РАН,
ул. Ким-Ю-Чена, 65, Хабаровск, 680000 Россия³ФГБОУВО Тихоокеанский государственный университет,
ул. Тихоокеанская, 136, Хабаровск, 680035 Россия

*E-mail: kondratevalm@gmail.com

**E-mail: evg8302@yandex.ru

***E-mail: turtle_83@rambler.ru

Поступила в редакцию 11.09.2023 г.

После доработки 13.03.2024 г.

Принята к публикации 03.06.2024 г.

В работе приведены результаты экспериментального исследования (*in vitro*) трансформации обломочного материала (ОМ) тела оползня на Бурейском водохранилище. Образцы ОМ рассматриваются в качестве модели для оценки влияния абиогенных и биогенных факторов на трансформацию (разрушение, растворение) кремнийсодержащих минералов при различных условиях циклического заморозания/оттаивания (ЦЗО): сухой образец; образец, помещенный в деионизированную воду и раствор низкомолекулярных пептидов. Замораживание проводили при температуре -18°C , а оттаивание при разном диапазоне температур ($+4^{\circ}\text{C}$ и $+23^{\circ}\text{C}$). Определение элементного состава водных растворов после ЦЗО проводили методом ICP-MS, а изменение микроструктуры поверхности образцов ОМ с использованием сканирующей электронной микроскопии. В результате 5 циклов через 7 сут ЦЗО образцов ОМ в деионизированной воде содержание водорастворимых форм химических элементов (Fe, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Ag, Cd, Tl, Bi, As) было ниже пределов обнаружения прибора ($<0.001 \text{ мкг/дм}^3$). Однако в присутствии питательной среды с пептоном и природного микробного консорциума концентрации ряда элементов (Al, Ca, Mg, Fe, Mn, As, Hg) в водной среде значительно увеличивались. Согласно СЭМ-изображениям существенное изменение микроструктуры поверхности образцов происходило независимо от температуры оттаивания при активизации микроорганизмов низкомолекулярными пептидами. Образование биопленок на поверхности зерен ОМ сопровождалось формированием различных изоморфных микроагрегатов.

Ключевые слова: оползень, заморозание/оттаивание, кремнийсодержащие минералы, элементный состав, СЭМ изображения

DOI: 10.31857/S0869780924030063 EDN: SPQNQC

ВВЕДЕНИЕ

В холодных регионах наиболее активные био-геохимические процессы происходят на внешних границах оттаивания многолетнемерзлых пород (ММП) и почв [17]. Часто таяние ММП сопровождается опасными геологическими явлениями (оползнями, провалами, наводнениями и др.) — источниками рисков для инфраструктурных сооружений (мосты, тоннели, автомагистрали и др.) [8, 26, 48]. Эти риски усиливаются в условиях циклического заморозания-оттаивания ММП [18, 45]. Однако, несмотря на обширные сведения

по местам оттаивания ММП и экспериментальным данным по заморозанию/оттаиванию почв и пород [1, 47], крайне мало конкретных данных об изменении экологической обстановки в районах с их периодическим заморозанием/оттаиванием, особенно с позиции оценки поступления органических веществ (ОВ) в водоемы. Сезонное оттаивание ММП усиливает эффекты их разрушения и служит важным фактором для изменения качества поверхностных и подземных вод.

Существуют различные режимы таяния ММП [25], от которых зависит концентрация и состав

ОВ в поверхностных водах. Важным фактором, регулирующим состав ОВ в принимающих водоемах при оттаивании мерзлых грунтов, выступает гидрологический режим, влияющий на степень увлажнения береговых склонов [40]. Установлено, что разрушение горных пород и изменение устойчивости горных склонов происходит ускоренно при минусовых температурах и их повышенном увлажнении [41]. В случае неоднократного замораживания и оттаивания увеличивается раскрытие трещин, поскольку вода переходит в лед, и возникает сила морозного пучения [42]. Установлено, что в интервале температур от -20°C до -40°C повышается хрупкость пород за счет увеличения количества микротрещин, снижается устойчивость горных пород к деформации и разрушению [46].

Особенности поведения глинистых почв при замерзании/оттаивании, приводящие к критическим ситуациям, были выявлены в Северо-Восточном Китае при строительстве железной дороги [18, 22]. При длительных циклах замерзания/оттаивания устойчивость материнских пород зависела от присутствия монтмориллонита. Установлено, чем выше содержание этого силикатного минерала, тем больше риски от расширения и сжатия грунтов [20]. Разрушение силикатных пород оказывает большое влияние на геохимический состав различных водных объектов, формирование микробного разнообразия, обеспечивающего круговорот макро- и микроэлементов [15]. Выявление ключевых факторов, контролирующих трансформацию силикатов, стало предметом лабораторных и полевых экспериментальных исследований [13, 31].

Большинство низкотемпературных биотопов заселено адаптированными к холоду организмами трех доменов: Eukarya, Bacteria и Archaea. Способность психрофильных микроорганизмов выживать при низких температурах закодирована на клеточном и молекулярном уровнях [36]. В разрушении горных пород участвуют бактерии, развивающиеся в виде биопленок на их поверхности, в трещинах и порах [28]. Они имеют особый состав клеточных мембран; ферменты с эффективной каталитической активностью при низкой температуре; обладают способностью удалять денатурированные холодом белки и специализированные гены, отвечающие за поддержание жизнеспособности при холодовом шоке [16, 23].

В связи с изменением климата, все больший интерес вызывают исследования, раскрывающие особенности трансформации горных пород при участии микроорганизмов в условиях оттаивания ММП и сезонного замерзания/оттаивания грунтов [38]. Яркими представителями устойчивости к низким температурам являются бактерии родов *Pseudomonas* и *Bacillus*. Роль бактериальных антифризов могут выполнять белки и некоторые

полисахариды [10, 30]. Установлено, что температура окружающей среды – важный фактор, влияющий на разрушение гранита при участии *Bacillus subtilis* [34]. В результате эксперимента на биоразрушение базальта, гранита и гнейса установлено, что температура влияет на микробное выветривание пород и обуславливает изменение последовательности извлечения элементов [37].

Важные биогеохимические процессы в Бурейском водохранилище (БВДХ) происходят под влиянием сезонного колебания уровней воды, когда переувлажненные горные породы на берегах могут циклически замерзать, оттаивать и затем разрушаться. До настоящего времени продолжается дискуссия [2, 5, 6] о причинах схода гигантского зимнего оползня, который произошел в декабре 2018 г. при -32°C с левого берега БВДХ. Этот оползень – один из крупнейших в мире, представляет собой уникальное природное явление в водоеме, покрытом льдом. Его обрушение вызвало высокую волну цунами [3, 7]. Большая скорость прохождения волны и физические свойства почвы (пористость, способность к размоканию, повышенная пластичность) привели к полному разрушению почвенного покрова фактически до скальных пород [7]. Глубина водохранилища на месте схода оползня составляет более 70 м. По расчетам специалистов основная часть оползня находится под водой. Описание геологических, геоморфологических и геофизических особенностей Бурейского оползня представлены в ряде работ [2, 3, 5–7].

Основная цель исследований состояла в оценке влияния циклического замораживания/оттаивания (ЦЗО) и диапазона температуры оттаивания на изменение элементного состава водных растворов и микроструктуры поверхности минеральных образцов. В нашей экспериментальной работе (*in vitro*) образцы обломочного материала тела оползня используются в качестве модели для исследования абиогенных и биогенных факторов, влияющих на трансформацию (разрушение, растворение) и вторичное образование минералов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Характеристика объекта исследования. Водосборная площадь БВДХ приурочена к области развития островной, прерывистой и сплошной многолетней мерзлоты. В пределах Бурейского хребта мощность многолетнемерзлых толщ достигает 200 м при температуре пород до -3°C . Мерзлота встречается на низинных участках водоразделов и склонах рек северной экспозиции. Предпосылками опасных экзогенных геологических процессов, включая оползни, являются сильная раздробленность скальных пород и густая сеть тектонических нарушений [5]. Размельчение пород происходило в результате непосредственно произошедшего оползня и после проведенных

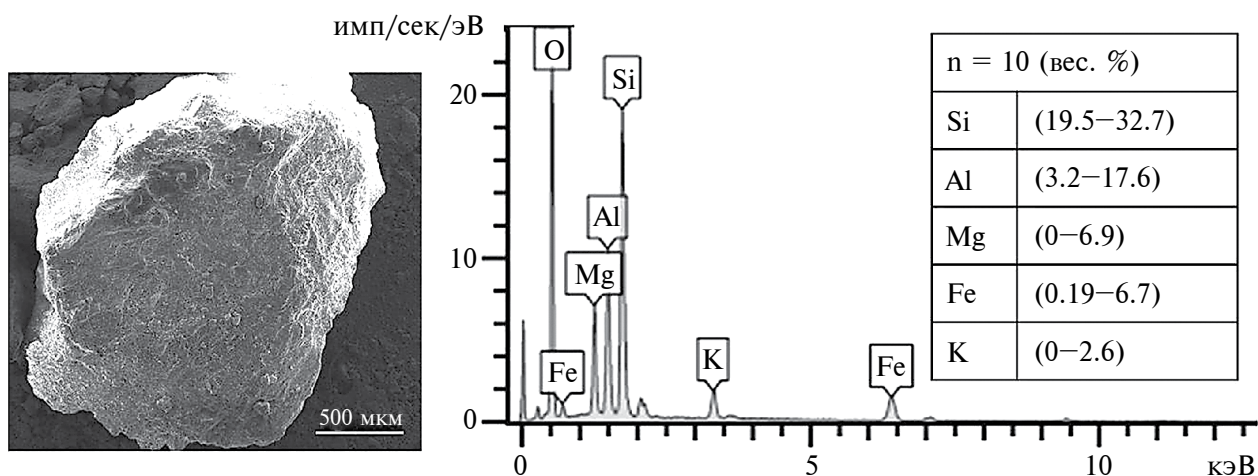


Рис. 1. Общая характеристика элементного состава образцов ОМ, использованных в эксперименте.

взрывных работ для восстановления проточности в водохранилище [4]. Амплитуда сезонного колебания уровней воды в БВДХ между максимальными отметками в начале осени и минимальными весной составляет 20 м. В этом “флуктуационном поясе” происходят трансформация и разрушение горных пород при различной степени их обводненности и разном диапазоне температур.

В районе БВДХ более 80% площади сложено интрузивными породами преимущественно кислого состава. На левом борту БВДХ, где произошёл гигантский оползень, развиты палеозойские интрузии в виде гранитов [5]. Субстрат тела оползня представлен мета-андезитами протерозоя с прорвавшей их экструзией граносиенит-порфиров [3]. Часть тела оползня на северо-западе сложена обломками различного размера (до многометровых глыб) в разной степени выветрелых и деформированных мета-андезитов, а на самом узком участке – обломками свежих, массивных мета-андезитов размером от 10 см до 3 м. Многие глыбы несут выраженные следы гранитизации (гнезда, жильные выделения и скопления кристаллов плагиоклаза и калиевого шпата) [3].

Граниты характеризуются сложной морфологией минералов, входящих в состав этой породы

и высокой микротрещиноватостью. Размер зерен гранитов составляет от 0.2 до 5 мм. Среди крупных зерен гранитов чаще всего встречается полевой шпат с пластинчатой формой кристаллов. К минералам, имеющим размер зерен 0.4–1.0 мм, относится биотит с чешуйчатой структурой поверхности [12]. В основу химического состава гранитов входят SiO_2 68–72%; Al_2O_3 15–18%; Na_2O_3 –6%; Fe_3O_4 1–5%; CaO 1.5–4%; MgO до 1.5% и другие микропримеси.

Описание эксперимента. В качестве образцов использовали обломочный материал (ОМ) тела Бурейского оползня, который просеяли через гранулометрическое сито для получения фракции размером 3 мм. По данным электронного зондирования 10 отдельных зерен из отобранной фракции ОМ установлено, что содержание элементов варьирует в следующих пределах (вес. %): Si (19.5–32.7); Al (3.2–17.6); Mg (0–6.9); Fe (0.19–6.7); K (0–2.6). Образцы, использованные в эксперименте, согласно доминирующему элементу можно условно отнести к кремнийсодержащим минералам (рис. 1).

Перед началом эксперимента образцы отобранной фракции ОМ прокаливали в сушильном шкафу в течение 1 час при температуре 110°C. Навески

Таблица 1. Этапы экспериментального исследования обломочного материала тела оползня на Бурейском водохранилище

Образец	1 этап		2 этап		
Обломочный материал тела оползня, фракция 3 мм	Сухой образец	Замораживание всех образцов при −18°C, 30 сут	ЦЗО образцов при разной температуре оттаивания, 5 циклов, через 7 сут	4°C	
	Образец + вода деионизированная			23°C	
				Образец + среда с пептоном	4°C
					23°C
				23°C	

образца (5 г) загружали в стерильные одноразовые медицинские полимерные контейнеры на 50 мл с крышкой (Berimed, ООО “ЕВРОКЭП”, РФ). Для проведения экспериментальных исследований ЦЗО подготовлены три варианта образцов (табл. 1): сухие, залитые 50-ю мл деионизированной воды и залитые 50-ю мл питательной среды, содержащей 0.2% низкомолекулярных пептидов (пептон).

Деионизированная вода (H_2O/D) для эксперимента была подготовлена на приборе Barnstead EASYpure II (фирма Thermo Scientific, США). По химическим и биологическим показателям она имела следующие характеристики: содержание общего органического углерода после финального фильтра (размер пор 0.2 мкм) не более 5–10 ppb; содержание бактериальных клеток меньше 1 КОЕ/мл.

Первое замораживание длилось 30 сут в морозильной камере при температуре $-18^\circ C$. Две группы образцов отличались условиями оттаивания:

- оттаивание в холодильнике от $-18^\circ C$ до $+4^\circ C$;
- быстрое оттаивание при комнатной температуре от $-18^\circ C$ до $+23^\circ C$.

Все образцы прошли 5 циклов поочередного ЦЗО через 7 сут. Общая продолжительность эксперимента составила 80 сут.

Для дальнейших анализов использовали растворы, отобранные из верхней части контейнера с помощью шприцевых мембранных фильтров с диаметром пор 0.45 мкм (фирма Navigator, КНР). Пробы водных растворов консервировали свежеприготовленным раствором HNO_3 , очищенной методом изотермической перегонки, в соотношении 1 : 1 (HNO_3 ; H_2O). В полипропиленовые пробирки на 50 мл вносили 3 мл раствора HNO_3 и 100 мкл азотнокислого раствора In в концентрации 20 ppm, в качестве внутреннего стандарта. Анализировали водорастворимые формы химических элементов методом ICP-MS на приборе ELAN9000 (фирмы Perkin Elmer, США) по стандартным методикам (ПНД Ф 14.1: 2.4.143–98, 2011).

Предварительно высушенные в стерильном боксе при комнатной температуре образцы помещали на предметные столики с токопроводящей углеродной пленкой и напыляли слоем платины (~ 15 – 20 нм) для формирования поверхностного электропроводящего слоя и отвода электрического заряда, образующегося при электронной бомбардировке.

Исследование отдельных микроструктур на поверхности частиц образцов ОМ после ЦЗО и определение элементного состава в локусах (электронное зондирование) проводили на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) VEGA 3 LMN (TESCAN, Чехия), оснащенный приставкой для энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) с кремний-дрейфовым рентгеновским детектором X-MAX 80 (Oxford Instruments, Великобритания). Электронно-микроскопическое фотографирование объектов проводили в режиме вторичных электронов (SE-детектор) при ускоряющем напряжении 20 кВ.

Определение элементного состава экспериментальных растворов и микроструктуры поверхности образцов ОМ проводили в Хабаровском инновационно-аналитическом центре коллективного пользования на базе Института тектоники и геофизики ДВО РАН.

Доказательство жизнеспособности микроорганизмов. Перед ЦЗО из суспензии размельченного ОМ на азотсодержащей питательной среде (РПА – рыбо-пептонный агар) были выделены палевые, слизистые бактериальные колонии разного размера. Согласно морфологии клеток (короткие, спорообразующие палочки) и окраске по Граму, эти грамположительные бактерии условно отнесены к представителям рода *Bacillus*. На разбавленной питательной среде (РПА:10) росли мицелиальные колонии, характерные для актиномицетов рода *Streptomyces*.

Через 30 сут замораживания образцов ОМ при $-18^\circ C$ был произведен посев суспензии методом “штриха” из вариантов с деионизированной водой (H_2O/D) и пептоном на плотную питательную среду, а частицу сухого образца помещали

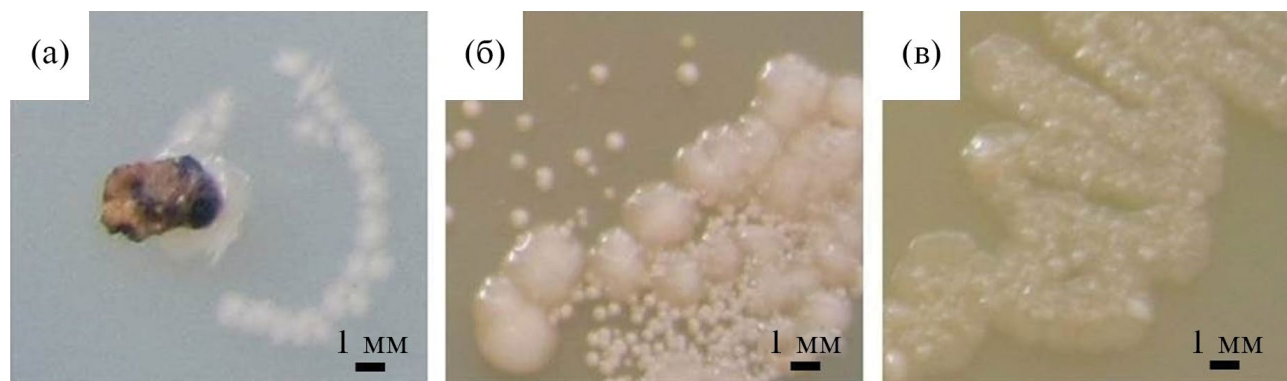


Рис. 2. Доказательство жизнеспособности микроорганизмов после 30 сут замораживания при $-18^\circ C$ образцов ОМ: а – сухой образец; б – образец в H_2O/D ; в – образец в присутствии пептона.

Таблица 2. Выщелачивание химических элементов из образцов ОМ при разной температуре оттаивания и в присутствии органических веществ

Условия эксперимента		Элементы, мкг/л							
		Al	Ca	Mg	Fe	Mn	As	Hg	Pb
H ₂ O/Д	+4°C	17.91	952.2	412.5	<0.001	2.23	<0.001	0.02	2.22
	+23°C	43.9	907.2	370.2	<0.001	6.54	<0.001	0.003	<0.001
Пептон	+4°C	69.51	9824.2	17706.4	99.46	27.39	3.01	0.08	1.06
	+23°C	131.91	8716.2	19738.7	79.03	75.17	8.53	0.19	<0.001

непосредственно на поверхность среды (рис. 2). Через 7 сут вокруг частицы сухого образца (см. рис. 2а) на плотной питательной среде обнаружили колонии микроорганизмов с характерным для актиномицетов мицелиальным ростом, которые могли сохранять свою жизнеспособность при замораживании, образуя споры. В вариантах с H₂O/Д и с добавкой пептона в качестве источника С и N свою жизнеспособность сохраняли бактерии – продуценты экзополисахаридов, образующие слизистую биомассу (см. рис. 2б, в). В период оттаивания эти микроорганизмы проявляли активность и взаимодействовали с поверхностью образцов ОМ, участвуя в выщелачивании элементов в водную среду.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Количественная оценка влияния микроорганизмов на скорость растворения минералов является одной из нерешенных задач при моделировании взаимодействия воды с горными породами [32].

Анализ элементного состава растворов в вариантах эксперимента с образцами ОМ, помещенными в H₂O/Д, показал, что концентрации многих металлов были ниже пределов обнаружения прибора (Fe, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Ag, Cd, Tl, Bi). Условия размораживания не оказывали влияния на особенности распределения данных химических элементов (табл. 2). Однако в растворах, отобранных после 5 ЦЗО при температуре оттаивания 23°C, отмечено увеличение концентрации водорастворимых форм Al и Mn. Содержание водорастворимой формы железа в H₂O/Д было ниже пределов обнаружения. В исследованиях биогенной трансформации базальтов, установлено, что растворимая форма Fe²⁺, поступившая из зерен базальта, была немедленно ферментативно окислена *Acidithiobacillus ferrooxidans* до Fe³⁺ [31]. Для термокарстовых вод установлено, что после нескольких циклов замораживания/оттаивания происходит снижение содержаний Fe, Al и Mn, за счет осаждения оксигидроксидов этих металлов [27]. В условиях кислой среды микробные комплексы плохо развивались и не оказывали

влияния на кристаллическую решетку силикатных пород [35].

Содержание халькофильных элементов в H₂O/Д зависело от температуры оттаивания (см. табл. 2). Так Hg и Pb присутствовали в повышенных концентрациях в растворах при более длительном оттаивании при температуре +4°C. При анализе валового содержания ртути и свинца в образцах ОМ оползня установлены значительные концентрации этих элементов (4.07 мкг/г и 25.28 мкг/г соответственно). Этот факт может служить предпосылкой повышенного содержания этих элементов в воде вокруг оползня в зимне-весенний период. Содержание As в этом варианте эксперимента коррелировало с поведением железа, это может быть связано с его адсорбцией на поверхности частиц совместно с нерастворимой формой Fe. Известно, что в природных водах As может адсорбироваться на оксигидроксидах Fe [14].

В вариантах эксперимента с пептоном установлены значительные отличия содержания химических элементов по сравнению с предыдущим вариантом. Так, для петрогенных металлов Al, Mg, Fe, Mn и халькофильных элементов As, Hg за исключением Pb наблюдали значительное увеличение концентраций в растворе при 23°C. Содержание Pb в двух вариантах экспериментального раствора при быстром оттаивании было ниже пределов обнаружения. Из табл. 2. видно, что в присутствии пептона (источник С и N) не зависимо от температурного диапазона оттаивания происходит активный процесс выщелачивания элементов за счет метаболизма микроорганизмов.

Распределение содержания Hg *in vitro* отражает зависимость металлоида от присутствия ОВ. Так в вариантах с добавлением пептидов концентрация Hg увеличивалась более существенно при температуре 23°C. Подобная зависимость была установлена ранее на фронте таяния ММП с максимальной толщиной активного слоя, где могло происходить усиленное образование ртутьсодержащего взвешенного вещества [21]. Полученные данные не противоречат исследованиям других авторов. Так было доказано, что бактерии могут существенно влиять на скорость растворения

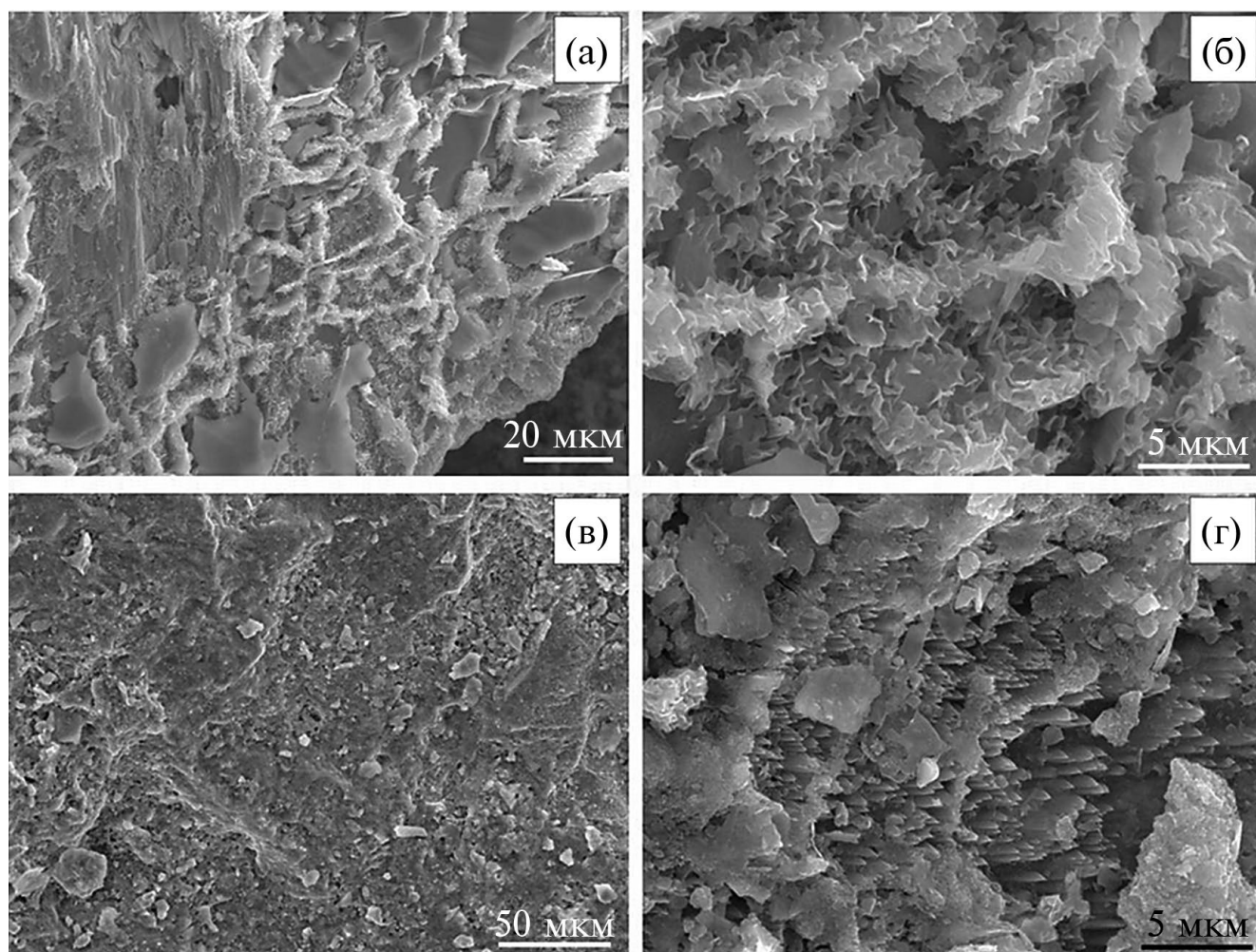


Рис. 3. СЭМ-изображения поверхности образца ОМ в деионизированной воде при температуре оттаивания: а, б – 4°C (×2000; ×10000); в, г – 23°C (×1000; ×10000).

алюмосиликатов, оксидов Al и Fe в условиях наземных экосистем [39]. Например, при исследовании трансформации оливина было показано, что в нейтральных средах в присутствии ОВ бактериальные биопленки оказывают выраженное влияние на его растворение [37]. Некоторые бактериальные метаболиты и продукты лизиса клеток образуют комплексы с Al^{3+} на поверхности минералов и в водном растворе, способствуя разрыву связей Al–O в кристаллической решетке несмотря на то, что экзополисахариды могут ингибировать скорость растворения некоторых элементов, блокируя участки отслоения катионов с поверхности минерала [19]. Кроме того, выделение отдельными штаммами бактерий фенолов и органических кислот приводит к образованию комплексных соединений с двухвалентными металлами. Например, штаммы *Burkholderia* sp. и *Aeromonas* sp. повышали растворимость Ca и Mg из силикатной матрицы [29].

Изменение микроструктуры поверхности образцов ОМ. С использованием метода СЭМ было показано, что трансформация образцов гранита

связана с минеральным составом, морфологией минералов и взаимодействием между минеральными частицами. Авторы [12] считают, что микротрещины приводят к разрыву по плоскостям спайности гранитных минералов под воздействием внешних сил, не называя их. Однако другие исследователи [13] пришли к выводу, что изменение температуры не является важным фактором разрушения горных пород без присутствия влаги, тогда как присутствие в поровом пространстве воды в твердой или жидкой фазе, играет ключевую роль в процессах разрушения (дезинтеграции) породы.

В наших экспериментах в результате ЦЗО сухой породы при разной температуре оттаивания поверхность частиц изменялась незначительно. На СЭМ-изображениях поверхность частиц образцов ОМ в большей степени покрыта чешуйчатыми микроструктурами.

Мы предполагали, что, используя H_2O/D можно получить более четкий ответ о влиянии непосредственно влаги на трансформацию поверхности

образца ОМ при ЦЗО. На СЭМ-изображениях (рис. 3) видно, что микроструктура поверхности частиц отличалась при разной температуре оттаивания.

Особенно заметны явные различия при увеличении $\times 10000$ (см. рис. 3б, г). При температуре оттаивания в 4°C отмечена повышенная эрозия поверхности частиц в виде микроскладок. Подобные “гофрированные” микроструктуры, некоторые авторы называют волнистыми кристаллами монтмориллонита [11], или идентифицируют как волокнистый иллит [9]. При 23°C отмечено образование разнообразных изоморфных микроструктур, отличающихся непостоянством элементного состава. Столбчатые микроструктуры представлены следующими основными элементами (вес. %): Si-20.3; Ca-12.1; Mg-7.7; Fe-5.9; Al-1.8. Среди пластинчатых микроструктур доминировали по вес. % либо Si (21.4), либо Fe (53.9). Рыхлые структуры напоминали биопленки с аккумулярованными в них различными элементами, включая фосфор.

Хорошо выраженные на СЭМ-изображениях ячеистые микроструктуры (см. рис. 3б) чаще всего характерны для смектита, хотя формирование иллита тоже связывают с образованием волокнистой текстуры. Например, на периферии пластинчатых частиц аутигенного иллита иногда формируются решетчатые или волокнистые микроструктуры, похожие на смектит. Однако после обработки монтмориллонита пресной водой происходила морфологическая трансформация агрегатов неправильной ячеистой формы в аморфный гель [44].

Превращение глинистых минералов в другие фазы довольно сложный процесс. Под влиянием различных физико-химических и биогенных факторов может происходить дезинтеграция пород, затем измельчение, растворение минералов и осаждение новых фаз. Мы предполагаем, что эти микроструктурные различия могут быть связаны с функциональным развитием разных групп литотрофных микроорганизмов, имеющих свои температурные предпочтения и обладающих способностью продуцировать экзополимерные соединения. Эти метаболиты способствуют лучшей адгезии бактериальных клеток к поверхности, что приводит к разрушению кристаллической решетки и выщелачиванию отдельных элементов в водную среду. Выше было показано (см. табл. 2), что в водном растворе состав элементов и их концентрация зависели от температуры оттаивания, повлиявшей на метаболизм микроорганизмов.

В нашем эксперименте бактериальный вклад в трансформацию поверхности частиц ОМ был продемонстрирован в варианте, содержащем в водном растворе низкомолекулярные пептиды, которые выступали в качестве источника С и N для микроорганизмов. После ЦЗО и температуре оттаивания 4°C на СЭМ-изображениях (рис. 4)

были обнаружены сформированные микроколони бактерии, а при 23°C на силикатной матрице разнообразные биогенные микроструктуры с повышенным содержанием С. Можно предположить, что при повышении температуры происходили более существенные преобразования поверхности образцов ОМ бактериальными биопленками. Об этом свидетельствуют снижение доли кремния и повышение содержания железа в биогенных микроструктурах на минеральной поверхности.

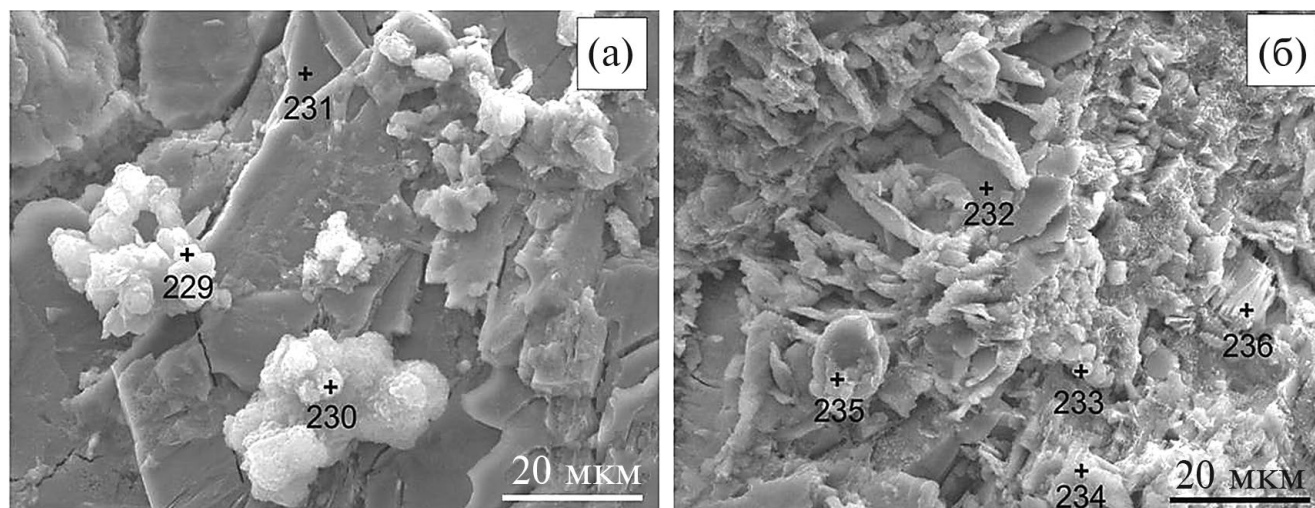
В результате проведенных нами исследований отмечены существенные различия в биовыщелачивании элементов из кремнийсодержащих минералов, присутствующих в образцах ОМ оползня в варианте с азотсодержащими ОВ и при температуре быстрого оттаивания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В водных объектах циркумполярных регионов, особенно в зонах, дренирующих оттаивающие почвы, не вызывает сомнения аллохтонный генезис органических веществ [33, 24]. Значительный эффект от поступления ОВ с поверхностным стоком наблюдали в водоемах при оттаивании ММП и обнажении горных пород [43]. Однако риски загрязнения природных вод водохранилища от поступающих с поверхностным стоком ОВ и различных элементов возрастают не только вследствие таяния ММП в зоне влияния Бурейской ГЭС. “Горячей точкой” на неопределенный период времени будет выступать место локализации зимнего оползня. Ухудшение экологического благополучия на БВДХ связано с несколькими причинами: это значительный объем горных пород тела оползня, погруженных в воду; большое количество затопленной древесины после прохождения волны цунами и снос верхнего слоя почвы с берегов, включая терригенные органические вещества.

Проведенные исследования трансформации кремнийсодержащих минералов *in vitro* при разном сочетании абиотических условий свидетельствуют о важной роли микробиологического фактора. Даже в период ледостава при взаимодействии горных пород с водой может происходить разрушение кристаллической решетки минералов, и в воду вокруг оползня будут поступать различные литогенные элементы. Для БВДХ этот процесс может существенно меняться при сезонных переходах температурного режима.

Экспериментально показано, что в результате циклического заморзания/оттаивания в зависимости от температуры оттаивания и присутствия ОВ метаболизм микроорганизмов-деструкторов может существенно изменяться. Установлено, что микробный автохтонный пул, присутствующий на ОМ тела оползня, способен проявлять активность даже в отсутствии легкодоступных ОВ. Так



Элементы/ спектры	229 МБ	230 МБ	231 фон	232 Фон	233 СФ	234 КА	235 ЧМ	236 СП
C	22.8	26.3	-	-	17.8	13.2	14.4	13.7
Si	5.6	4.9	22.7	19.5	6.9	14.2	11.9	13.1
Al	5.3	2.8	10.3	16.9	4.4	7.6	7.7	2.9
Fe	0.9	0.4	0.2	2.9	3.4	4.9	7.1	3.4
Ca	6.4	5.5	1.7	-	19.9	0.6	-	6.1
P	4.1	3.6	-	-	7.8	-	-	-
O	53.1	53.4	57.3	60.1	35.2	54.3	48.5	55.1

Рис. 4. СЭМ-изображение и элементный состав отдельных локусов поверхности частицы ОМ в водном растворе с пептоном после циклического заморозания (-18°C) и оттаивании при температуре: а – 4°C (спектры 229–231); б – 23°C (спектры 232–236). МБ – микроколонию бактерий, СФ – сфероиды; КА – коллоидные агломераты; ЧМ – чешуйчатая микроструктура; СП – стопка из пластинок.

при взаимодействии образцов ОМ тела оползня с деионизированной водой в условиях циклического заморозания/оттаивания с помощью сканирующей электронной микроскопии получены доказательства изменения микроструктуры их поверхности под влиянием образующихся биопленок литотрофных бактерий.

Максимальный эффект трансформации поверхности образцов при заморозании/оттаивании наблюдали в присутствии легкодоступного источника углерода и азота, представленного низкомолекулярными пептидами. При этих условиях в водную среду из минеральной матрицы в значительном количестве поступали Al, Mg, Mn, As и Hg. Яркое выраженное различие в поведении ионов Fe оказывали такие факторы, как деионизированная вода и низкомолекулярные биодоступные ОВ. В результате выветривания горных пород водные экосистемы в зависимости от динамики биогеохимических процессов могут быть лимитированы ионами железа, которые как известно играют важную роль в биопродуктивности водных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глушакова А.М., Лысак Л.В., Качалкин А.В. и др. Трансформация микробных комплексов в компонентах почвенных конструкций разного генезиса (почва, торф, песок) при процессах замораживания–оттаивания // Микробиология. 2021. Т. 90. № 2. С. 166–178.
2. Зеркаль О.В., Махинов А.Н., Кудымов А.В. и др. Бурейский оползень 11 декабря 2018 г. Условия формирования и особенности механизма развития // ГеоРиск. 2019. Т. XIII. № 4. С. 18–30.
3. Коковкин А.А. Феномен Бурейского оползня: данные полевых исследований и модель формирования // Отечественная геология. 2020. № 4–5. С. 48–63.
4. Кондратьева Л.М., Литвиненко З.Н., Филиппова Г.М. Экологический риск образования летучих органических веществ после крупного оползня // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. 2020. № 3. С. 167–174.
5. Кулаков В.В., Махинов А.Н., Ким В.И., Остроухов А.В. Катастрофический оползень и цунами в водохранилище Бурейской ГЭС (бассейн Амура) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. 2019. № 3. С. 12–20.
6. Махинов А.Н., Ким В.И., Остроухов А.В., Матвеев Д.В. Крупный оползень в долине реки Бурея и цунами в водохранилище Бурейской ГЭС // Вестник

- Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2019. № 2. С. 35–44.
7. Махинов А.Н., Махинова А.Ф., Левшина С.И. Оценка смыва водно-ледяным цунами почвенного покрова и качество воды в районе оползня на Бурейском водохранилище // Метеорология и гидрология. 2020. № 11. С. 64–73.
 8. Andres N., Badoux A. The Swiss flood and landslide damage database: normalisation and trends // Journal of Flood Risk Management. 2018. e12510 (12 pp.).
 9. Christidis G. Industrial clays // EMU Notes in Mineralogy. 2011. Chapter 9. P. 341–414.
 10. Dreischmeier K., Budke C., Wiehemeier L. et al. Boreal pollen contain ice-nucleating as well as ice-binding “antifreeze” polysaccharides // Sci. Rep. 2017. V. 7. P. 1–13.
 11. Fesharaki O., Garcia-Romero E., Cuevas-Gonzalez J., Lopez-Martinez N. Clay mineral genesis and chemical evolution in the Miocene sediments of Samosaguas, Madrid Basin, Spain // Clay Minerals. 2007. V. 42. P. 187–201.
 12. Gao M., Li T., Zhu J., Yin H., Yang Y. An Analysis of Relationship between the Microfracture Features and Mineral Morphology of Granite // Advances in Civil Engineering. 2021. Article ID4765731. <https://doi.org/10.1155/2021/4765731>
 13. Garcia B., Lemelle L., Rose-Koga E. et al. An experimental model approach of biologically-assisted silicate dissolution with olivine and *Escherichia coli* – Impact on chemical weathering of mafic rocks and atmospheric CO₂ drawdown // Appl. Geochem. 2013. V. 31. P. 216–227.
 14. Guenet H., Davranche M., Vantelon D. et al. Evidence of organic matter control on As oxidation by iron oxides in riparian wetlands // Chemical Geology. 2016. V. 439. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.06.023>
 15. Gudbrandsson S., Wolff-Boenisch D., Gislason S.R., Oelkers E.H. An experimental study of crystalline basalt dissolution from 2 ≤ pH ≤ 11 and temperatures from 5 to 75°C // Geochim. Cosmochim. Acta. 2011. V. 75. P. 5496–5509.
 16. Hou N., Wen L., Cao H., Liu K., An X., Li D., Wang H., Du X., Li Ch. Role of psychotrophic bacteria in organic domestic waste composting in cold regions of China // Bioresour Technol. 2017. V. 236. P. 20–28.
 17. Keuschnig C., Larose C., Rudner M. et al. Reduced methane emissions in former permafrost soils driven by vegetation and microbial changes following drainage // Global Change Biology. 2022. V. 28 (10). P. 3411–3425.
 18. Kong L. W., Zeng Z. X., Bai W., Wang M. Engineering geological properties of weathered swelling mudstones and their effects on the landslids occurrence in the Yanji section of the Jilin-Hunchun high-speed railway // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2018. V. 77. N. 4. P. 1491–1503.
 19. Lee J.-U. and Fein J.B. Experimental study of the effects of *Bacillus subtilis* on gibbsite dissolution rates under near-neutral pH and nutrient-poor conditions // Chem. Geol. 2000. V. 166. P. 193–202.
 20. Li T., Kong L., Liu B. The California Bearing Ratio and Pore Structure Characteristics of Weakly Expansive Soil in Frozen Areas // Appl. Sci. 2020. V. 10. e 7576.
 21. Lim A.G., Sonke J.E., Krickov I.V. et al. Enhanced particulate Hg export at the permafrost boundary, western Siberia // Environmental Pollution. 2019. V. 254. e 113083.
 22. Luo J., Tang L., Ling X., Geng L. Experimental and analytical investigation on frost heave characteristics of an unsaturated moderately expansive clay // Cold Reg. Sci. Technol. 2018. V. 155. P. 343–353.
 23. Manyapu V., Lepcha A., Sharma S.K., Kumar R. Role of psychotrophic bacteria and cold-active enzymes in composting methods adopted in cold regions. Chapter One // Advances in Appl. Microbiology. 2022. V. 121. P. 1–26.
 24. Muster S., Roth K., Langer M. et al. PerL: A circum-Arctic Permafrost Region Pond and Lake database // Earth Syst. Sci. Data. 2017. V. 9. P. 317–348. <https://doi.org/10.5194/essd-9-317-2017>
 25. O'Donnell J.A., Aiken G.R., Walvoord M.A. et al. Using dissolved organic matter age and composition to detect permafrost thaw in boreal watersheds of interior Alaska // J. Geophys. Res. Biogeosci. 2014. V. 119. P. 2155–2170. <https://doi.org/10.1002/2014JG002695>
 26. Patton A.I., Rathburn S.L., Capps D.M. Landslide response to climate change in permafrost regions // Geomorphology. 2019. V. 340. P. 116–128.
 27. Payandi-Rolland D., Shirokova L.S., Labonne F. et al. Impact of freeze-thaw cycles on organic carbon and metals in waters of permafrost peatlands // Chemosphere. 2021. V. 279. e 130510.
 28. Puente M.E., Rodriguez-Jaramillo M.C., Li C.Y., Bashan Y. Image analysis for quantification of bacterial rock weathering // J. Microbiol. Methods. 2006. V. 64. P. 275–286.
 29. Santi L.P., Goenadi D.H. Solubilization of silicate from quartz mineral by potential silicate solubilizing bacteria // Menara Perkebunan. 2017. V. 85 (2). P. 95–104
 30. Schwidetzky R., Lukas M., YazdanYar A., Kunert A.T., et al. Specific Ion–Protein Interactions Influence Bacterial Ice Nucleation // Chem. Eur. J. 2021. V. 27. P. 7402–7407.
 31. Sekerci F., Balci N. Microbial Acid Sulfate Weathering of Basaltic Rocks: Implication for Enzymatic Reactions // Aquat. Geochem. 2022. V. 28. P. 155–184.
 32. Shirokova L.S., Bénézeth P., Pokrovsky O.S. et al. Effect of the heterotrophic bacterium *Pseudomonas reactans* on olivine dissolution kinetics and implications for CO₂ storage in basalts // Geochim. Cosmochim. Acta. 2012. V. 80. P. 30–50.
 33. Solomon C.T., Jones S.E., Weidel B.C. et al. Ecosystem Consequences of Changing Inputs of Terrestrial Dissolved Organic Matter to Lakes: Current Knowledge and Future Challenges // Ecosystems. 2015. V. 18. P. 376–389.
 34. Song W., Ogawa N., Oguchi C.T., Hatta T., Matsukura Y. Effect of *Bacillus subtilis* on granite weathering: a laboratory experiment // Catena. 2007. V. 70. P. 275–281.
 35. Stockmann G.J., Shirokova L.S., Pokrovsky O.S. et al. Does the presence of heterotrophic bacterium *Pseudomonas reactans* affect basaltic glass dissolution rates? // Chem. Geol. 2011. V. 296–297. P. 1–18.
 36. Struvay C., Feller G. Optimization to Low Temperature Activity in Psychrophilic Enzymes // Int. Journal of Molecular Sciences. 2012. V. 13(9). P. 11643–11665.
 37. Štyriaková I., Štyriak I., Oberhänsli H. Rock weathering by indigenous heterotrophic bacteria of *Bacillus spp.* at different temperature: a laboratory experiment // Mineralogy and Petrology. 2012. V. 105 (3–4). P. 135–144. <https://doi.org/10.1007/s00710-012-0201-2>
 38. Tribelli P.M., López N.I. Reporting Key Features in Cold-Adapted Bacteria // Life. 2018. V. 8. № 8. <https://doi.org/10.3390/life8010008>
 39. Uroz S., Calvaruso C., Turpault M.-P., Frey-Klett P. Mineral weathering by bacteria: ecology, actors and mechanisms // Trends Microbiol. 2009. V. 17. P. 378–387.
 40. Vincent W.F., Lemay M., Allard M. Arctic permafrost landscapes in transition: Towards an integrated Earth system approach // Arct. Sci. 2017. V. 3. P. 39–64. [doi:10.1139/as-2016-0027](https://doi.org/10.1139/as-2016-0027)

41. Wang Y., Li C.H., Liu H., Han J.Q. Fracture failure analysis of freeze–thawed granite containing natural fracture under uniaxial multi-level cyclic loads // *Theoretical and Appl. Fracture Mechanics*. 2020. V. 110. e 102782. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102782>
42. Wang Y., Yi X., Gao S., Liu H. Laboratory Investigation on the Effects of Natural Fracture on Fracture Evolution of Granite Exposed to Freeze-Thaw-Cyclic (FTC) Loads // *Geofluids*. 2021. Article ID6650616. 20 pages. <https://doi.org/10.1155/2021/6650616>
43. Wauthy M., Rautio M., Christoffersen K.S., Forsstrom L. et al. Increasing dominance of terrigenous organic matter in circumpolar freshwaters due to permafrost thaw // *Limnology and Oceanography Letters*. 2018. N. 3. P. 186–198.
44. Wilson M.J., Wilson L., Patey I. The influence of individual clay minerals on formation damage of reservoir sandstones: a critical review with some new insights // *Clay Minerals*. 2014. V. 49. P. 147–164.
45. Yang Z., Jianhang Lv., Shi W., Zhang Q. et al. Model test study on stability factors of expansive soil slopes with different initial slope ratios under freeze–thaw conditions // *Appl. Sci*. 2021. V. 11. e 8480. <https://doi.org/10.3390/app11188480>.
46. Yang Y., Zhang N., Wang J. Study on the Effect of Negative Temperature Change on the Fracture Morphology of Granite under Impact // *Geofluids*. 2022. Article ID4918680. 13 p. <https://doi.org/10.1155/2022/4918680>
47. Zhang D., Chen A.Q., Xiong D.H., Liu G.C. Effect of moisture and temperature conditions on the decay rate of purple mudstone in south-western China // *Geomorphology*. 2013. V. 182. P. 125–132.
48. Zheng Q., Shen S-L., Zhou A-N., Cai H. Investigation of Landslides that Occurred in August on the Chengdu–Kunming Railway, Sichuan, China // *Geosciences*. 2019. V. 9. № 12. e 497.

ECOLOGICAL AND GEOCHEMICAL STUDIES OF CLASTIC MATERIAL FROM THE BUREYA LANDSLIDE AFTER CYCLIC FREEZING/THAWING IN VITRO

L. M. Kondratyeva^{a, #}, E. M. Golubeva^{b, c, ##}, N. S. Konovalova^{b, ###}

^a*Institute of Water and Ecology Problems, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Dikopol'tseva 56, Khabarovsk, 680000 Russia*

^b*Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Kim Yu Chen 65, Khabarovsk, 680000 Russia*

^c*Pacific National University, ul. Tikhookeanskaya 136, Khabarovsk, 680035 Russia*

[#]*E-mail: kondratevalm@gmail.com*

^{##}*E-mail: evg8302@yandex.ru*

^{###}*E-mail: turtle_83@rambler.ru*

The paper presents the results of experimental study (*in vitro*) of the transformation of clastic material (CM) sampled from a landslide body at the Bureya water reservoir. CM samples are considered as a model for assessing the influence of abiogenic and biogenic factors on the transformation (destruction, dissolution) of Si-containing minerals under various conditions of cyclic freezing/thawing, i.e., the dry sample; the samples placed in deionized water and in the presence of a solution of low molecular weight peptides. Freezing was carried out at a temperature of –18 °C, and thawing at a different temperature range (+4 °C and +23 °C). The elemental composition of aqueous solutions was determined by ICP-MS, and the microstructure of the CM surface was determined using scanning electron microscopy. As a result of 5 cycles after 7 days of freezing/thawing of CM samples in deionized water, the content of water-soluble forms of chemical elements (Fe, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Ag, Cd, Tl, Bi, As) was below the detection limits of the device (< 0.001 µg/l). However, in the presence of a nutrient medium with peptone and a natural microbial consortium that retained its viability, the concentrations of a number of elements (Al, Ca, Mg, Fe, Mn, As, Hg) in the aquatic environment increased significantly. According to SEM images, a significant change in the microstructure of the surface of the samples CM occurred regardless of the thawing temperature when microorganisms were activated by low-molecular peptides. The formation of biofilms on the surface of CM grains was accompanied by the formation of various isomorphic microaggregates.

Keywords: landslide, freeze/thaw, Si-containing minerals, elemental composition, SEM images

REFERENCES

1. Glushakova, A.M., Lysak, L.V., Kachalkin, A.V., et al. [Transformation of microbial complexes in the component of soil constructions of various genesis (soil, peat, sand) upon freezing/thawing]. *Mikrobiologiya*, 2021, vol. 90, no. 2, pp. 166–178. (in Russian)
2. Zerkal', O.V., Makhinov, A.N., Kudymov, A.V., et al. [Bureya landslide on December 11, 2018. Formation conditions and development mechanism specifics]. *GeoRisk*, 2019, vol. XIII, no. 4, pp. 18–30. (in Russian)
3. Kokovkin, A.A. [Bureya landslide phenomenon: field investigation results and formation model]. *Otechestvennaya geologiya*, 2020, nos. 4–5, pp. 48–63. (in Russian)
4. Kondratyeva, L.M., Litvinenko, Z.N., Filippova, G.M. [Ecological risk of formation of volatile organic substances after a large landslide]. *Geoekologiya*, 2020, no. 3, pp. 167–174. (in Russian)
5. Kulakov, V.V., Makhinov, A.N., Kim, V.I., Ostroykhov, A.V. [Catastrophic landslide and tsunami in the Bureya HPP reservoir (the Amur river basin)]. *Geoekologiya*, 2019, no. 3, pp. 12–20 (in Russian)
6. Makhinov, A.N., Kim, V.I., Ostroykhov, A.V., Matveenko, D.V. [A major landslide in the Bureya River valley and tsunami in the Bureya HPP reservoir]. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya RAS*, 2019, no. 2, pp. 35–44. (in Russian)
7. Makhinov, A.N., Makhinova, A.F., Levshina, S.I. [Assessment of soil cover wash-off by water-ice tsunami and water quality in the area of landslide at the Bureya water reservoir]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2020, no. 11, pp. 64–73. (in Russian)
8. Andres, N., Badoux, A. The Swiss flood and landslide damage database: normalisation and trends. *Journal of Flood Risk Management*, 2018, e12510 (12 pp.).
9. Christidis, G. Industrial clays. *EMU Notes in Mineralogy*, 2011. Chapter 9, pp. 341–414.
10. Dreischmeier, K., Budke, C., Wiehemeier, L., et al. Boreal pollen contain ice-nucleating as well as ice-binding “antifreeze” polysaccharides. *Sci. Rep.*, 2017, vol. 7, pp. 1–13.
11. Fesharaki, O., Garcia-Romero, E., Cuevas-Gonzalez, J., Lopez-Martinez, N. Clay mineral genesis and chemical evolution in the Miocene sediments of Samosaguas, Madrid Basin, Spain. *Clay minerals*, 2007, vol. 42, pp. 187–201.
12. Gao, M., Li, T., Zhu, J., Yin, H., Yang, Y. An analysis of relationship between the microfracture features and mineral morphology of granite. *Advances in Civil Engineering*, 2021, Article ID4765731. <https://doi.org/10.1155/2021/4765731>
13. Garcia, B., Lemelle, L., Rose-Kog, a E., et al. An experimental model approach of biologically-assisted silicate dissolution with olivine and *Escherichia coli* – Impact on chemical weathering of mafic rocks and atmospheric CO₂ drawdown. *Appl. Geochem.*, 2013, vol. 31, pp. 216–227.
14. Guenet, H., Davranche, M., Vantelon, D., et al. Evidence of organic matter control on As oxidation by iron oxides in riparian wetlands. *Chemical Geology*, 2016, vol. 439. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.06.023>
15. Gudbrandsson, S., Wolff-Boenisch, D., Gislason, S.R., Oelkers, E.H. An experimental study of crystalline basalt dissolution from 2 ≤ pH ≤ 11 and temperatures from 5 to 75°C. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2011, vol. 75, pp. 5496–5509.
16. Hou, N., Wen, L., Cao, H., Liu, K., et al. Role of psychrotrophic bacteria in organic domestic waste composting in cold regions of China. *Bioresour Technol.*, 2017, vol. 236, pp. 20–28.
17. Keuschnig, C., Larose, C., Rudner, M., et al. Reduced methane emissions in former permafrost soils driven by vegetation and microbial changes following drainage. *Global Change Biology*, 2022, vol. 28 (10), pp. 3411–3425.
18. Kong, L.W., Zeng, Z.X., Bai, W., Wang, M. Engineering geological properties of weathered swelling mudstones and their effects on the landslids occurrence in the Yanji section of the Jilin-Hunchun high-speed railway. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2018, vol. 77, no. 4, pp. 1491–1503.
19. Lee, J.-U., Fein, J.B. Experimental study of the effects of *Bacillus subtilis* on gibbsite dissolution rates under near-neutral pH and nutrient-poor conditions. *Chem. Geol.*, 2000, vol. 166, pp. 193–202.
20. Li, T., Kong, L., Liu, B. The California bearing ratio and pore structure characteristics of weakly expansive soil in frozen areas. *Appl. Sci.*, 2020, vol. 10, e 7576.
21. Lim, A.G., Sonke, J.E., Krickov, I.V., et al. Enhanced particulate Hg export at the permafrost boundary, western Siberia. *Environmental Pollution*, 2019, vol. 254, e 113083.
22. Luo, J., Tang, L., Ling, X., Geng, L. Experimental and analytical investigation on frost heave characteristics of an unsaturated moderately expansive clay. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2018, vol. 155, pp. 343–353.
23. Manyapu, V., Lepcha, A., Sharma, S.K., Kumar, R. Role of psychrotrophic bacteria and cold-active enzymes in composting methods adopted in cold regions. Chapter One. *Advances in Appl. Microbiology*, 2022, vol. 121, pp. 1–26.
24. Muster, S., Roth, K., Langer, M. et al. PeRL: A circum-Arctic permafrost region pond and lake database. *Earth Syst. Sci. Data*, 2017, vol. 9, pp. 317–348. <https://doi.org/10.5194/essd-9-317-2017>
25. O'Donnell, J.A., Aiken, G.R., Walvoord, M.A., et al. Using dissolved organic matter age and composition to detect permafrost thaw in boreal watersheds of interior Alaska. *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 2014, vol. 119, pp. 2155–2170. <https://doi.org/10.1002/2014JG002695>
26. Patton, A.I., Rathburn, S.L., Capps, D.M. Landslide response to climate change in permafrost regions. *Geomorphology*, 2019, vol. 340, pp. 116–128.
27. Payandi-Rolland, D., Shirokova, L.S., Labonne, F., et al. Impact of freeze-thaw cycles on organic carbon and metals in waters of permafrost peatlands. *Chemosphere*, 2021, vol. 279, e 130510.
28. Puente, M.E., Rodriguez-Jaramillo, M.C., Li, C.Y., Bashan, Y. Image analysis for quantification of bacterial rock weathering. *J. Microbiol. Methods*, 2006, vol. 64, pp. 275–286.
29. Santi, L.P., Goenadi, D.H. Solubilization of silicate from quartz mineral by potential silicate solubilizing bacteria. *Menara Perkebunan*, 2017, vol. 85 (2), pp. 95–104
30. Schwidetzky, R., Lukas, M., Yazdan, Y.A., Kunert, A.T., et al. Specific ion–protein interactions influence bacterial ice nucleation. *Chem. Eur. J.*, 2021, vol. 27, pp. 7402–7407.
31. Sekerci, F., Balci, N. Microbial acid sulfate weathering of basaltic rocks: implication for enzymatic reactions. *Aquat. Geochem.*, 2022, vol. 28, pp. 155–184.
32. Shirokova, L.S., Bénézet, P., Pokrovsky, O.S., et al. Effect of the heterotrophic bacterium *Pseudomonas reactans* on olivine dissolution kinetics and implications for CO₂ storage in basalts. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 2012, vol. 80, pp. 30–50.
33. Solomon, C.T., Jones, S.E., Weidel, B.C., et al. Ecosystem consequences of changing inputs of terrestrial dissolved organic matter to lakes: current knowledge and future challenges. *Ecosystems*, 2015, vol. 18, pp. 376–389.
34. Song, W., Ogawa, N., Oguchi, C.T., Hatt, T., Matsukura, Y. Effect of *Bacillus subtilis* on granite weathering: a laboratory experiment. *Catena*, 2007, vol. 70, pp. 275–281.

35. Stockmann, G.J., Shirokova, L.S., Pokrovsky, O.S., et al. Does the presence of heterotrophic bacterium *Pseudomonas* reactans affect basaltic glass dissolution rates? *Chem. Geol.*, 2011, vol. 296–297, pp. 1–18.
36. Struvay, C., Feller, G. Optimization to low temperature activity in psychrophilic enzymes. *Int. Journal of Molecular Sciences*, 2012, vol. 13(9), pp. 11643–11665.
37. Štyriaková, I., Štyriak, I., Oberhänsli, H. Rock weathering by indigenous heterotrophic bacteria of *Bacillus* spp. at different temperature: a laboratory experiment. *Mineralogy and Petrology*, 2012, vol. 105 (3–4), pp. 135–144. <https://doi.org/10.1007/s00710-012-0201-2>
38. Tribelli, P.M., López, N.I. Reporting key features in cold-adapted bacteria. *Life*, 2018, vol. 8, no. 8. <https://doi.org/10.3390/life8010008>
39. Uroz, S., Calvaruso, C., Turpault, M.-P., Frey-Klett, P. Mineral weathering by bacteria: ecology, actors and mechanisms. *Trends Microbiol.*, 2009, vol. 17, pp. 378–387.
40. Vincent, W.F., Lemay, M., Allard, M. Arctic permafrost landscapes in transition: towards an integrated Earth system approach. *Arct. Sci.*, 2017, vol. 3, pp. 39–64. doi:10.1139/as-2016-0027
41. Wang, Y., Li, C.H., Liu, H., Han, J.Q. Fracture failure analysis of freeze–thawed granite containing natural fracture under uniaxial multi-level cyclic loads. *Theoretical and Appl. Fracture Mechanics*, 2020, vol. 110. e 102782. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102782>
42. Wang, Y., Yi, X., Gao, S., Liu, H. Laboratory investigation on the effects of natural fracture on fracture evolution of granite exposed to freeze–thaw–cyclic (FTC) loads. *Geofluids*, 2021. Article ID6650616. 20 pages. <https://doi.org/10.1155/2021/6650616>
43. Wauthy, M., Rautio, M., Christoffersen, K.S., Forsstrom, L. et al. Increasing dominance of terrigenous organic matter in circumpolar freshwaters due to permafrost thaw. *Limnology and Oceanography Letters*, 2018, no. 3, pp. 186–198.
44. Wilson, M.J., Wilson, L., Patey, I. The influence of individual clay minerals on formation damage of reservoir sandstones: a critical review with some new insights. *Clay Minerals*, 2014, vol. 49, pp. 147–164.
45. Yang, Z., Jianhang, Lv., Shi, W., Zhang, Q., et al. Model test study on stability factors of expansive soil slopes with different initial slope ratios under freeze–thaw conditions. *Appl. Sci.*, 2021, vol. 11. e 8480. <https://doi.org/10.3390/app11188480>.
46. Yang, Y., Zhang, N., Wang, J. Study on the effect of negative temperature change on the fracture morphology of granite under impact. *Geofluids*, 2022. Article ID4918680. 13 p. <https://doi.org/10.1155/2022/4918680>
47. Zhang, D., Chen, A.Q., Xiong, D.H., Liu, G.C. Effect of moisture and temperature conditions on the decay rate of purple mudstone in south-western China. *Geomorphology*, 2013, vol. 182, pp. 125–132.
48. Zheng, Q., Shen, S-L., Zhou, A-N., Cai, H. Investigation of landslides that occurred in August on the Chengdu–Kunming railway, Sichuan, China. *Geosciences*, 2019, vol. 9, no.12. e 497.

УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

УДК 628.4

ЛЕТУЧАЯ ЗОЛА ОТ СЖИГАНИЯ ТВЕРДЫХ
КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ: ВИДЫ, СОСТАВ,
ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ© 2024 г. Т. И. Юганова^{1,*}, В. С. Путилина^{1,**}¹Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН,
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: tigryu@gmail.com

**E-mail: vputilina@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.11.2023 г.

После доработки 25.12.2023 г.

Принята к публикации 25.03.2024 г.

На основе анализа зарубежных исследований рассматриваются проблемы выщелачивания тяжелых металлов (ТМ) из летучей золы (ЛЗ) от сжигания твердых коммунальных отходов при ее захоронении или использовании. Описан состав, химические свойства и минералогия ЛЗ, рассматриваются эксперименты по выщелачиванию из ЛЗ с мусоросжигательных заводов и из захороненной ЛЗ, оценивается риск от выделения ТМ, представлены результаты расчета и моделирования коэффициентов выщелачивания ТМ.

Ключевые слова: летучая зола от сжигания ТКО, тяжелые металлы, выщелачивание, моделирование выщелачивания

DOI: 10.31857/S0869780924030074 EDN: SPOIMI

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время обращение с твердыми коммунальными отходами (ТКО) является одной из важнейших проблем охраны окружающей среды. Сжигание ТКО (СТКО) позволяет уменьшить их массу на 70% и объем до 90%. При этом образуются твердые остатки (ОСТКО) – конечные продукты мусоросжигательного завода (МСЗ), – которые необходимо обрабатывать дополнительно. Производятся два основных типа ОСТКО [6]: шлак и летучая зола (ЛЗ). Образование и состав ОСТКО, общие для шлака и ЛЗ вопросы рециклинга, методы оценки токсичности, выщелачивание загрязняющих веществ (ЗВ) и проблемы его тестирования, возможные способы обработки ОСТКО для уменьшения воздействия на окружающую среду описаны в [1]. Однако между ЛЗ и шлаком существуют большие различия в составе: ЛЗ содержит значительно больше токсичных веществ, чем шлак. Поэтому проблемы выщелачивания ЗВ, применяемые способы обработки шлака и ЛЗ, поведение этих ОСТКО при захоронении и возможности их использования необходимо также изучать отдельно. Для шлака эти вопросы рассмотрены в [2].

Задача настоящей статьи – на основе зарубежных исследований описать состав ЛЗ; оценить химические характеристики и формы

выщелачиваемых тяжелых металлов (ТМ); показать результаты экспериментов по выщелачиванию ТМ из ЛЗ, полученной непосредственно с МСЗ, и из захороненной ЛЗ; оценить опасность от выщелачивания ТМ; определить коэффициенты выщелачивания ТМ экспериментальным методом и путем компьютерного моделирования.

ВИДЫ И СВОЙСТВА ЛЗ
ОТ СЖИГАНИЯ ТКО

Летучая зола образуется в процессе сжигания ТКО на разных этапах технологического процесса. Как правило, эти собранные остатки смешиваются и далее классифицируются как опасные отходы, хотя отдельные виды ЛЗ в потоках сжигания имеют разные характеристики. Это может иметь существенное значение для выработки экономичного и безопасного решения по обращению с ЛЗ [16].

Термин “остатки APC (air pollution control residues)”, т.е. остатки от очистки дымовых газов, различные авторы трактуют по-разному. В одних источниках все твердые ОСТКО подразделяются на шлак и ЛЗ, а термин “остатки APC” либо не используется [9–11, 13, 18, 25], либо это один из видов ЛЗ [5, 16, 19, 24]. В других случаях, наоборот, все ОСТКО, кроме шлака, относятся к остаткам

Таблица 1. Массовый баланс ОСТКО на МСЗ (колосниковая система), кг/т ТКО [24]

	Шлак		Отсев на решетке	Зола бойлера	Зола фильтров	Остатки APC		Пыль в очищенном газе
	Европа/ США	Япония				Мокрый скруббер	Сухой скруббер	
Минимум	180	100	<1	<2	7	10	20	0.001
Максимум	250	150	3	5	25	15	60	0.01
Типично	200	120	1	3	10	12	30	0.005

APC, которые включают различные виды ЛЗ [6, 7, 20]. В ряде источников ЛЗ и остатки APC рассматриваются как разные части ОСТКО [12, 14] и/или изучается их смесь [22]. Так, на большинстве заводов в Великобритании эти два материала собираются вместе, а если собираются отдельно, то обычно все же захораниваются вместе [22].

В изложении материала в данной статье будем придерживаться той точки зрения, что ЛЗ – это все ОСТКО, кроме шлака, а остатки APC – это только те виды ЛЗ, которые образуются и собираются на этапах очистки дымовых газов.

Остатки APC обычно содержат смесь золы, несгоревшего углерода и непрореагировавшей извести и могут различаться в зависимости от типа инсинератора и установленного оборудования для очистки дымовых газов, а также от сжигаемых отходов. Существует два типа APC [14, 15]. В *системах сухой и полусухой очистки* в дымовой газ вводится гашеная известь либо в сухом виде, либо в виде суспензии. Это делается для нейтрализации кислотных компонентов в дымовых газах и обычно перед удалением из них взвешенных частиц. Зола, продукты реакции с известью и непрореагировавшая известь обычно удаляются из газов тканевыми фильтрами. Активированный уголь может вводиться для извлечения диоксинов и удаляться вместе с золой. В *системах мокрой очистки*, посредством одно-, двух- или многоступенчатой установки скрубберов, из дымового газа удаляются взвешенные частицы и аэрозоли путем введения в газ жидкости. Затем промывные растворы обрабатываются с получением шлака и гипса и в дальнейшем могут быть использованы для выщелачивания ЛЗ с целью удаления ТМ [14]. Шлам обычно осаждается в отстойнике и затем высушивается. В дальнейшем изложении шлам не рассматривается.

В исследовании [5] были определены общие механические свойства остатков APC с МСЗ в Сингапуре: гранулометрический состав от 2 до 110 мкм, причем наиболее распространенный размер частиц около 10 мкм; объемная плотность 560 кг/м³; содержание влаги 1.71; потеря при прокаливании (LOI) 7.13%; pH около 12. Остатки APC были высокощелочными из-за присутствия хорошо растворимого гидратированного гидроксида

кальция и избытка извести, добавленных на стадии очистки дымовых газов.

В табл. 1 показаны диапазоны и средние данные для различных массопотоков ОСТКО на современных МСЗ (колосниковая система), главным образом, на основе компиляции Международной рабочей группы по золе [15] и измерений [24].

Из видов ЛЗ образование *золы бойлера* зависит от количества пыли, высвободившейся из топливного слоя, скорости дымовых газов внутри бойлера и типа бойлера. Зола бойлера следует обрабатывать вместе с золой фильтров из-за аналогичного уровня токсичных ТМ и стойких органических веществ. В некоторых странах это закреплено законодательными актами.

Современные МСЗ с решетками используют “щадящий” режим горения с хорошо управляемой подачей первичного воздуха, что приводит к запылению дымовых газов в количестве от 2 до 3 г/м³ и к количеству собранной золы с фильтров около 7–15 кг/т сожженных отходов. Самый распространенный фильтр – электростатический (ESP). Тканевые фильтры (FF) в основном используются при сухой или полусухой очистке. Оба фильтра гарантируют соблюдение предельного уровня выбросов пыли, который обычно составляет 10 мг/м³.

Массопоток *остатков APC* показывает самый высокий разброс среди всех ОСТКО. Приведенные в табл. 1 12 кг/т остатков из мокрых систем – это около 2–3 кг осажденных соединений ТМ и 8–9 кг растворимых солей. В полусухих или сухих системах количество остатков больше из-за непрореагировавших нейтрализующих и адсорбционных добавок. Образование остатков APC составляет от 20 до 60 кг/т отходов [5].

ХИМИЧЕСКИЙ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЛЗ, ФОРМЫ ТМ

Диапазоны состава ЛЗ по данным многих исследований представлены в табл. 2 [12]. ЛЗ обычно содержит больше ТМ, чем шлак, из-за испарения металлов во время горения с последующей адсорбцией на поверхности частиц ЛЗ [9]. В [22] представлены результаты исследования образцов шлака и ЛЗ с трех МСЗ Великобритании. Отмечается преобладание среди ТМ в ЛЗ Zn, Cu и Pb, а также

значительное обогащение кадмием по сравнению со шлаком. Как видно из табл. 2, ЛЗ содержит токсичные ТМ: Hg, Cd, Cr и As, а также диоксины, унаследованные от исходных отходов или образующиеся в процессе сжигания.

В необработанной ЛЗ были определены сульфаты, карбонаты, силикаты, фосфаты, хлориды, гидроксиды, чистые металлы и стекло. Точное определение микрокомпонентов было затруднено [6]. Металлы могут быть включены в алюмосиликатные соединения или присутствовать в виде простых оксидов и даже в металлической форме (например, Al и Zn). Кроме того, в ЛЗ были обнаружены минералы $\text{Ca}(\text{OH})_2$, PbSO_4 , CaSO_4 , PbO , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, CaCl_2 , CaCO_3 , CaF_2 , $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, CdCO_3 , Ca_2SiO_4 , CaSiO_3 , $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, NaCl , $\text{Fe}(\text{O})$, KCl , ZnCl_2 , Fe_2O_3 , ZnCO_3 , SiO_2 , ZnO , TiO_2 , $\text{Zn}(\text{O})$, PbCl_2 , $\text{Al}(\text{O})$, PbCO_3 , CuO , Al_2O_3 , Na_2O , $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Al})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_7$, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$. Сложная минералогия ЛЗ может быть связана с процессами, происходящими во время горения и последующей очистки дымовых газов: испарением, плавлением, кристаллизацией, остекловыванием, конденсацией и осаждением.

Можно предположить, что при растворении больших количеств солей (например, хлоридов) металлы (например, Cd) будут выделяться в раствор. С другой стороны, можно ожидать, что ЗВ, захваченные в стеклообразной фазе, будут относительно неизвлекаемыми, поскольку для растворения таких фаз требуется значительное снижение pH [6].

Таким образом, ТМ в ЛЗ находятся в подвижных растворимых и обменных формах, а также образуют относительно стабильную остаточную фракцию даже в условиях атмосферного воздействия [17].

В исследовании [4] на примере двух образцов ЛЗ с MC3 Pudong и Jiangqiao в Китае было показано, что распределение содержания ТМ в ЛЗ на обоих заводах соответствует порядку $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{As} > \text{Ni} > \text{Cd} \approx \text{Hg}$, а общее количество ТМ составляет около 0.68% массы от ЛЗ для Pudong и примерно 0.71% для Jiangqiao. Содержание отдельных ТМ в ЛЗ с Jiangqiao обычно выше, чем с Pudong, что может быть вызвано различием в компонентах отходов и температурах сжигания на этих заводах.

Методом последовательной химической экстракции определено весьма сходное распределение ТМ по формам в ЛЗ обоих заводов. Например, на заводе Jiangqiao (рис. 1) растворимый Cd присутствует в кислоторастворимой, обменной и водорастворимой формах, растворимая Hg – в основном в кислоторастворимой и водорастворимой формах. Растворимый Pb в ЛЗ также присутствует в кислоторастворимой форме, а растворимые As и Zn – в органически связанной и кислоторастворимой формах. Следовательно, выщелачивание

Таблица 2. Состав ЛЗ от СТКО на основе литературных данных [12]

Элемент	Единица	Минимум	Максимум
Al	г/кг	6.4	93
Ca	- “ -	46	361
Cl	- “ -	45	380
Fe	- “ -	0.76	71
K	- “ -	17	109
Mg	- “ -	1.1	19
Mn	- “ -	0.2	1.7
Na	- “ -	6.2	84
P	- “ -	1.7	9.6
S	- “ -	1.4	32
Si	- “ -	36	190
Ti	- “ -	0.7	12
Ag	мг/кг	0.9	192
As	- “ -	18	960
Cd	- “ -	16	1660
Co	- “ -	1.9	300
Cr	- “ -	72	1100
Cu	- “ -	16	2220
Hg	- “ -	0.1	51
Mo	- “ -	9.3	150
Ni	- “ -	19	710
Pb	- “ -	254	27000
Sb	- “ -	260	1100
Se	- “ -	0.7	31
Sn	- “ -	367	5900
Sr	- “ -	80	500
V	- “ -	4	150
Zn	- “ -	4308	41000
ПАУ	мкг/кг	18	5600
ХБ	- “ -	0.03	890
ПХБ	- “ -	<40	—
ПХДД	- “ -	0.7	1000
ПХДФ	- “ -	1.4	370
ООУ	г/кг	4.9	17
LOI	- “ -	11	120

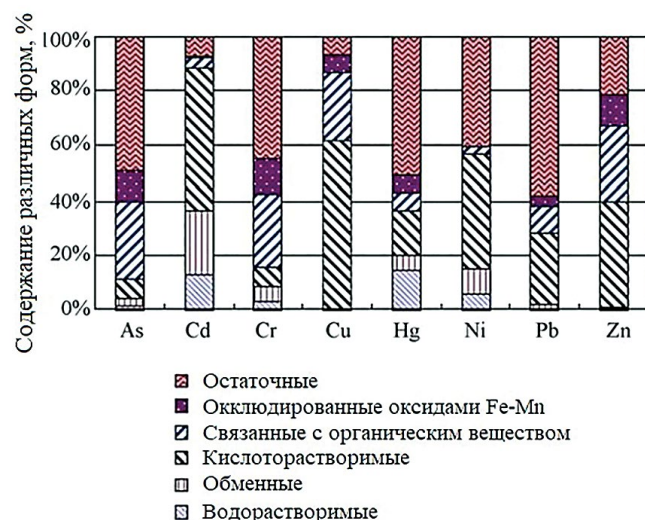


Рис. 1. Анализ форм ТМ в ЛЗ с МСЗ Jiangqiao [4].

этих металлов из ЛЗ в случае попадания ее в окружающую среду в отсутствие кислот относительно затруднено. Однако в природной среде, подверженной воздействию кислотных дождей, вышеупомянутые ТМ могут растворяться и поступать в окружающую среду в течение последующих лет [4].

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ТМ ИЗ ЛЗ И РИСК ЗАГРЯЗНЕНИЯ

По результатам ряда лабораторных и натурных исследований (тестов выщелачивания образцов остатков АРС и мониторинга фильтрата с пяти различных полигонов) был сделан вывод, что концентрации ТМ в фильтрате из захороненной ЛЗ могут быть высокими, особенно Pb (до >1000 мг/л в результате сухих и полусухих процессов АРС) и Cd (от десятков до сотен мкг/л, иногда на уровне мг/л) [22].

В исследовании [17] оценивались количественные характеристики выщелачивания ТМ (Cd, Cr, Cu, Pb, Ni и Zn) из ЛЗ от СТКО и обусловленная им опасность для окружающей среды с использованием процедуры определения характеристик токсичности выщелачивания TCLP [23]. Образцы ЛЗ были отобраны на 15 различных МСЗ в Китае.

Выщелачиваемые количества Cd, Cr и Ni сильно различались, несмотря на их примерно одинаковое общее содержание в ЛЗ. Концентрация выщелоченного Cd варьировала от 0.5 до 23.1 мг/л, при этом 67% образцов показали значение выше нормативного предела для TCLP 1.0 мг/л [21]. Для Cr большинство образцов показали выщелоченное количество менее 5.0 мг/л при нормативном пределе 15 мг/л. Концентрации Ni для всех образцов также были ниже нормативного предела 5.0 мг/л [17]. Выщелачиваемые количества Pb и Zn в некоторых образцах превышали допустимые пределы. Для Pb диапазон концентраций

составлял 1.1–76.3 мг/л, причем 53% образцов показали повышенное количество выщелачиваемого свинца относительно нормативного предела 5.0 мг/л. Концентрация Zn варьировала от 3.8 до 351.2 мг/л, ее превышение над нормативным пределом 100 мг/л наблюдалось в 47% образцов. Результаты исследования по методике TCLP показали, что наибольшую подвижность имел Cd, за которым следовали Pb и Zn [17].

Для определения химических форм ТМ в ЛЗ использовался модифицированный четырехшаговый метод последовательной экстракции. Четыре экстрагированные фракции – кислоторастворимая, восстанавливаемая, окисляемая и остаточная – были соответственно обозначены F1, F2, F3 и F4.

Считалось, что во фракции F1 ТМ имеют слабое связывание с частицами ЛЗ и легко выщелачиваются. Доля Cd, находящегося в этой фракции, относительно всего содержания Cd в образце ЛЗ была самой высокой по сравнению с другими ТМ: от 21.6 до 51.7% с медианным значением 25.2%, что было характерно примерно для 60% проанализированных образцов ЛЗ. Доли других металлов в этой фракции были намного меньше, чем для Cd. Pb имел самую низкую долю во фракции F1 с медианным значением 3.5%.

Самая высокая доля Cd (с медианным значением 44.7%) приходилась на фракцию F2. Эта твердая фаза нестабильна в меняющихся окислительно-восстановительных условиях и в бескислородных средах: легко проходит восстановление оксидов железа и марганца с выделением сорбированных металлов. Медиана для Pb, Zn и Cu составила 40.6, 25.3 и 27.9% соответственно. Доля Cr во фракции F2 была наименьшей среди всех шести металлов, медиана составила 7.7%. Такое поведение Cr было характерно для 80% образцов ЛЗ.

Наименьшая доля Cd находилась в остаточной фракции F4 с невысоким медианным значением 7.5%; примерно 80% проанализированных образцов ЛЗ содержали в F4 менее 10% Cd. Напротив, Cu, Cr, Ni, Pb и Zn находились преимущественно в этой фракции с медианными значениями 63.0, 83.5, 53.4, 41.5 и 49.4% соответственно. Было показано, что ТМ во фракции F4 труднее всего выщелачиваются в естественных условиях и в значительной степени связаны с силикатной и алюминатной твердыми фазами.

Все изученные ТМ имели небольшую долю во фракции F3. Наибольшее значение было у Ni, в среднем 13.5%. Вероятно, это связано с тем, что не все ТМ имеют свойство связываться с органическим веществом. Большая часть органических веществ разлагалась в процессе сжигания, поэтому количество ТМ во фракции F3 было относительно низким.

Таким образом, исследование [17] показало, что основные процессы выщелачивания ТМ из ЛЗ – это десорбция, растворение,

окислительно-восстановительные процессы. Связывающие процессы — это осаждение, сорбция, а также образование смешанных твердых минеральных фаз с силикатами и алюминатами. Это заключение подтверждено выводами в [13], согласно которым выщелачивание Cr и Cd из ЛЗ от СТКО обусловлено растворением минеральных фаз, тогда как выщелачивание Cu, Pb и Zn — осаждением и сорбцией.

В случае попадания ЛЗ в окружающую среду ТМ могут легко вымываться и загрязнять почву и подземные воды, создавая высокий потенциальный риск. Поэтому ЛЗ от СТКО относится к опасным отходам. Для предотвращения миграции ЗВ в поверхностные и подземные воды и почву ОСТКО необходимо регулярно анализировать, чтобы гарантировать безопасность их захоронения или использования. Опасная зола должна обрабатываться и захораниваться как опасные отходы, тогда как неопасная зола, в зависимости от государственных и местных правил, может быть захоронена на полигоне ТКО или переработана для дальнейшего использования [10, 17].

Для оценки опасности от выщелачивания ТМ из ЛЗ в [17] используется так называемый *индекс риска RAC*. Он характеризует доступность металла процентной долей его кислоторастворимой фракции F1 и классифицирует риск по пяти классам. Доля F1 менее 1% считается безопасной для окружающей среды, 1–10% соответствует низкому риску, 11–30% — среднему риску, 31–50% — высокому риску, более 50% — очень высокому риску.

Оценка RAC проводилась на образцах ЛЗ из 15 МСЗ в Китае (S1–S15), и результаты представлены на рис. 2. Основными источниками опасности в ЛЗ были Cd и Pb с высокими значениями RAC: около 53% образцов попали в класс от высокого до очень высокого риска (например, Cd в образцах S2, S5, S10, S12 и S14). Pb также имел класс риска от высокого до очень высокого в образцах S1, S9 и S10. Кроме того, в образце S10 наблюдалось высокое значение RAC Zn. Вклад Cr, Cu, Ni и Zn в риск от ЛЗ в основном попал в средний класс. Образцы S3, S6, S7, S11 и S15 относились к среднему классу риска. Только S8 и S13 имели класс низкого риска, и ни один из образцов не показал отсутствие риска.

Результаты исследования показали, что Cd и Pb представляют потенциальную опасность для окружающей среды из-за их высокой доли в кислоторастворимой фракции. Cr, Cu, Ni и Zn представляют средний риск. Значения RAC показали, что рассмотренные образцы ЛЗ характеризуются разной степенью потенциальной опасности для окружающей среды. Таким образом, RAC может хорошо классифицировать опасность от ЛЗ в качестве основного метода [17].

ПРОЦЕССЫ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ИЗ ОСТАТКОВ APC В ЗАВИСИМОСТИ ОТ pH

В [5] представлены результаты экспериментов по выщелачиванию ТМ из остатков APC с МСЗ в Сингапуре (характеристики приведены выше) в зависимости от pH при отношении жидкой и твердых фаз L/S 10 л/кг (рис. 3).

Выщелачивание *кадмия и меди* происходило по типу катионной растворимости, т.е. их концентрации в растворе были весьма высокими в кислых условиях и постепенно снижались по мере увеличения pH. Самое высокое выщелачивание Cd было при pH 2 и составило 6.41 мг/л, затем постоянно снижалось и при pH 9 достигло 0.03 мг/л. В щелочных условиях снижение выщелачивания Cd могло происходить за счет образования нерастворимых соединений кадмия Cd, таких как $\text{Cd}(\text{OH})_2$ и CdCO_3 . Для меди выщелачивание поддерживалось на уровне примерно 50 мг/л при pH

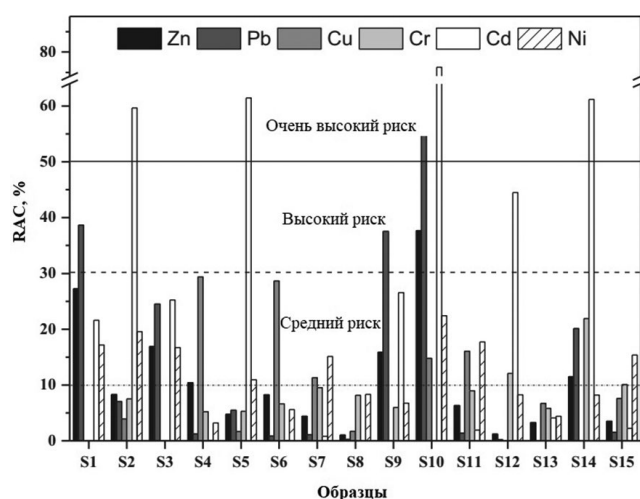


Рис. 2. Индекс оценки риска (RAC) ТМ в ЛЗ от СТКО, собранной на 15 МСЗ в Китае [17].

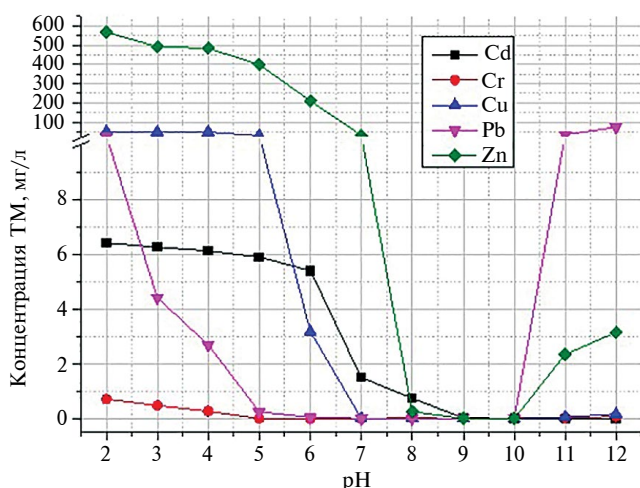


Рис. 3. Влияние pH на выщелачивание ТМ из остатков APC [5].

2–5, после чего наблюдалось значительное снижение до 3.18 мг/л при pH 6 вплоть до предела обнаружения использованного аналитического метода оптико-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES) при pH 7 и выше. Возможной причиной могло быть образование малорастворимого тенорита (CuO) и $\text{Cu}(\text{OH})_2$ при pH 5 и выше. Эксперименты показали, что Cd и Cu проявляют низкую растворимость в условиях щелочных значений pH из-за образования нерастворимых соединений, которые ограничивают их выщелачивание в окружающую среду.

Свинец и цинк образуют амфотерные соединения, поэтому выщелачивание было высоким как в кислых (pH их < 2 , 25.8 мг/л), так и в щелочных (pH > 12 , 74.7 мг/л) условиях, но при нейтральных значениях pH выщелачивание было минимальным и в интервале pH 7–10 оставалось ниже предела обнаружения ICP-OES (см. рис. 3). Это может быть вызвано образованием малорастворимых смешанных соединений свинца с карбонатами и фосфатами. В кислых условиях он может присутствовать в форме свободного иона и гидролитических комплексных разновидностей, а в сильнощелочных – образует растворимые соединения $\text{Pb}(\text{OH})_2$, $[\text{Pb}(\text{OH})_3]^-$, $[\text{Pb}(\text{OH})_4]^{2-}$, соли плюмбита и плюмбата (например, Na_2PbO_2 и Na_2PbO_3). Аналогичные выводы были сделаны в [8].

Эксперименты [5] показали, что количество выщелачиваемого Zn существенно зависело от pH среды. При pH 2 оно составляло 567 мг/л и резко уменьшалось до 0.26 мг/л при pH 8. Это снижение могло быть связано с осаждением гидроксидов $\text{Zn}(\text{OH})_2$ либо с адсорбцией на силикатах, оксидах железа и алюминия. Известно, что сорбция Zn увеличивается с ростом pH. В щелочных условиях при pH > 11 Zn может образовывать растворимые гидроксокомплексы цинкаты (например, $\text{Na}_2[\text{Zn}(\text{OH})_4]$), что могло бы объяснить увеличение выщелачивания в сильнощелочной среде.

Выщелачивание *хрома* было относительно низким по сравнению с Cd, Cu, Pb и Zn. При pH 2 высвобождение составляло 0.71 мг/л и постоянно снижалось до 0.003 мг/л при pH 5. Между pH 5 и 10 концентрация Cr колебалась, некоторые значения были ниже предела обнаружения. При pH 11 и 12 выщелачивание Cr постепенно увеличивалось до 0.028 и 0.074 мг/л соответственно. Как правило, выщелачивание Cr в щелочных твердых отходах зависит от степени окисления Cr, где степени +3 и +6 являются доминирующими. Соединения Cr(VI) более растворимы (и токсичны) по сравнению с соединениями Cr(III), поэтому выщелачивание Cr(VI) из ЛЗ может быть преобладающим.

Таким образом, низкие значения pH способствуют выделению большинства ТМ в фильтрат, т.е. увеличению выщелачивания. Диапазон значений pH 7–10 – наилучший для подавления выделения большинства ТМ, при этом pH 7 дает

низкую выщелачиваемость Cr, Cu и Pb, но все же относительно высокую выщелачиваемость Cd и Zn [5].

В другом исследовании [26] получены концентрации некоторых ТМ в фильтрах из захороненной ЛЗ при различных условиях pH (рис. 4).

Все рассмотренные элементы, кроме As и Se, следовали катионной схеме выщелачивания. Выщелачивание As происходило по амфотерной схеме с минимальной концентрацией при нейтральном pH 7. Se следовал схеме оксианионного выщелачивания, при которой концентрации были примерно постоянными в кислых и нейтральных условиях pH и начинали увеличиваться в сильнощелочных условиях. Выщелачивание элементов из ЛЗ в описанных условиях размещения мало изменялось при выдерживании на полигоне в течение изученного периода времени (несколько месяцев).

ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В ЗАХОРОНЕННОЙ ЛЗ ПОД ДЕЙСТВИЕМ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ: КАРБОНИЗАЦИЯ И ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ТМ

При захоронении ЛЗ на полигоне в процессе выщелачивания атмосферными осадками и почвенным раствором происходит *карбонизация* по предпочтительным путям потока, которая играет важную роль в изменении химического состава фильтрата. Карбонизация – природное явление, возникающее при воздействии атмосферного углекислого газа на сильнощелочные жидкости, что приводит к снижению pH и осаждению кальцита [22]. Карбонизация протекает в последовательности: $\text{CO}_2(\text{г.}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{водн.}) + \text{OH}^- \rightarrow \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-} + \text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{CaCO}_3(\text{тв.})$. В конечном итоге карбонизация приводит к снижению pH примерно до 8.3 для буферной системы с кальцием, но обычно это медленный процесс. В сценарии захоронения ЛЗ в северной Европе щелочной pH воды в матрице/порах, вероятно, будет поддерживаться в течение многих тысяч лет. Предполагается, что карбонизация приведет к началу падения pH из-за превращения гидроксидов в карбонаты, но в результате щелочность системы сохранится [22].

Цель исследования [10] – оценить экологические проблемы, связанные с выщелачиванием элементов из захороненной ЛЗ, изучая опасные ТМ в фильтрате с использованием лабораторных тестов: выщелачивания искусственными атмосферными осадками и pH-зависимого выщелачивания. Результаты предполагалось использовать в качестве справочных материалов для захоронения и обработки ЛЗ и для сравнения лабораторных методов выщелачивания, чтобы найти

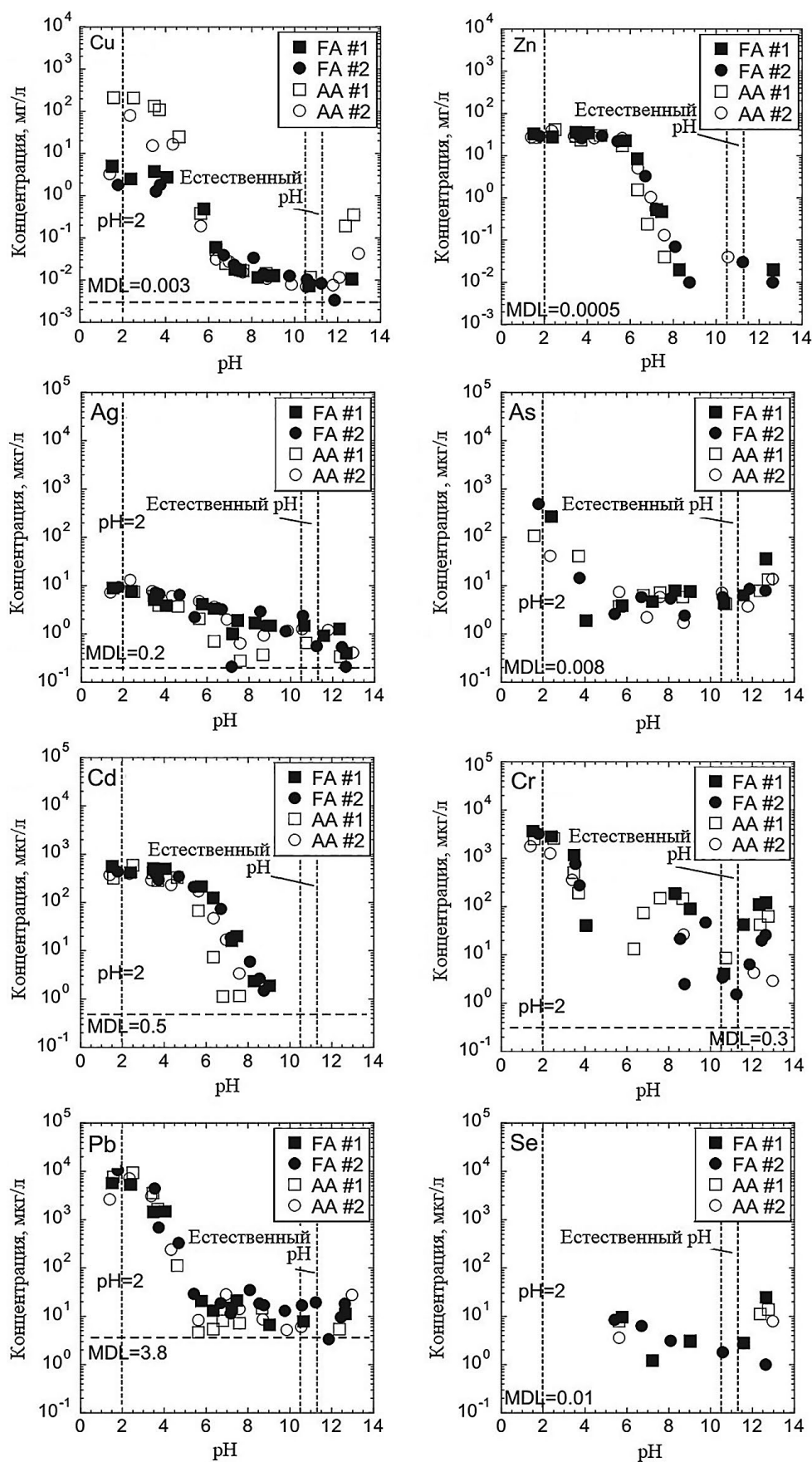


Рис. 4. Концентрации ТМ в ЛЗ от СТКО в зависимости от pH. Образцы ЛЗ, отобранные после захоронения: FA#1 и FA#2 в течение 10 сут, AA#1 и AA#2 – через несколько месяцев. MDL – предел обнаружения [26].

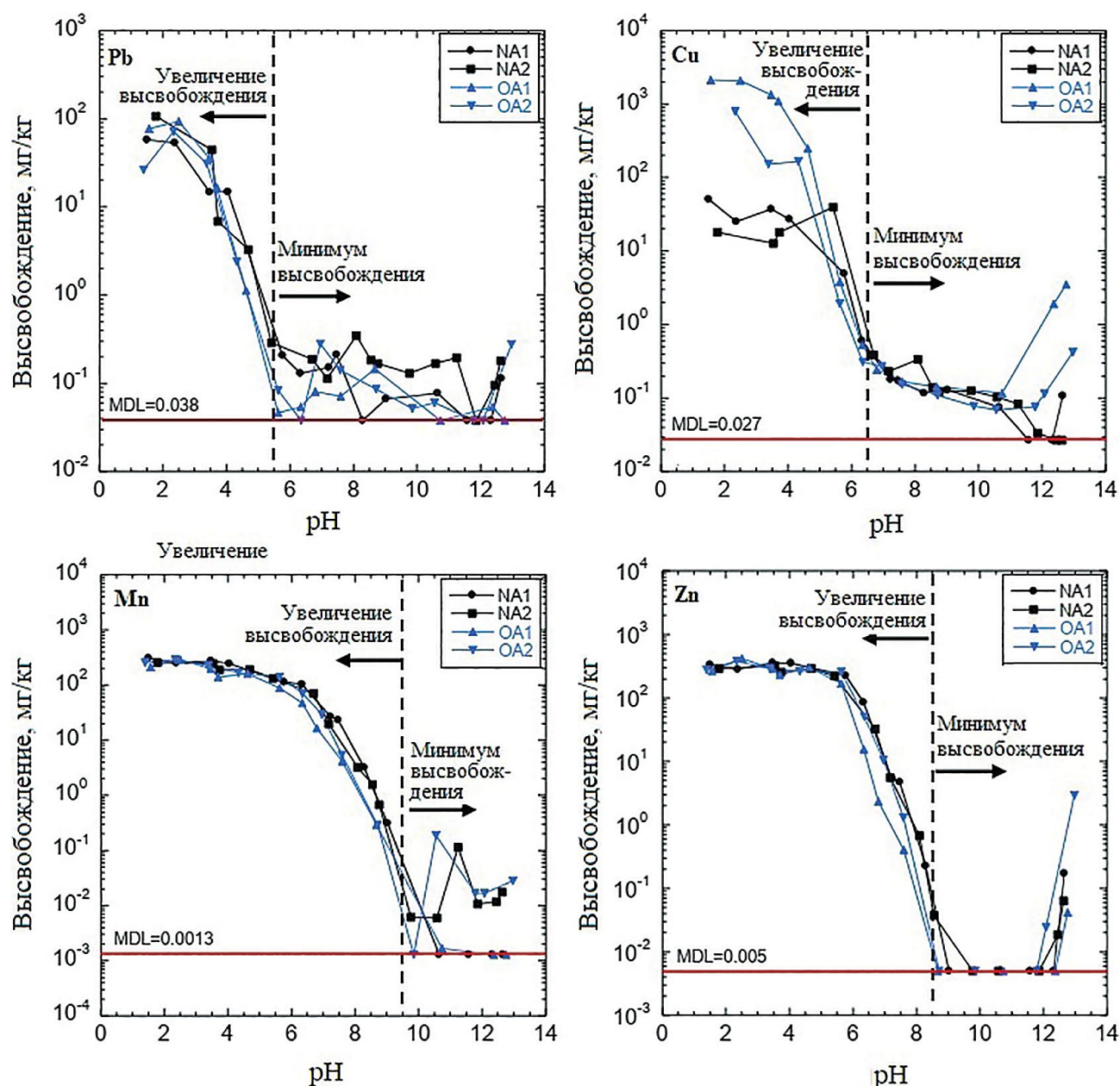


Рис. 5. Выделение ТМ из образцов свежей (NA1, NA2) и выдержанной (OA1, OA2) ЛЗ в процессе выщелачивания в зависимости от pH. MDL – предел обнаружения [10].

лучший способ моделирования природных условий. Проводилось сравнение выщелачивания ТМ из образцов *свежей* и *выдержанной* ЛЗ, в которых в той или иной степени произошли процессы карбонизации. Были проанализированы четыре образца с монополигона ЛЗ в шт. Висконсин (США). Образцы свежей ЛЗ (NA1 и NA2) были отобраны в разных местах в течение 10 сут после захоронения; образцы выдержанной ЛЗ (OA1 и OA2) – через несколько месяцев после захоронения.

В экспериментах по *выщелачиванию искусственными атмосферными осадками* элюат доводился до pH < 2 азотной кислотой. Концентрации металлов As, Cr, Pb, Se и Sb в фильтрате из образцов ЛЗ

сравнивались с максимальным уровнем загрязнения (MCL), разрешенным стандартом EPA США для питьевой воды. Концентрации As и Sb превышали MCL (10 и 6 мкг/л соответственно) для каждого образца, тогда как концентрации других элементов были значительно ниже MCL (Cr 100 мкг/л, Pb 15 мкг/л, Se 50 мкг/л). Самая высокая концентрация As была определена в фильтрате NA1 (61.5 мкг/л), самая низкая – в фильтрате NA2 (22. мкг/л). В фильтратах образцов OA1 и OA2 концентрации As близки к 35 мкг/л, а концентрации Sb – к 11 мкг/л. Наибольшая концентрация Sb была в фильтрате NA2 – 41 мкг/л.

Тесты выщелачивания в зависимости от pH из образцов свежей и выдержанной ЛЗ проводились при отношении L/S 10 л/кг. Для тестов использовался диапазон pH с целевыми значениями pH 13, 12, 10.5, 9, 8, 7, 5.5, 4 и 2. Из ТМ были выбраны Pb, Cu, Mn, Zn с наибольшим содержанием в ЛЗ [10]. Результаты представлены на рис. 5.

Свинец показал сходное поведение в свежих и выдержанных образцах со значительным снижением выделения в элюат при значениях pH от 2 до ~5.5 и минимальным выщелачиванием в интервале значений pH 5.5–13.

Поведение *меди* различалось в образцах свежей и выдержанной ЛЗ в диапазоне pH от 2 до 6. В образцах выдержанной золы при этих условиях выделение меди в элюат снижалось от максимальных до минимальных значений, затем удерживалось в интервале pH от 6 до 11 и при pH > 12 возрастало. В образцах свежей золы при тех же значениях pH медь удерживалась в больших количествах и выделялась примерно на порядок меньше.

Выделение *марганца* для всех образцов проходило примерно одинаково: между pH 2 и 6 наблюдалось медленное снижение от высоких значений, а при увеличении pH с 6 до 10 – резкое снижение.

Выделение *цинка* также было высоким в диапазоне pH от 2 до 5.5 и затем резко снижалось с увеличением pH до 9; при pH 9–12 выщелачивание было минимальным. При более высоких значениях pH > 12 цинк переходил в растворенное состояние и начинал выделяться вновь.

Таким образом, наблюдались различные схемы выщелачивания микроэлементов, но все они показали самую высокую концентрацию в фильтрате при pH ≈ 2. Самое низкое выщелачивание для Pb и Cu было при pH 6–12, а Mn и Zn – при pH 9–12 [10].

КОЭФФИЦИЕНТЫ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ИЗ ЛЗ С МСЗ

В исследовании [4] был проведен анализ выщелачивания ТМ из ЛЗ с двух выбранных МСЗ в городах Jiangqiao и Pudong (Китай) и рассчитаны *коэффициенты выщелачивания* двумя методами: экспериментальным и моделированием по программе MINTEQA2. Коэффициент выщелачивания ТМ из ЛЗ – это отношение количества высвобожденного металла к его содержанию в ЛЗ (%). Результаты измерения этих коэффициентов в диапазоне pH 0–13 сравниваются с результатами моделирования.

Для *цинка* они в основном согласуются. Коэффициенты выщелачивания Zn приблизительно равны 75% при pH от 0 до 7.5 и близки к нулю при pH 8–12 из-за образования $Zn(OH)_2$ и $ZnO \cdot SiO_2$. Это обусловлено высоким содержанием кислоторастворимой формы, что согласуется

с результатом анализа форм. Когда pH превышает 12, коэффициент выщелачивания вновь увеличивается благодаря превращению осадочного Zn в растворимый $[Zn(OH)_3]$ и, наконец, в $[Zn(OH)_4]^{2-}$, который является основной формой растворенного Zn в сильнощелочных условиях.

Измеренные и модельные результаты выщелачивания *хрома* не всегда согласуются. При pH < 4 модельные коэффициенты обычно выше, чем измеренные. Максимальный измеренный коэффициент выщелачивания составил около 35% для завода Jiangqiao и примерно 37% для завода Pudong, что связано с более высоким содержанием в ЛЗ остаточных форм Cr на первом заводе. При pH > 4 как измеренные, так и модельные результаты выщелачивания близки к нулю из-за образования $Cr(OH)_3$ и Cr_2O_3 . С повышением pH трансформации Cr следуют порядку от растворимых форм к осадочным: $Cr^{2+} \rightarrow Cr_2(OH)_2(SO_4)_2 \rightarrow CrONCl_2 \rightarrow Cr(OH)_3 \rightarrow Cr_2O_3$.

Коэффициенты выщелачивания *кадмия* относительно выше для завода Jiangqiao по той же причине, что и для Cr. При pH > 11 коэффициенты близки к нулю, т.е. в условиях сильной щелочности происходит минимальное выщелачивание. Максимальный результат превышает 80% при pH, близком к нулю, что связано с высоким содержанием кислоторастворимой формы Cd в этих условиях. При этом измеренные результаты выщелачивания кадмия относительно ниже, чем модельные, для ЛЗ с обоих заводов. Преобразование растворимых форм Cd в осадочные с повышением pH следует порядку $Cd^{2+} \rightarrow CdCO_3$ и $CdONCl \rightarrow Cd(OH)_2$.

Измеренные результаты выщелачивания *никеля* не согласуются с результатами моделирования при pH < 1, но при pH > 1 эти значения близки. Максимальное значение для Ni относительно выше для завода Jiangqiao, чем для завода Pudong, по той же причине, что для Cr и Cd. При pH > 2 коэффициент выщелачивания близок к 0. Формы Ni следуют порядку от растворимых к осадочным: $Ni^{2+} \rightarrow NiO \cdot SiO_2 \rightarrow NiCO_3 \rightarrow Ni(OH)_2 \rightarrow Ni(OH)_3$.

Измеренные и модельные результаты выщелачивания *свинца* для обоих заводов в основном совпадают. Коэффициент выщелачивания, близкий к 70% при pH < 2, уменьшается с ростом pH. При pH от 3 до 12 коэффициент близок к 0 из-за образования нерастворимого $Pb(OH)_2$. При pH > 12, коэффициент выщелачивания Pb увеличивается с ростом pH, что вызвано переходом свинца в растворимые формы (см. выше). Следовательно, токсичность Pb при выщелачивании усиливается как в сильнокислых, так и в щелочных условиях, и, таким образом, негативно влияет на окружающую среду.

Для *меди* измеренные результаты выщелачивания хорошо согласуются с результатами моделирования для ЛЗ с обоих заводов. Максимальный

коэффициент выщелачивания составляет более 60% при pH около 0, что вызвано высоким содержанием растворенной меди в этих условиях. В сильноокислой среде медь растворяется с образованием солей: хлоридов, сульфатов, нитратов. В слабоокислой среде (pH ~4–5) образуется осадок сульфида меди – CuS. При pH выше 5.3 начинает осаждаться Cu(OH)₂. Преобразование форм меди в зависимости от pH следует порядку: при pH < 1 растворенная Cu, при pH от 1 до 4 сульфиды и оксиды Cu, при pH > 7 добавляются основные осадочные формы: Cu(OH)₂, CuO, CuCO₃.

Результаты выщелачивания *мышьяка*, полученные при измерениях и моделировании, хорошо согласуются при pH > 2.5, но при более низком pH измеренные коэффициенты относительно ниже, чем модельные. Максимальные измеренные коэффициенты выщелачивания близки к 60% при pH около 0, т.е. в сильноокислых условиях As находится преимущественно в растворенном состоянии. Относительно более низкие измеренные коэффициенты по сравнению с модельными могли быть вызваны потерей части As в процессе эксперимента (вываривания).

Для *ртути* при pH < 9 измеренные коэффициенты выщелачивания из ЛЗ с обоих заводов меньше, чем модельные. При pH от 0 до 4 измеренные коэффициенты близки к 50%, т.е. выщелачивание Hg из ЛЗ происходит относительно легко. При pH > 9.5 коэффициенты выщелачивания близки к нулю, т.е. в сильнощелочных условиях соединения ртути нерастворимы. Следовательно, такие условия способствуют снижению ее токсичности при выщелачивании.

Таким образом, для Cu, Pb и Zn измеренные коэффициенты выщелачивания хорошо согласуются с результатами моделирования, указывая на то, что последние могут отражать фактическое поведение этих ТМ при выщелачивании в окружающей среде. Коэффициент для Cu уменьшается с ростом pH, пока не станет близким к нулю при pH > 4. Коэффициенты выщелачивания Zn и Pb сначала снижаются, а затем повышаются с ростом pH, т.е. эти ТМ легко выщелачиваются как в сильноокислой, так и в щелочной среде. Для Ni, As, Cr, Hg и Cd результаты измерений и моделирования выщелачивания, близкие к нулю, хорошо согласуются только при pH выше 1.5, 2.5, 5, 9.5 и 11 соответственно, т.е. модельные коэффициенты выщелачивания не всегда могут отражать фактическое поведение этих ТМ. Cu, As, Cr, Hg, Cd и Ni могут выщелачиваться в сильноокислых условиях, но относительно безопасны в сильнощелочных условиях.

Таблица 3. Элементный состав образцов ЛЗ [7]

Компонент	Единица	ЧЛЗ	ПС
Al	г/кг	35.7	18.3
Ca	- “ -	181	331
Fe	- “ -	13.8	9.7
Mg	- “ -	14.1	7.8
P	- “ -	10.0	3.4
As	мг/кг	380	80
Ba	- “ -	1120	620
Cd	- “ -	240	100
Co	- “ -	20.9	8.9
Cr	- “ -	700	200
Cu	- “ -	1170	500
Mo	- “ -	28	9
Ni	- “ -	67.4	37.5
Pb	- “ -	6800	2100
Sb	- “ -	1170	340
Sr	- “ -	400	500
V	- “ -	39.7	19.8
Zn	- “ -	31700	9100
ООУ	г/кг	0.7	2.7

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ДОЛГОСРОЧНОМУ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЮ МЕТАЛЛОВ ИЗ ЛЗ

Выщелачивание металлов из ЛЗ после захоронения может продолжаться тысячи лет. Хотя фактические последствия не могут быть определены сегодня, потенциальные воздействия от долгосрочного выделения металлов должны быть оценены и учтены [14].

Для характеристики длительного выщелачивания авторами [6, 7] была проведена серия расширенных экспериментов по инфильтрации из колонок для двух образцов ЛЗ:

- “чистая” ЛЗ (без добавления извести и продуктов нейтрализации кислых газов; эту золу собирали в электрофилтре), обозначаемая далее ЧЛЗ;
- остаток полусухой обработки (смесь ЛЗ, непрореагировавшей извести и продуктов нейтрализации кислых газов, собранная в рукавном фильтре), обозначаемый далее ПС.

В табл. 3 приведен элементный состав этих образцов. Выщелачивание As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Si, Sn, Sr, Ti, V, Zn и POУ проводилось в течение 24 месяцев. При этом постепенно возрастало отношение L/S, отражавшее продолжительность соответствующего периода захоронения на полигоне, где происходит инфильтрация атмосферных осадков. По окончании

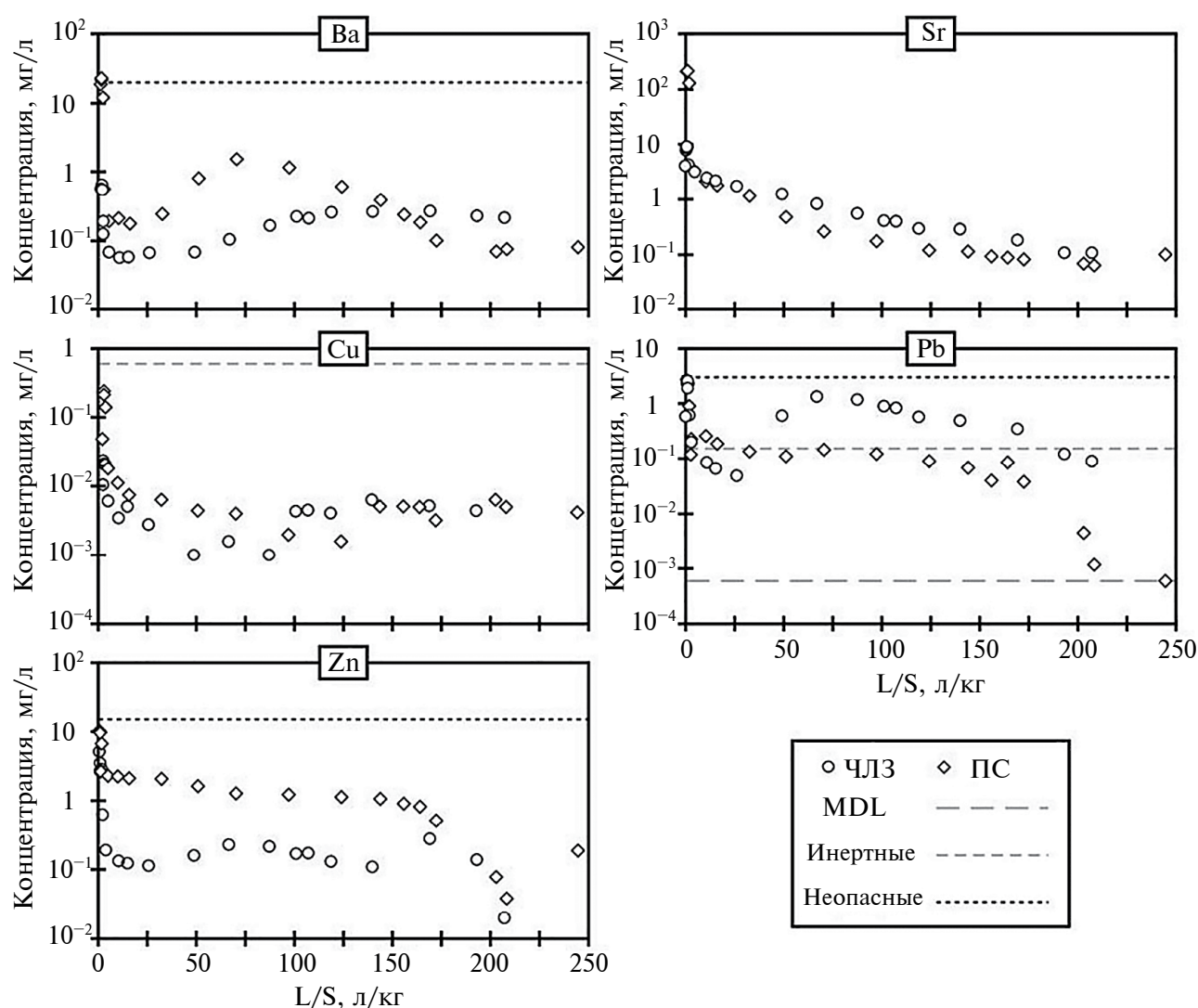


Рис. 6. Концентрации в фильтрате Ba, Sr, Cu, Pb и Zn как функции отношения L/S. Данные по выщелачиванию: кружки – для ЧЛЗ (зола из электрофильтра), ромбы – для ПС (остаток полусухой обработки). MDL – предел обнаружения (серые линии с длинным штрихом). Критерии выщелачивания для отходов, приемлемых для полигонов инертных (серые линии с коротким штрихом) и неопасных (черные пунктирные линии) отходов [6, 7].

экспериментов было достигнуто конечное отношение L/S 200–250 л/кг, которое соответствовало периоду захоронения более чем 10000 лет. Следует отметить, что эксперимент [6, 7] фактически представлял условия *монополигона* ЛЗ, где отсутствуют другие, в частности, органические отходы, способные формировать большое количество растворимых органических комплексов с металлами, увеличивающих их выщелачивание.

Выщелачивание As, Cd, Cu, Pb, Sb из обеих колонок за 24 мес составило менее 1% и для некоторых металлов было ниже соответствующих пределов обнаружения (в мг/л): Cd ($5 \cdot 10^{-5}$), Hg ($2 \cdot 10^{-5}$), Ni ($6 \cdot 10^{-4}$), Co ($2 \cdot 10^{-4}$), Sn ($5 \cdot 10^{-4}$) и Ti ($2 \cdot 10^{-2}$), т.е. элементы практически не поступали в фильтрат. Это происходило несмотря на довольно высокое начальное содержание указанных элементов в ЛЗ (табл. 3) и выделение некоторых

металлов с задержкой. Однако Ba, Mo, Sr за тот же период времени показали выщелачивание из ПС на 24, 38 и 71% соответственно и из ЧЛЗ – 3.5, 34 и 41% соответственно.

В ходе эксперимента регулярно определялись концентрации элементов в элюате и были построены графики зависимости их выщелачивания от отношения L/S (рис. 6, 7). Чтобы соотнести данные о выщелачивании с опасностью захоронения ЛЗ в долгосрочной перспективе, в рисунки включены принятые в ЕС предельные значения концентраций элементов при выщелачивании для отходов, принимаемых на полигоны различных классов опасности [3].

Выщелачивание Ba, Sr, Cu, Pb и Zn показано на рис. 6. Начальное выщелачивание *бария* и *стронция* из ПС было значительно выше, чем из ЧЛЗ. На протяжении всего эксперимента

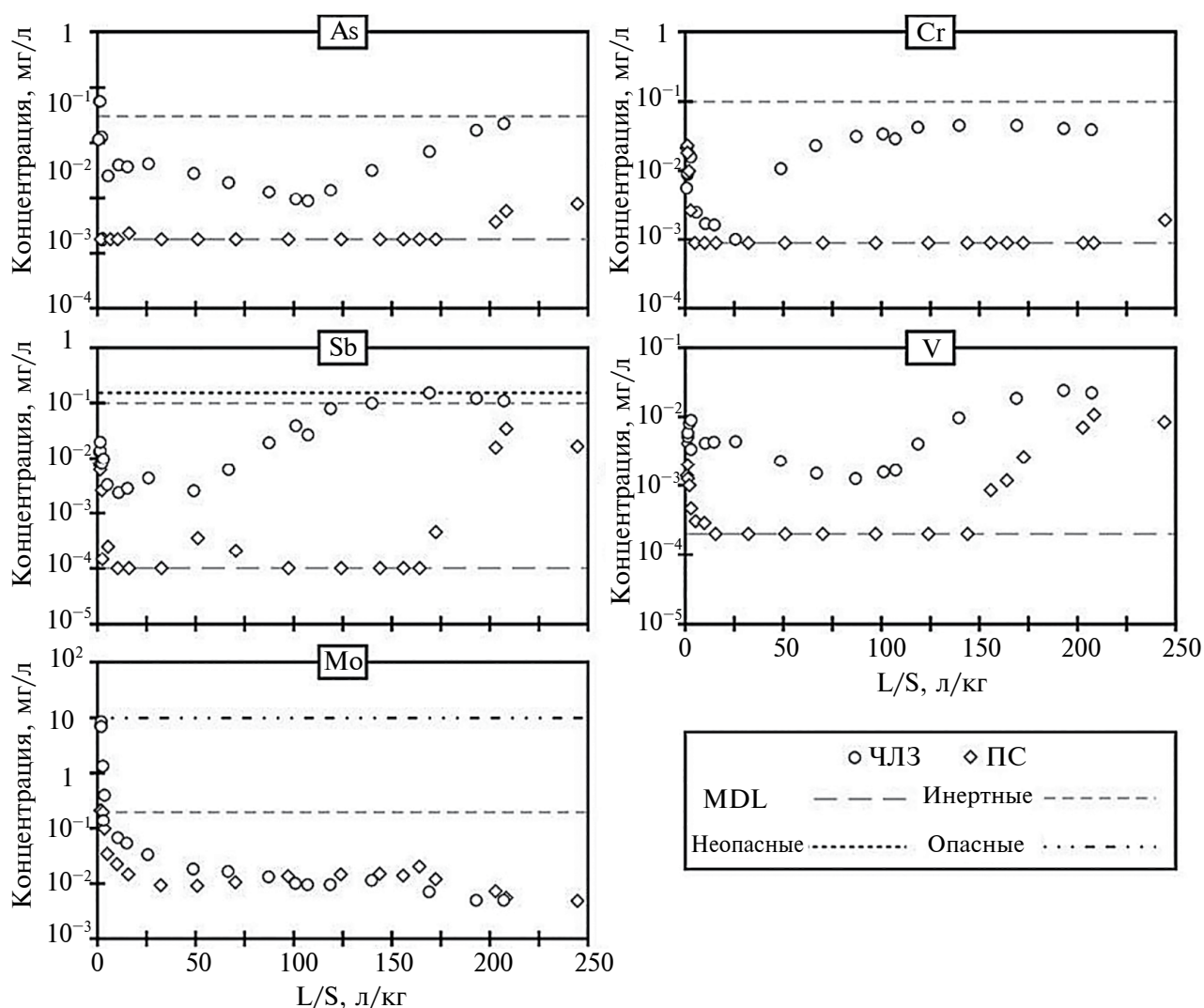


Рис. 7. Концентрации в фильтрате As, Cr, Sb, V и Mo в зависимости от отношения L/S. Данные по выщелачиванию: кружки – для ЧЛЗ (зола из электрофилтра), ромбы – для ПС (остаток полусухой обработки). MDL – предел обнаружения (серые линии с длинным штрихом). Критерии выщелачивания для отходов, приемлемых для полигонов инертных (серые линии с коротким штрихом), неопасных (черные пунктирные линии) и опасных (комбинированные черные штрихпунктирные линии) отходов [6, 7].

концентрации Ba в элюате из обеих колонок были ниже предела ЕС для полигонов неопасных отходов. Пределы для Sr в [3] не установлены. Предполагалось, что выщелачивание Ba и Sr было связано с растворением/осаждением барита и твердых растворов $Ba(Ca)SO_4$, $Ba(S, Cr)O_4$ и $Ba(Sr)SO_4$.

Исходные концентрации меди в растворе составляли около 0.02 и 0.2 мг/л в ЧЛЗ и ПС соответственно, т.е. находились в пределах, установленных для инертных отходов. Для обоих материалов выщелачивание Cu быстро уменьшалось в начальный период и в течение всего эксперимента было ниже 1%, оставаясь на уровне 1–6 мкг/л. Это могло быть связано с низкой растворимостью осадка $Cu(OH)_2$ (тв.), который, как предполагалось, отвечал за выщелачивание меди

при значениях pH > 10, наблюдавшихся в течение всего эксперимента.

Высокое начальное выделение свинца (~3 мг/л) было почти на уровне предела для неопасных отходов. Это характерно для растворов с высоким содержанием растворимых солей, где, возможно, происходит комплексобразование свинца с неорганическими анионами. При отношении L/S от 50 до 200 л/кг выщелачивание из ЧЛЗ было выше, чем из ПС, и превышало предел для инертных отходов. При L/S > 200 выделение свинца из ПС снижалось до значений MDL. Конечные выщелоченные количества Pb соответствовали только 1.6% (ЧЛЗ) и 1.1% (ПС) от общей массы Pb в твердой фазе.

Выщелачивание цинка, скорее всего, было связано с равновесием растворения/осаждения цинкита, а также виллемита (Zn_2SiO_4).

Концентрации от 5 до 10 мг/л отнесли оба ОСТ-КО к приемлемым для захоронения неопасных отходов. Уменьшение концентрации Zn на поздней стадии экспериментов может быть вызвано простым изменением растворимости цинкита в зависимости от pH. Общее выщелоченное количество соответствовало только 1% и <3% для ЧЛЗ и ПС соответственно.

При высоких значениях pH и окислительных условиях мышьяк (As), хром (Cr), сурьма (Sb), ванадий (V) и молибден (Mo) могут образовывать *оксианионы*: AsO_4^{3-} , CrO_4^{2-} , $\text{Sb}(\text{OH}_6)^-$, VO_4^{3-} и MoO_4^{2-} . Таким образом, эти элементы становятся довольно подвижными, и в экспериментах по выщелачиванию они часто обнаруживались в измеримых концентрациях (см. рис. 7).

Выщелачивание As, Cr, Sb и V из образцов ЧЛЗ было выше, чем для ПС, где их содержание было на уровне предела обнаружения. Поведение Mo при выщелачивании из обоих образцов было сходным: концентрация в растворе снизилась в начальный период, а затем выровнялась до $1 \cdot 10^{-2}$ мг/л. Первоначальное выделение Mo из ЧЛЗ соответствовало ограничениям для опасных отходов, тогда как ПС можно было отнести к инертным отходам. Для обоих образцов короткий начальный период выщелачивания Cr, Sb и V характеризовался снижением концентраций.

Для *фильтрата из ЧЛЗ* выше L/S 50–100 л/кг наблюдалось увеличение концентраций всех четырех элементов, и при L/S > 125 л/кг Cr, Sb и V, в отличие от As, явно выходили на плато. Концентрации As, Cr и Mo в фильтрате ЧЛЗ после короткого начального периода, а Cr и Mo в течение всего эксперимента соответствовали критериям для инертных отходов. Концентрации Sb были близки к пределу для неопасных отходов. Пределы для V в [3] не установлены.

В *фильтрате из ПС* начальные концентрации As, Cr, Sb и V быстро уменьшались в пределах L/S 5 л/кг. Между L/S 10 и 150 л/кг концентрации всех четырех элементов оказались ниже их пределов обнаружения. Однако при L/S 150 л/кг происходило увеличение выщелачивания Sb и V; были достигнуты несколько более низкие уровни концентрации, чем для ЧЛЗ. Концентрации мышьяка тоже увеличились, хотя и не так резко и при несколько более высоком отношении L/S 175 л/кг. На выщелачивание Cr увеличение L/S не влияло, и концентрации Cr в растворе были близки к пределу обнаружения.

В системе выщелачивания предполагалось образование этtringита ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$). Этот минерал может влиять на высвобождение вышеупомянутых оксианионов за счет замещения анионов (например, AsO_4^{3-} , CrO_4^{2-} , $\text{Sb}(\text{OH}_6)^-$ и VO_4^{3-}) в своей структуре. Если допустить такое замещение, то осаждение этtringита приведет к связыванию оксианионов, следовательно,

к снижению их концентраций в растворах. Напротив, растворение этtringита приведет к повышению концентрации замещающих оксианионов, поскольку они будут оставаться в растворах в виде “свободных” ионов при высоких уровнях pH, наблюдаемых в этих системах.

На основе расчетов видового состава были предложены два возможных минерала, отвечающих за выделение хрома: Cr-содержащий аналог этtringита $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{CrO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ и твердый раствор $\text{Ba}(\text{S},\text{Cr})\text{O}_4$. Растворимость последней фазы может объяснить уровень концентраций, наблюдаемый между L/S 100 и 200 л/кг в образцах ЧЛЗ. Для сурьмы не было найдено подходящего минерала в диапазоне индекса насыщения SI от $-1 < \text{SI} < 1$, так как все Sb-содержащие минералы оказались недонасыщенными на несколько порядков. Кривые выщелачивания мышьяка и ванадия медленно снижались до L/S 100 л/кг, где вновь наблюдалось увеличение. В пределах рассматриваемого диапазона SI были обнаружены $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ и $\text{Ca}_3(\text{VO}_4)_2$.

В отличие от других оксианионов, MoO_4^{2-} не был связан с осаждением/растворением этtringита, поскольку он оказался неблагоприятным для замещения из-за разницы в размерах по сравнению с SO_4^{2-} . Обусловить высокие начальные концентрации в ЧЛЗ (т.е. около 10 мг/л) мог повеллит (CaMoO_4), а также комплексообразование с фульвокислотной частью РОУ и/или сорбция на HFO/AlO [7].

Таким образом, в условиях монополигона исследованные образцы ЛЗ в большинстве случаев соответствовали бы ограничениям ЕС для безопасных или инертных отходов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Летучая зола (ЛЗ) от сжигания твердых коммунальных отходов (ТКО) в случае ее захоронения или использования без дополнительной обработки представляет опасность для окружающей среды из-за высокого содержания тяжелых металлов (ТМ). Как правило, ЛЗ, образовавшаяся на мусоросжигательном заводе (МСЗ), смешивается и затем классифицируется как *опасные отходы*, хотя ее отдельные виды в потоках сжигания имеют разные характеристики. Это может иметь существенное значение для выработки безопасного решения по обращению с ЛЗ. Опасная зола должна обрабатываться и захораниваться как опасные отходы, тогда как неопасная зола может быть захоронена на полигоне ТКО или переработана для полезного использования. Для определения степени опасности необходимо исследование содержания ТМ в ЛЗ и их выщелачивания.

Химический состав ТМ в ЛЗ показывает, что растворимые и обменные фракции ТМ достаточно подвижны, а остаточная фракция

относительно стабильна даже в условиях атмосферного воздействия. Выявлено распределение форм ТМ в ЛЗ. Растворимый Cd в основном присутствует в кислоторастворимой, обменной и водорастворимой формах, растворимая Hg — в кислоторастворимой и водорастворимой, растворимые Pb и Zn — в кислоторастворимой, растворимый As — в органически связанной форме. Поэтому в отсутствии кислот выщелачивание Pb и Zn в окружающей среде относительно затруднено. Однако в природной среде, подверженной воздействию кислотных дождей, эти ТМ могут экстрагироваться в окружающую среду спустя годы.

Для ЛЗ с 15 различных МСЗ в Китае оценены химические характеристики ТМ (Cd, Cr, Cu, Pb, Ni и Zn) и *риск от их выщелачивания* из ЛЗ с использованием для процедуры тестирования выщелачивания TCLP, четырехшаговой химической экстракции фракций ТМ и индекса оценки риска RAC (на основе процентного содержания металла в его кислоторастворимой фракции). Выщелачивание Cd, Pb и Zn в некоторых образцах превышало допустимые пределы. Согласно RAC более половины образцов попали в класс от высокого до очень высокого риска из-за Cd и Pb. Вклад Cr, Cu, Ni и Zn в основном попал в средний класс риска. Ни один из образцов не соответствовал отсутствию риска.

По результатам *экспериментов по выщелачиванию ТМ из ЛЗ в зависимости от pH* отмечено, что для разных металлов оно происходило по различным схемам, в частности, катионной (когда концентрации снижаются с увеличением pH — Cd, Cu) и амфотерной (когда максимальное выщелачивание наблюдается в чрезвычайно кислых и чрезвычайно щелочных условиях — Pb, Zn). В целом, низкие значения $pH < 2$ способствовали увеличению выщелачивания большинства ТМ. Наименьшее выщелачивание происходило в интервале значений pH 6–12. Самое низкое выщелачивание для Pb и Cu было при $pH > 6$, а для Mn и Zn — при $pH > 9$. Для подавления выделения большинства ТМ наилучший диапазон значений pH — между 7 и 10.

Измеренные коэффициенты выщелачивания Cu, Pb и Zn хорошо согласуются с результатами моделирования, указывая на то, что последние могут отражать фактическое поведение этих ТМ при выщелачивании в окружающей среде. Коэффициент для Cu уменьшается с ростом pH, пока не станет близким к нулю при $pH > 4$. Коэффициенты выщелачивания Zn и Pb сначала снижаются, а затем повышаются с ростом pH, иными словами, эти ТМ легко выщелачиваются как в сильнокислой, так и в щелочной среде. Для Ni, As, Cr, Hg и Cd результаты выщелачивания, близкие к нулю, хорошо согласуются с обоими методами только при pH выше 1.5, 2.5, 5, 9.5 и 11

соответственно, т.е. модельные коэффициенты выщелачивания не всегда могут отражать фактическое поведение этих ТМ. Cu, As, Cr, Hg, Cd и Ni могут выщелачиваться в сильнокислых условиях, но относительно безопасны в сильнощелочных условиях.

Для характеристики *длительного выщелачивания* ТМ из захороненной ЛЗ использованы результаты проведенного эксперимента по инфильтрации из колонок продолжительностью 24 месяца. Было достигнуто отношение жидкой и твердых фаз (L/S) 200–250 л/кг, что соответствовало инфильтрации атмосферных осадков более 10000 лет на полигоне. Этот эксперимент фактически моделировал условия монополигона ЛЗ, где отсутствуют органические отходы, способные формировать большое количество растворимых органических комплексов с металлами, увеличивающих их выщелачивание. Показано, что за все время эксперимента выщелочилась лишь небольшая часть от общего содержания многих элементов.

По результатам исследований можно сделать вывод, что после захоронения выщелачивание из ЛЗ различных ТМ может продолжаться тысячи лет и происходить по разным схемам. Потенциальные воздействия от долгосрочного выделения металлов должны быть оценены и учтены. В каждом случае перед принятием решения о захоронении или использовании ЛЗ требуется специальное исследование возможного поведения опасных ТМ. Одним из способов снижения выщелачивания ТМ из ЛЗ является ее захоронение на монополигоне. В дальнейшем будут рассмотрены применяемые способы обработки ЛЗ для уменьшения выщелачивания ТМ, возможности ее использования и ограничения при захоронении.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГЭ РАН по теме НИР № г.р. 122022400104-2 “Техногенез и природа: геоэкологические проблемы”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юганова Т.И., Путилина В.С. Остатки от сжигания твердых коммунальных отходов: состав, выщелачивание загрязнителей подземных вод, обработка для уменьшения воздействия на окружающую среду // Геоэкология. 2023. № 5. С. 65–78.
2. Юганова Т.И., Путилина В.С. Шлак от сжигания твердых коммунальных отходов: состав, выщелачивание, обработка, возможности использования и допустимость захоронения // Геоэкология. 2024. № 1. С. 96–110.
3. Council Decision of 19 December 2002 establishing criteria and procedures for the acceptance of waste at landfills pursuant to Article 16 of and Annex II to Directive 1999/31/EC. European Council (2003/33/EC) // Official Journal of the European Communities. 16.1.2003. L 11. P. 27–49. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/>

- EN/TXT/?uri=celex%3A32003D0033 (дата обращения 25.09.2023).
4. Haiying Z., Youcai Z., Jingyu Q. Characterization of heavy metals in fly ash from municipal solid waste incinerators in Shanghai // *Process Safety & Environmental Protection*. 2010. V. 88. № 2. P. 114–124.
 5. Heng K.S., Sun X., Liu A. et al. Physicochemical Characterization of Singapore's Municipal Solid Waste Air Pollution Control Residues and its Stabilization by VKI Treatment // *Int. Journal of Waste Resources*. 2018. V. 8, № 3. Article 1000349.
 6. Hykš J. Leaching from Municipal Solid Waste Incineration Residues: Ph.D. thesis / Technical University of Denmark, Department of Environmental Engineering. 2008. 64 p. URL: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/leaching-from-municipal-solid-waste-incineration-residues> (дата обращения 25.09.2023).
 7. Hyks J., Astrup T., Christensen T. H. Long-term leaching from MSWI air-pollution-control residues: Leaching characterization and modeling // *Journal of Hazardous Materials*. 2009. V. 162. № 1. P. 80–91.
 8. Jing C., Meng X., Korfiatis G. Lead leachability in stabilized/solidified soil samples evaluated with different leaching tests // *Journal of Hazardous Materials*. 2004. V. 114. P. 101–110.
 9. Lam C.H.K., Ip A.W.M., Barford J. P., McKay G. Use of incineration MSW ash: A review // *Sustainability*. 2010. V. 2. № 7. P. 1943–1968.
 10. Leaching Characteristics of Fly Ash from Municipal Solid Waste Incineration / Y. Zhang, J. Chen, K. Perthel, T. B. Edil, W. J. Likos; University of Wisconsin System, Solid Waste Research Program. 2014. 20 p.
 11. Li W., Sun Y., Huang Y. et al. Evaluation of chemical speciation and environmental risk levels of heavy metals during varied acid corrosion conditions for raw and solidified/stabilized MSWI fly ash // *Waste Management*. 2019. V. 87. P. 407–416. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.033>
 12. Lindberg D., Molin C., Hupa M. Thermal treatment of solid residues from WtE units: a review // *Waste Management*. 2015. V. 37. P. 82–94.
 13. Luo H., Cheng Y., He D., Yang E.-H. Review of leaching behavior of municipal solid waste incineration (MSWI) ash // *Science of The Total Environment*. 2019. V. 668. P. 90–103.
 14. Management of APC Residues from W-t-E Plants. An overview of management options and treatment methods: Second edition / T. Astrup, Department of Environmental Engineering Technical University of Denmark; ISWA-WG Thermal Treatment of Waste, Subgroup APC Residues from W-t-E plants. ISWA, 2008. 51 p. URL: https://books.google.se/books/about/Management_of_APC_Residues_from_W_t_E_Pl.html?id=WGh9XwAACAAJ&redir_esc=y (дата обращения 25.09.2023).
 15. Municipal solid waste incinerator residues / IAWG (International Ash Working Group: A. J. Chandler, T. T. Eighmy, O. Hartlén, D. Kosson, S. E. Sawell, H. van der Sloot, J. Vehlow). Amsterdam: Elsevier Science, 1997. 973 p. (Studies in Environmental Science. V. 67). URL: <https://www.elsevier.com/books/municipal-solid-waste-incinerator-residues/chandler/978-0-444-82563-6> (дата обращения 25.09.2023).
 16. Nikravan M., Ramezaniapour A. A., Maknoon R. Study on physiochemical properties and leaching behavior of residual ash fractions from a municipal solid waste incinerator (MSWI) plant // *Journal of Environmental Management*. 2020. V. 260. Article 110042.
 17. Pan Y., Wu Z., Zhou J. et al. Chemical characteristics and risk assessment of typical municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash in China // *Journal of Hazardous Materials*. 2013. V. 261. P. 269–276. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.07.038>
 18. Pan Y., Yang L., Zhou J. et al. Characteristics of dioxins content in fly ash from municipal solid waste incinerators in China // *Chemosphere*. 2013. V. 92. P. 765–771. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.04.003>
 19. Quina M.J., Bordado J. C., Quinta-Ferreira R. M. Treatment and use of air pollution control residues from MSW incineration: An overview // *Waste Management*. 2008. V. 28. № 11. P. 2097–2121.
 20. Quina M.J., Bordado J. C., Quinta-Ferreira R. M. The influence of pH on the leaching behaviour of inorganic components from municipal solid waste APC residues // *Waste Management*. 2009. V. 29. № 9. P. 2483–2493.
 21. Technical Assistance Document for Complying with the TC Rule and Implementing the Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP): EPA-902-B-94-001. 1994. 182 p. URL: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/tclp-1994_0.pdf (дата обращения 25.09.2023).
 22. Testing of Residues from Incineration of Municipal Solid Waste: Science report P1-494/SR2 / Environment Agency, UK. 2004. 126 p. URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/290379/scho10105bjb-e-e.pdf (дата обращения 25.09.2023).
 23. Toxicity characteristic leaching procedure: Method 1311 / United States Environmental Protection Agency. 1992. 35 p. URL: <https://www.epa.gov/hw-sw846/sw-846-test-method-1311-toxicity-characteristic-leaching-procedure> (дата обращения 12.04.2023).
 24. Vehlow J., Bergfeldt B., Hunsinger H. PCDD/F and related compounds in solid residues from municipal solid waste incineration – a literature review // *Waste Management & Research*. 2006. V. 24. № 5. P. 404–420.
 25. Wong S., Mah A.X.Y., Nordin A. H. et al. Emerging trends in municipal solid waste incineration ashes research: a bibliometric analysis from 1994 to 2018 // *Environmental Science & Pollution Research*. 2020. Vol. 27, № 8. P. 7757–7784. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07933-y>
 26. Zhang Y., Cetin B., Likos W. J., Edil T. B. Impacts of pH on leaching potential of elements from MSW incineration fly ash // *Fuel*. 2016. V. 184. P. 815–825.

FLY ASH FROM MUNICIPAL SOLID WASTE INCINERATION: TYPES, COMPOSITION, AND LEACHING OF HEAVY METALS

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

^a*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences*

Ulanskii per. 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia

[#]*E-mail: tigryu@gmail.com*

^{##}*E-mail: vputilina@yandex.ru*

The problems of heavy metals (HM) leaching from fly ash (FA) produced by municipal solid waste incineration during its burial or use are considered. The composition, chemical properties and mineralogy of FA are described, experiments on leaching from FA in waste incinerators and in buried FA are considered, the risk from HM release is assessed, and the results of calculation and modeling of HM leaching coefficients are presented.

Keywords: *MSW fly ash, heavy metals, leaching, leaching modeling*

REFERENCES

1. Yuganova, T.I., Putilina, V.S. [Residues from municipal solid waste incineration: composition, groundwater pollutant leaching, treatment to reduce environmental impact]. *Geokologiya*, 2023, no. 5, pp. 65–78. (in Russian)
2. Yuganova, T.I., Putilina, V.S. [Bottom ash from municipal solid waste incineration: composition, leaching of heavy metals, treatment, possibilities of application and permissibility of burial]. *Geokologiya*, 2024, no. 1, pp. 96–110. (in Russian)
3. Council Decision of 19 December 2002 establishing criteria and procedures for the acceptance of waste at landfills pursuant to Article 16 of and Annex II to Directive 1999/31/EC. European Council (2003/33/EC). *Official Journal of the European Communities*, 16.1.2003, L 11, pp. 27–49. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2003:011:FULL&from=EN> (accessed 12.04.2023).
4. Haiying, Z., Youcai, Z., Jingyu, Q. Characterization of heavy metals in fly ash from municipal solid waste incinerators in Shanghai. *Process Safety & Environmental Protection*, 2010, vol. 88, no. 2, pp. 114–124.
5. Heng, K.S., Sun, X., Liu, A., et al. Physicochemical characterization of Singapore's municipal solid waste air pollution control residues and its stabilization by VKI treatment. *International Journal of Waste Resources*, 2018, vol. 8, no. 3, article 1000349.
6. Hykš, J. Leaching from Municipal Solid Waste Incineration Residues: Ph.D. thesis. Technical University of Denmark, Department of Environmental Engineering, 2008, 64 pp. URL: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/leaching-from-municipal-solid-waste-incineration-residues> (accessed 13.04.2023).
7. Hykš, J., Astrup, T., Christensen, T.H. Long-term leaching from MSWI air-pollution-control residues: Leaching characterization and modeling. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 162, no. 1, pp. 80–91.
8. Jing, C., Meng, X., Korfiatis, G. Lead leachability in stabilized/ solidified soil samples evaluated with different leaching tests. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, vol. 114, pp. 101–110.
9. Lam, C.H.K., Ip, A.W.M., Barford, J.P., McKay, G. Use of incineration MSW ash: A review. *Sustainability*, 2010, vol. 2, no. 7, pp. 1943–1968.
10. Leaching Characteristics of Fly Ash from Municipal Solid Waste Incineration. Y. Zhang, J. Chen, K. Perthel, T. B. Edil, W. J. Likos. University of Wisconsin System, Solid Waste Research Program, 2014, 20 p.
11. Li, W., Sun, Y., Huang, Y., Shimaoka, T., Wang, H., Wang, Y., Ma, L., Zhang, D. Evaluation of chemical speciation and environmental risk levels of heavy metals during varied acid corrosion conditions for raw and solidified/ stabilized MSWI fly ash. *Waste Management*, 2019, vol. 87, pp. 407–416.
12. Lindberg, D., Molin, C., Hupa, M. Thermal treatment of solid residues from WtE units: a review. *Waste Management*, 2015, vol. 37, pp. 82–94.
13. Luo, H., Cheng, Y., He, D., Yang, E.-H. Review of leaching behavior of municipal solid waste incineration (MSWI) ash. *Science of The Total Environment*, 2019, vol. 668, pp. 90–103.
14. Management of APC Residues from W-t-E Plants. An overview of management options and treatment methods: Second edition. T. Astrup; Department of Environmental Engineering Technical University of Denmark; ISWA-WG Thermal Treatment of Waste, Subgroup APC Residues from W-t-E plants. ISWA, 2008. 51 pp. URL: https://books.google.se/books/about/Management_of_APC_Residues_from_W_t_E_Pl.html?id=WGh9XwAACAAJ&redir_esc=y (accessed 14.04.2023).
15. Municipal solid waste incinerator residues. In: IAWG (International Ash Working Group): A. J. Chandler, T. T. Eighmy, O. Hartlén, D. Kosson, S. E. Sawell, H. van der Sloot, J. Vehlow. Amsterdam, Elsevier Science Publ., 1997. 973 p. (Studies in Environmental Science, vol. 67). URL: <https://www.elsevier.com/books/municipal-solid-waste-incinerator-residues/chandler/978-0-444-82563-6> (accessed 14.04.2023).
16. Nikravan, M., Ramezani-pour, A.A., Maknoon, R. Study on physiochemical properties and leaching behavior of residual ash fractions from a municipal solid waste incinerator (MSWI) plant. *Journal of Environmental Management*, 2020, vol. 260, article 110042.
17. Pan, Y., Wu, Z., Zhou, J., Zhao, J., Ruan, X., Liu, J., Qian, G. Chemical characteristics and risk assessment of typical municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash in China. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, vol. 261, pp. 269–276.
18. Pan, Y., Yang, L., Zhou, J., Liu, J., Qian, G., Ohtsuka, N., Motegi, M., Oh, K., Hosono, S. Characteristics of dioxins content in fly ash from municipal solid waste incinerators in China. *Chemosphere*, 2013, vol. 92, pp. 765–771.
19. Quina, M.J., Bordado, J.C., Quinta-Ferreira, R. M. Treatment and use of air pollution control residues from MSW incineration: An overview. *Waste Management*, 2008, vol. 28, no. 11, pp. 2097–2121.

20. Quina, M.J., Bordado, J.C., Quinta-Ferreira, R. M. The influence of pH on the leaching behaviour of inorganic components from municipal solid waste APC residues. *Waste Management*, 2009, vol. 29, no. 9, pp. 2483–2493.
21. Technical Assistance Document for Complying with the TC Rule and Implementing the Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP): EPA-902-B-94-001, 1994, 182 pp. URL: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/tclp-1994_0.pdf (accessed 12.04.2023).
22. Testing of Residues from Incineration of Municipal Solid Waste: Science report P1–494/SR2 / Environment Agency, UK, 2004, 126 pp. URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/290379/scho0105bijb-e-e.pdf (accessed 12.04.2023).
23. Toxicity characteristic leaching procedure: Method 1311. United States Environmental Protection Agency, 1992, 35 pp. URL: <https://www.epa.gov/hw-sw846/sw-846-test-method-1311-toxicity-characteristic-leaching-procedure> (accessed 12.04.2023).
24. Vehlow, J., Bergfeldt, B., Hunsinger, H. PCDD/F and related compounds in solid residues from municipal solid waste incineration – a literature review. *Waste Management & Research*, 2006, vol. 24, no. 5, pp. 404–420.
25. Wong, S., Mah, A.X.Y., Nordin, A.H., Nyakuma, B.B., Ngadi, N., Mat, R., Amin, N.A.S., Ho, W.S., Lee, T.H. Emerging trends in municipal solid waste incineration ashes research: a bibliometric analysis from 1994 to 2018. *Environmental Science & Pollution Research*, 2020, vol. 27, no. 8, pp. 7757–7784.
26. Zhang, Y., Cetin, B., Likos, W.J., Edil, T.B. Impacts of pH on leaching potential of elements from MSW incineration fly ash. *Fuel*, 2016, vol. 184, pp. 815–825.

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 504:502.64

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ПОЛИГОНОВ ТКО

© 2024 г. В. Г. Заиканов^{1,*}, Т. Б. Минакова¹, Е. В. Булдакова¹

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

*E-mail: v.zaikanov@mail.ru

Поступила в редакцию 23.01.2024 г.

После доработки 22.02.2024 г.

Принята к публикации 25.03.2024 г.

Проблема обращения с твердыми коммунальными отходами (ТКО) особенно актуальна в настоящее время в связи с ростом накопления их объемов пропорционально быстрому увеличению численности городского населения. Несмотря на усилия по разработке высокотехнологичной инфраструктуры обработки и утилизации отходов, значительная их часть по-прежнему подлежит захоронению на полигонах. В статье излагается методический подход к оценке территории субъектов РФ для научно-обоснованного размещения полигонов ТКО с использованием *Индекса благоприятности размещения полигонов ТКО*, определяемого на основе комплексного учета геоэкологических ограничений и социально-экономических условий и отражающего дифференциацию регионов на уровне субъектов РФ.

Ключевые слова: полигоны ТКО, индекс благоприятности размещения полигонов ТКО, геоэкологические условия и ограничения, социально-экономические условия, физико-географические области, субъекты РФ

DOI: 10.31857/S0869780924030089 EDN: SPHQWI

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на решение проблемы размещения твердых коммунальных отходов (ТКО) направлен федеральный проект “Комплексная система обращения с твердыми коммунальными отходами”¹, реализуемый в рамках Госпрограммы “Охрана окружающей среды”² и Национального проекта “Экология”³. Целью этого проекта является создание современной высокотехнологичной инфраструктуры обработки и утилизации отходов [4].

Согласно национальным целям развития, к 2030 г. планируется обеспечить сортировку 100%

отходов и снизить объем их захоронения в 2 раза, увеличив при этом на 50% долю утилизируемых отходов. Кроме того, ожидается, что захоронению подлежат отходы, прошедшие предварительную сортировку. Несмотря на реализацию федеральных проектов обойтись без захоронения отходов пока не удастся. В настоящее время в России до 94% отходов подвергается захоронению именно на полигонах [7].

Под захоронением отходов понимается изоляция отходов, не подлежащих дальнейшей утилизации, в специальных хранилищах⁴. Полигон ТКО рассматривается нами как комплекс тщательно спроектированных природоохранных сооружений, предназначенных для централизованного размещения отходов, предотвращающих попадание вредных веществ в окружающую среду, а также загрязнение атмосферы, почв, поверхностных и подземных вод. Выбор территории для

¹ Комплексная система обращения с твердыми коммунальными отходами. https://www.mnr.gov.ru/activity/nr_ecology/federalnyy-proekt-kompleksnaya-sistema-obrashcheniya-s-tyverdyimi-kommunalnymi-otkhodami.

² Государственная программа Российской Федерации “Охрана окружающей среды” (утв. Постановлением Правительства РФ от 15.04.2014 № 326). <https://base.garant.ru/70643488/>.

³ Национальный проект “Экология” [Электронный ресурс] // Национальные проекты России. <https://национальные-проекты.рф/projects/ekologiya> (дата обращения: 12.11.2023).

⁴ Федеральный закон от 24.06.1998 г. № 89-ФЗ (ред. от 04.08.2023) Об отходах производства и потребления (с изм. и доп. вступ. в силу с 01.10.2023) “Об отходах производства и потребления” [Электронный ресурс] // URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/ (дата обращения: 14.11.2023).

оптимального размещения полигонов ТКО зависит от объемов и состава самих отходов, определяемых численностью городского населения, соответствием природных условий нормативным требованиям, соблюдением природоохранных технологий при строительстве и эксплуатации полигонов.

Цель исследования — разработка методического подхода к оценке территории субъектов РФ для научно-обоснованного размещения полигонов ТКО с учетом природных и социально-экономических условий регионов. Интегральная оценка территории субъектов РФ для оптимального размещения полигонов ТКО определяется *Индексом благоприятности размещения полигонов ТКО*, выраженным в баллах и рассчитанным индивидуально для каждого субъекта РФ.

ПРОБЛЕМЫ РАЗМЕЩЕНИЯ ПОЛИГОНОВ ТКО

Оценка регионов РФ по геоэкологической благоприятности размещения полигонов ТКО является многоступенчатым процессом. Известно, что благоприятность размещения полигонов определяется не только природными факторами, но и социально-экономическими условиями.

Определение конкретного места строительства объектов размещения отходов должно в первую очередь осуществляться на основе специальных (геологических, гидрологических и иных) исследований (в ред. Федерального закона от 30.12.2008 N309 — ФЗ), нацеленных на выявление и оценку геоэкологических (природных) ограничений для размещения полигонов ТКО. В то же время Единые требования к объектам обработки, утилизации, обезвреживания, размещения твердых коммунальных отходов⁵, действующие с 1.01.2021 г. и до 1.01.2027 г., указывают на необходимость при выборе места расположения таких объектов опираться на схемы потоков ТКО в соответствии с территориальной схемой обращения с отходами в целях обеспечения максимальной экономической эффективности их функционирования. Кроме того, размещение объектов переработки и захоронения ТКО в целях обеспечения эффективности транспортировки мусора должно осуществляться недалеко от источника их возникновения — населенных пунктов, и при условии обязательного проведения в полном объеме мероприятий по охране окружающей среды.

⁵ Постановление Правительства РФ от 12.10.2020 № 1657 «Единые требования к объектам обработки, утилизации, обезвреживания, размещения твердых коммунальных отходов» [Электронный ресурс] //URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_365180/ (дата обращения: 12.11.2023).

Законодательно запрещается захоронение отходов в границах населенных пунктов, лесопарковых, курортных, лечебно-оздоровительных, рекреационных зон, а также водоохраных зон, на водосборных площадях подземных водных объектов, которые используются в целях питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения, а также в местах залегания полезных ископаемых и ведения горных работ в случаях, если возникает угроза загрязнения мест залегания полезных ископаемых и безопасности ведения горных работ (в ред. Федерального закона от 08.11.2008 N196-ФЗ).

Таким образом, в настоящее время в нормативно-законодательной базе существует достаточно много как природных, так и социально-экономических ограничений для размещения полигонов ТКО. Для планирования размещения подобных объектов в масштабах страны, в частности с целью регулирования инвестиционных потоков, возникает еще дополнительная проблема — совмещение оценок геоэкологических ограничений с социально-экономическими в силу несоответствия границ природной пространственной дифференциации территории РФ с политико-административным делением, в соответствии с которым собирается и накапливается вся социально-экономическая информация о регионах, в том числе и об объемах и составе ТКО. Поэтому задача интегральной оценки территории для размещения полигонов ТКО на уровне субъектов РФ — многоступенчатая, и решалась она в несколько этапов.

ПОДХОД К ОЦЕНКЕ БЛАГОПРИЯТНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ СУБЪЕКТОВ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ПОЛИГОНОВ ТКО

На первом этапе исследования выявлялись природные особенности территории России. В качестве базового источника информации о природной дифференциации территории РФ было выбрано физико-географическое районирование России с соответствующей картой, выполненной в масштабе 1 : 15 000 000 (2004 г.). Учитывались ее комплексность, необходимая детальность и обоснованность выделенных территориальных единиц. Оцениваемой единицей районирования принята территория ранга физико-географическая область, которых, согласно районированию, насчитывается 71 в пределах территории России. Природная неоднородность в значительной степени определяет и неоднородность геоэкологических условий, развитие экзогенных и эндогенных процессов в пределах физико-географических областей. В качестве критерия выбора вида геоэкологических процессов принимается максимальная площадь их распространения в пределах конкретной физико-географической области.

Исключение составляет сейсмическая опасность. При интенсивности сейсмических

воздействий (фоновой сейсмичности) более 6 баллов считалось, что воздействие в зависимости от силы землетрясения и местоположения его эпицентра распространяется на площадь региона.

Оценка рельефа каждой физико-географической области проводилась по двум типам: горному и равнинному, причем в расчетах учитывался преобладающий по площади тип. В нескольких областях процентное соотношение горного и равнинного типов рельефа оказывалось примерно равным. В этих случаях учитывались оба типа рельефа. Критерий оценки горного рельефа — средняя крутизна поверхности рельефа, а равнинного — густота расчленения территории эрозионной сетью.

К экзогенным геологическим процессам (ЭГП), оказывающим негативное влияние на участок размещения полигона отходов, были отнесены: суффозионно-карстовые, заболачивание и затопление (сезонное и периодическое). Также учитывались территории, имеющие в геологическом строении близкое залегание к поверхности регионального водоупора, сложенного глинистыми и суглинистыми отложениями. В качестве примеров можно привести региональный водоупор юрских глин для лесной зоны Европейской части России или сплошное распространение многолетнемерзлых пород, являющихся тоже мощным водоупором. Следует отметить также появившийся и активно развивающийся процесс опустынивания и сопутствующий ему процесс засоления почв. Однако последний имеет широкое распространение только в отдельных регионах.

Объекты размещения ТКО, расположенные на территориях с высоким уровнем подземных вод, должны быть спроектированы и сооружены таким образом, чтобы расстояние от нижнего уровня размещаемых отходов до уровня вод составляло не менее 2 м (п. 25 Постановления Правительства РФ⁵).

В зависимости от сочетания характерных для каждой физико-географической области процессов проводилась балльная оценка благоприятности геоэкологических условий для размещения полигонов ТКО (чем меньше оценка геоэкологических ограничений, тем условия более благоприятны). Ее основой стали нормативные документы (см. сноски 4, 5) с соответствующими требованиями к объектам ТКО, экспертная оценка приоритетности геоэкологических факторов применительно к каждой территории, а также накопленный практический опыт, полученный при изучении модельных объектов полигонов ТКО. Баллы приоритетности корректировались экономическими показателями, например, удорожание строительства полигона при наличии ограничивающего фактора, природных условий строительства и др.

В итоге взвешенные баллы с учетом площади распространения геоэкологических ограничений в пределах физико-географических областей отражают оценку их природной благоприятности для размещения полигонов ТКО. Такой подход обеспечил большую дифференциацию оценочного показателя (O_j) физико-географических областей, определяемого по выражению:

$$O_j = \sum_{i=1}^n V_{ij} \times S_{ij}, \quad (1)$$

где j — физико-географическая область; i — вид геоэкологических условий и процессов; V_{ij} — балл оценки и S_{ij} — доля площади распространения i -го вида геоэкологических условий и процессов [%], от площади j -й физико-географической области.

Поскольку отдельные участки территории субъектов могут оказаться в разных физико-географических областях, следует рассматривать их отдельно и, как в отношении природной благоприятности, так и социально-экономических условий. Последние связаны с ожидаемыми годовыми объемами отходов, определяемыми по нормативам⁶, численностью городского населения, количеством городов, их размещением относительно друг друга и границ физико-географических областей и с другими особенностями таких территорий.

Перенос результатов средневзвешенной балльной оценки природной благоприятности соответствующей физико-географической области на территорию субъекта осуществляется традиционным способом с учетом доли ее площади в общей площади субъекта. В итоге Индекс геоэкологической благоприятности размещения полигонов ТКО на территории субъекта (O_m) определяется по выражению:

$$O_m = \sum_{j=1}^n O_j \times S_{jm} \times kl_{jm}, \quad (2)$$

где m — территория субъекта, S_{jm} — доля площади m -го субъекта в j -й физико-географической области [%], kl_{jm} — корректирующий коэффициент нормативных объемов отходов, определяемый в зависимости от распределения городского населения в пределах участка субъекта в j -й физико-географической области и расчетных площадей для их размещения.

Таким образом в предлагаемом подходе учитывается не только структура площадей с различными значениями оценки геоэкологических ограничений, но и размещение, и характеристики городов каждого субъекта — основных источников накопления ТКО. При этом наименьшее значение индекса соответствует большей благоприятности территории.

⁵ СП 502.1325800.2021. Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. <https://minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/448/SP-502.pdf>.

Таблица 1. Основные характеристики Республики Башкортостан и Иркутской области

Показатели	Субъекты РФ	
	Республика Башкортостан	Иркутская область
Общая площадь, км ²	143600	774846
Физико-географические области в пределах субъектов РФ (номера см. на рис. 1, 2)	8 – лесная, 9 – лесостепная, 10 – степная, 17 – южно-уральская	31 – таежная, 33 – островная лесостепь, 36 – саянская, 38 – байкальская, 40 – северобайкальская
Основные геоэкологические ограничения	6 видов; из них приоритетные: сложный рельеф и отсутствие водоупора	5 видов; из них приоритетные: сложный рельеф и сейсмическая опасность
Численность всего населения субъекта, тыс. чел.	4077.6	2344.0
Количество ГО, городов и поселков городского типа (пгт)	9 ГО, 12 городов, 2 пгт	10 ГО, 12 городов, 44 пгт и рабочих поселков
Численность городского населения, тыс. чел.	2542.4	1817.2
Доля городского населения, учтенного в расчетах, %	99.8	98.8
Доля городского населения от общего населения субъекта, %	62.4	77.5
Доля городских земель от площади субъекта, %	1.8	0.3
Средняя плотность городского населения в субъекте/городах, чел./км ²	17.8/892.8	2.3/726.6
Плотность автомобильных дорог с твердым покрытием общего пользования на 1000 км/км ²	323	33
Нормативный годовой объем образованного ТКО, тыс. т	497.3	394.0
Количество существующих мусорных полигонов/из них полигонов ТКО	33/19	25/22
Нормативная потребность в площадях для полигонов ТКО, га	337.0	401.5
Основные виды экономической деятельности, структура внутреннего регионального продукта (ВРП)	Промышленный сектор, сфера торговли, строительство и сельское хозяйство (по объему валовой продукции сельского хозяйства занимает 7 место в РФ)	Добыча полезных ископаемых (31%), обрабатывающие производства (11%), транспортировка и хранение (8%)
Доля ВРП субъекта от совокупного объема ВРП всех субъектов России	>1.7% (2021 г.)	1.6% (2021 г.)
Индекс социального благополучия*	2.99	2.91

* Индекс социального благополучия (1 квартал 2022 г.). ТОП-35: <http://civilfund.ru/mat/143>, дата обращения 21.11.2023 г.

Поэтапный подход к оценке благоприятности территории субъектов для размещения полигонов ТКО представлен на примере Республики Башкортостан и Иркутской области, существенно различающихся как по природным, так и по социально-экономическим условиям, учитываемым при обосновании размещения полигонов ТКО.

ОЦЕНКА БЛАГОПРИЯТНОСТИ ТЕРРИТОРИИ МОДЕЛЬНЫХ РЕГИОНОВ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ПОЛИГОНОВ ТКО

Республика Башкортостан относится к Приволжскому федеральному округу. По площади регион занимает 27-е место в России. Территория республики достаточно освоена в хозяйственном отношении, плотность населения составляет 28.4 чел./км² при средней по России 8.3 чел./км². В городах республики проживает 62.4% населения; наиболее крупные из 21 города – Уфа, Стерлитамак, Салават, Нефтекамск, Октябрьский.

Местоположение республики на стыке Европы и Азии в переходной полосе от Восточно-Европейской равнины к Уральским горам и от них к Западно-Сибирской равнине, определяет многообразие природных условий и ресурсов. Территория охватывает несколько существенно различающихся по геологическому строению зон, каждой из которых соответствует свой богатый набор полезных ископаемых. На территории Республики Башкортостан известно более 3 тыс. месторождений шестидесяти видов минерального сырья. В западной части республики в пределах Русской платформы находятся месторождения нефти и газа, в восточной части в пределах Центрально-Уральского поднятия сосредоточены месторождения медно-колчеданных, железных и марганцевых руд, а также месторождения рудного и россыпного золота [2]. Более 40% площади республики занимают леса. Здесь существует 229 особо охраняемых природных территорий и уникальных природных объектов, в том числе на Уфимском плато встречаются карстовые источники, а вблизи городов Стерлитамак, Ишимбай и Салават, вдоль р. Белая – горы Шиханы, которые представляют останки коралловых рифов пермского периода, – источник добычи соды.

К основным ограничениям размещения полигонов ТКО в отдельных районах степной зоны относится отсутствие водоупорных пород, а в горной части республики есть опасность в сейсмическом плане, а также возможно проявление карстовых процессов.

Города – основной источник образования ТКО, поэтому выбор варианта размещения полигонов ТКО зависит не только от геоэкологических ограничений, но и от условий расселения. Распространение городских поселений по территории республики неравномерно, большая часть их сосредоточена в центральной равнинной части.

Именно эти две группы факторов: геоэкологические ограничения и характер распределения населения служили основой для оценки благоприятности территории субъекта для размещения полигонов ТКО.

Иркутская область находится в юго-восточной части Сибирского федерального округа и по площади занимает шестое место в России. Основная часть территории области имеет плоскогорный рельеф с незначительным уклоном к северу и северо-западу. Территория области охватывает юг Среднесибирского плоскогорья и бассейны верхних течений Ангары, Лены и Нижней Тунгуски. На юго-западе в ее пределы вклиниваются горные массивы Восточного Саяна, на востоке – Приморский и Байкальский хребты, Становое и Патомское нагорья. Последнее представляет собой древнюю возвышенность, покрытую тайгой и заболоченными речными долинами. Особенностью территории является высокая сейсмичность, которая должна учитываться при возведении промышленных и гражданских сооружений, что ведет к удорожанию строительно-монтажных работ. Северная и северо-восточная части территории характеризуются повсеместным распространением многолетнемерзлых пород, отдельные участки которых встречаются и в южных районах области. Таким образом, для данной территории приоритетными геоэкологическими ограничениями являются по площади – горный рельеф, а по опасности – проявление сейсмической опасности и наличие мерзлых толщ пород.

Для Иркутской области характерно весьма неравномерное расселение населения. Территория богата минеральными ресурсами. Разрабатываются три месторождения угля, известны три золотопромышленных района. Область обладает значительными запасами редких металлов: ниобия (65% общероссийских запасов); тантала (45%); лития (50%), рубидия, цезия, бериллия и др.

Исторически плотное заселение долины р. Ангара было связано с добычей и обработкой полезных ископаемых. Заселение Патомского нагорья связано с многочисленными месторождениями россыпного и рудного золота, а – Лено-Ангарского плато в центральной части области связано со строительством БАМ [1].

Для сравнения природных и социально-экономических особенностей рассматриваемых субъектов основные их характеристики приведены в табл. 1.

При превышении площади Иркутской обл. над территорией второго субъекта в 5 раз городское население здесь меньше в 1.4 раза. В этих регионах преобладает городское население. В Башкирии находится 4 города с населением превышающих 100 тыс. человек, в Иркутской обл. – 3. Плотность городского населения в Иркутской обл. почти в 8 раз ниже, чем в Башкортостане,

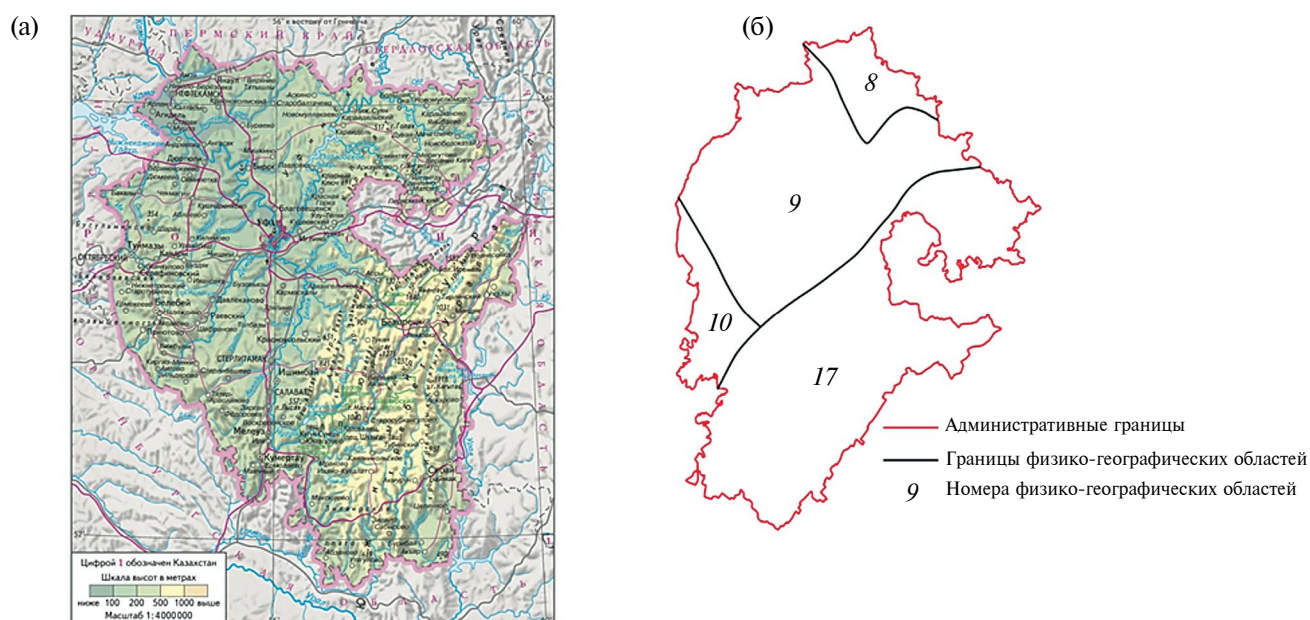


Рис. 1. Физическая карта (а) и границы физико-географических областей (б) Республики Башкортостан (см. табл. 1).

что объясняется разницей в площадях субъектов и преобладанием малых по площади поселков (средняя площадь городов и поселков 36.8 км^2) при средней площади города в республике 106 км^2 . Значения показателя плотности населения на городских землях по субъектам близки.

В соответствии с расселением городского населения распределяются нормативные годовые объемы отходов. По данным субъектам эти цифры соответствуют проценту городского населения в каждой физико-географической области. Так, в Башкортостане максимальный объем отходов образуется в пределах лесостепной области, а в Иркутской — в долине р. Ангара, где сосредоточено более 60% городского населения, и этот объем, как и число городских жителей в 10 раз больше, чем на побережье оз. Байкал. Однако в летний сезон эта величина будет здесь больше за счет высокой рекреационной нагрузки.

Интересно отметить, что соотношение величин нормативных площадей полигонов [3] различается по этим двум районам только в 3 раза. Это подтверждается и расчетами в целом по субъектам, где соотношение величин потребности в площадях для полигонов отходов, рассчитанное по нормативам, обратное относительно общей численности населения в субъектах, что объясняется преобладанием более крупных по населению городов в Башкортостане и рассредоточением населения в малочисленных поселках Иркутской обл.

Территория Башкортостана находится в пределах лесной, лесостепной, степной и горной южно-уральской физико-географических областей (рис. 1). Территория Иркутской обл. находится в пределах пяти физико-географических областей

(рис. 2). Распределение площадей субъектов, расположенных в разных физико-географических областях, представлено в табл. 2.

Сравнение оценочных показателей геоэкологических ограничений свидетельствует о большой их дифференциации по физико-географическим областям: они изменяются в 2.7 раза в республике и в 2.9 раза в области. Учет этого показателя особенно важен в пределах степной области Башкортостана и Патомского нагорья в Иркутской обл. Интересно, что оценка геоэкологических ограничений с учетом их площадного распространения по физико-географическим областям Республики Башкортостан снизилась на 3%, а Иркутской области — возросла на 30%. Такие различия указывают на роль площадей в проводимой оценке.

Общая оценка благоприятности территории субъектов для размещения полигонов ТКО устанавливается с помощью коэффициента kl , отражающего социально-экономические особенности территории (см. ф. (2)).

В итоге наилучшие условия оказались для городов лесной и степной областей Башкортостана с относительно низкой долей городского населения, хотя значения оценки геоэкологических ограничений в лесостепной области более, чем в 2 раза ниже, чем в степной из-за отсутствия водопора в последней. В Иркутской обл. более благоприятная ситуация характерна для поселков, расположенных в саянской и северобайкальской физико-географических областях.

Индекс благоприятности территории субъектов для размещения полигонов ТКО оценивается в баллах с учетом социально-экономических условий и изменяется от максимального значения

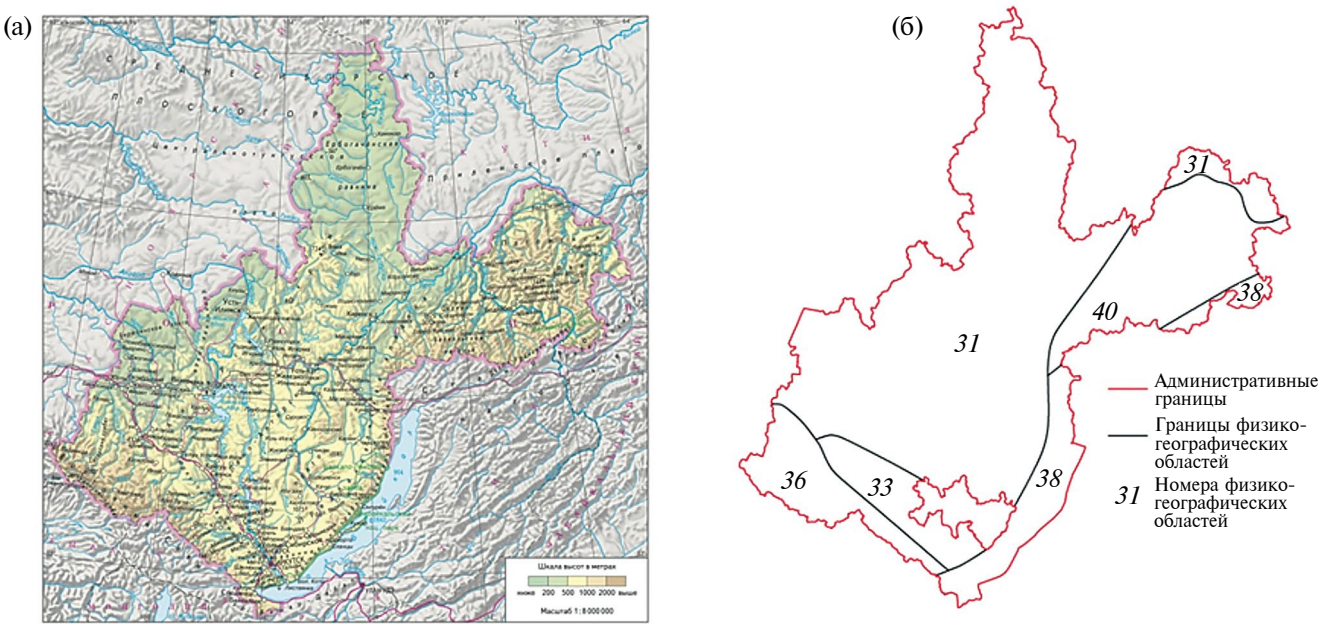


Рис. 2. Физическая карта (а) и границы физико-географических областей (б) Иркутской области (см. табл. 1)

Таблица 2. Примеры оценки благоприятности территорий субъекта для размещения полигонов ТКО

Физико-географическая область	Оценка геоэкологических ограничений в физико-географических областях, O_j , балл	Доля площади субъекта в j-й физико-географической области, %	Плотность городского населения, чел./км ²	Значения k_l	Индивидуальная оценка геоэкологической и социально-экономической благоприятности размещения полигонов ТКО по физико-географическим областям в субъектах, O_m , балл
Республика Башкортостан					
8 – лесная	5.0	5	24.1	1.32	0.33
9 – лесостепная	3.5	40	31.3	1.56	2.19
10 – степная	9.5	5	16.0	1.10	0.53
17 – южно-уральская	8.5	50	1.9	1.19	5.06
Суммарные/средневзвешенные оценки	–/6.60	100/–	–/17.8		–/8.11
Иркутская область					
31 – таежная	13.5	60	1.1	1.03	8.38
33 – островная лесостепь	5.7	10	14.9	2.07	1.24
36 – саянская	6.5	8	0.01	1.00	0.50
38 – байкальская	5.0	7	2.1	1.20	0.42
40 – северобайкальская	14.5	15	0.2	1.00	2.21
Суммарные/средневзвешенные оценки	–/9.00	100/–	–/2.3		–/12.75



Рис. 3. Индекс благоприятности размещения полигонов ТКО субъектов РФ.

к минимальному в Башкортостане в ~15 раз в Иркутской обл. – в ~20 раз (см. табл. 2). С учетом размещения населения, нормативными объемами отходов и площадями их размещения Индекс по субъектам существенно изменился, особенно в Иркутской обл.

Анализ результатов показал, что зависимость между оценками благоприятности размещения ТКО с некоторыми показателями не выявлена. Так, значения плотности населения в рассматриваемых примерах существенно различаются даже при близких значениях долей городского населения и площадей. Не отмечается прямая зависимость Индекса благоприятности территорий для размещения полигонов ТКО с экспертной балльной оценкой геоэкологических ограничений в физико-географических областях. С одной стороны, это связано с высокой генерализацией учитываемых ограничений и большой дифференциацией распределения площадей субъекта в физико-географических областях, с другой, подчеркивает важность учета социально-экономических условий при выборе мест размещения полигонов ТКО.

Высокая корреляция отмечена между нормативными объемами ТКО в физико-географических областях и kl ($r = 0.81$), а также с показателями площадей нормативно-необходимых для размещения ТКО в физико-географических областях и ($r = 0.95$).

ОЦЕНКА БЛАГОПРИЯТНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ СУБЪЕКТОВ РОССИИ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ПОЛИГОНОВ ТКО

Территориальная дифференциация результатов оценки представлена на рис. 3. Значения рассчитанного индекса изменяются в диапазоне от 2.7 до 14.9 баллов при среднем значении 6.8 балла. *Наименьшие значения индекса соответствуют наилучшим благоприятности условий для размещения полигонов ТКО в регионе, т.е. дополнительных затрат для их строительства и эксплуатации не потребуется.*

В итоге половина субъектов характеризуется относительно благоприятными геоэкологическими условиями для размещения полигонов ТКО. В основном это субъекты ЦФО, СЗФО (кроме северных), ПФО и ДВФО. Лучшими показателями отличаются области, находящиеся на границе лесной и лесостепной зон (рис. 4). Высокие показатели, отражающие максимальную неблагоприятность получены для регионов Сибирского ФО и Дальнего Востока, для которых характерны такие геоэкологические ограничения как наличие толщ многолетнемерзлых пород, горный рельеф, заболачивание и сейсмичность (рис. 5). Для регионов Дальнего Востока характерно исключение из числа благоприятных площадей сезонного затопления.



Рис. 4. Топ-10 регионов РФ с минимальными значениями Индекса благоприятности условий для размещения полигонов ТКО.

Учитывая численность городского населения, рассчитывался нормативный объем накапливаемых коммунальных отходов⁷. Среди регионов максимальный фактический годовой объем ТКО (по данным официальной статистики – Росприроднадзор, 2021) получен для московского региона, включающего Москву и Московскую область, на втором месте – Свердловская область, замыкает рейтинг лидеры Красноярский край. Интересно, что при соотношении этих значений с рассчитанным Индексом благоприятности размещения полигонов ТКО выделяются: Свердловская область, Краснодарский край и Ростовская область. Для этих регионов характерны существенные ограничения для размещения полигонов ТКО (рис. 6).

Для большинства регионов РФ характерно превышение фактического годового объема ТКО (2021 г.) над нормативным более чем в 2 раза, что помимо негативных экологических последствий приведет к значительным финансовым издержкам за сверхлимитное размещение отходов⁶. В то же время региональные нормативы вводятся из расчета реализации проекта “Комплексного обращения...”¹. Благодаря системным мерам государственной поддержки в стране появляется все больше новых мощностей по обработке и утилизации ТКО.

Учитывая, что объем производимых ТКО пропорционален количеству населения (в основном городского) в субъектах, были проанализированы

данные о плотности населения и доле городского населения. Сопоставление этих показателей с ожидаемыми объемами ТКО показало отсутствие прямой связи между ними, так как плотность населения связана не только с численностью населения, но и с площадью территории их проживания.

По данным аналитических отчетов экспертов [5], наблюдается прямая зависимость между количеством сгенерированных ТКО и уровнем жизни в регионах, рассчитываемого, как отношение среднемесячной зарплаты к стоимости потребительской корзины (минимальной стоимости жизни). Сопоставление данных рейтинга субъектов РФ по Индексу социального благополучия с опубликованными данными по производству ТКО на душу населения, позволяет отметить, что для Амурской области и Ямало-Ненецкого АО прослеживается четкая связь между этими показателями. Так, Амурская область в 2022 г. стала лидером по генерации бытового мусора со средним показателем 652.4 кг на человека [6], т.е. чем выше индекс социального благополучия, тем больше потенциальный объем коммунальных отходов.

Темпы роста образования бытовых отходов во многом зависят от уровня и структуры потребления, наличия необходимой инфраструктуры, а также степени экологической ответственности потребителей и могут отличаться в несколько раз в регионах.

Известно, что не все ТКО попадают на полигоны, часть из них подвергается вторичной переработке. Поэтому сам рост генерации бытовых отходов не обязательно сопряжен с увеличением экологического ущерба и дополнительной нагрузкой на регионы. При интеграции подходов экономики замкнутого цикла в российскую практику обращения с отходами следует ожидать, что большая часть отходов будет перерабатываться и вовлекаться в повторный оборот. Однако в 2022 г. из 45.9 млн т произведенных ТКО на утилизацию было отправлено всего 6.6%. Причем сжигание мусора теперь также приравнивается к утилизации. Несмотря на то что большинство ТКО относятся к наименее опасным IV и V классам, огромные объемы такого разнородного по составу мусора при неправильном размещении и отсутствии утилизации наносят огромный ущерб окружающей среде и человеку – поэтому разработка методов и подходов к размещению полигонов ТКО для сортированных отходов является актуальной и первоочередной задачей на пути сохранения окружающей природной среды и устойчивого развития экономики и общества. Для урбанизированных районов планируется дальнейшее повышение темпов рециркуляции и снижение объемов захоронения отходов.

⁷ Постановление Правительства РФ № 758 от 29.06.2018 г.

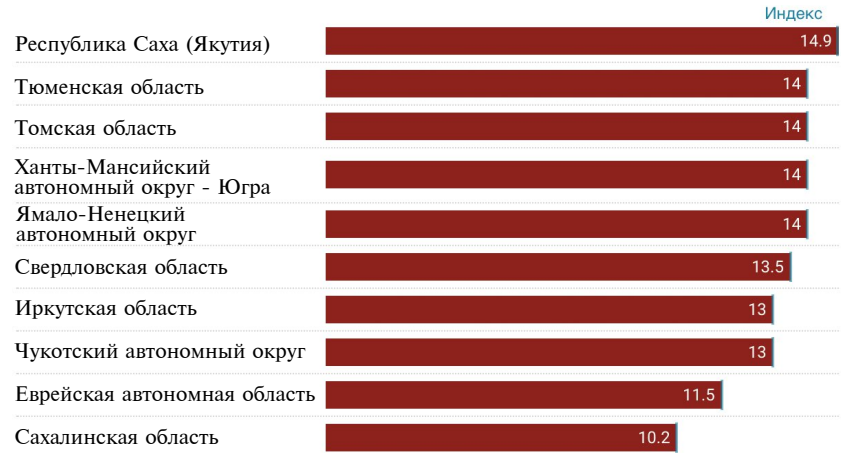


Рис. 5. Топ-10 регионов РФ с максимальными значениями Индекса благоприятности условий для размещения полигонов ТКО.



Рис. 6. Топ-10 регионов по распределению нормируемого годового объема ТКО и показатель Индекса благоприятности размещения полигонов ТКО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненной оценки позволяют судить о благоприятности условий регионов для размещения на их территории полигонов ТКО, представить различия в сложности их строительства из-за наличия негативных геоэкологических факторов и социально-экономических условий субъектов. Учет в комплексной оценке таких показателей, как количество городов и численность городского населения, региональные нормы сбора ТКО, удорожание строительства полигона при наличии различных геоэкологических ограничений, ценность занимаемых полигоном земель и др., обеспечивает интегральную оценку существующих региональных различий, которые необходимо учитывать при планировании размещения полигонов ТКО, это позволит прогнозировать объем выделения средств на реализацию

Федерального проекта “Комплексная система обращения с твердыми коммунальными отходами”.

Предложенный многоступенчатый подход к оценке благоприятности размещения полигонов ТКО позволяет комплексно оценить основные ограничения как природные, так и социально-экономические на единой методической основе на федеральном уровне. Полученные количественные оценки территории субъектов, выраженные Индексом благоприятности размещения полигонов ТКО, рассчитанным в баллах, могут быть использованы при принятии эффективных решений в области управления отходами.

Исследования проведены в ходе выполнения государственного задания ИГЭ РАН по теме НИР № гос. регистрации 122022400104-2 при частичной финансовой поддержке РНФ, (проект № 22-17-00045).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бояркин В.М., Бояркин И.В. География Иркутской области. 7-е изд., перераб. и доп. Иркутск: Сарма, 2011. 255 с.
2. Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ООО ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
3. Сборник удельных показателей образования отходов производства и потребления. Госкомэкология РФ, 1999 г.
<https://www.solidwaste.ru/i/news/30019/1999.pdf>
4. Технология обращения с твердыми коммунальными отходами. Ч. 2: учебное пособие / Е.А. Васильева. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2021. 80 с.
5. Третьякова Е.А., Шимановский Д.В. Социальное благополучие и эколого-экономическая динамика: аналитическая модель // Проблемы прогнозирования. 2020. № 1. С. 146–154.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42942040>.
6. <https://tass.ru/ekonomika/18518801> [Электронный ресурс] (дата обращения 23.11.2023).
7. <https://vyvoz.ru> [Электронный ресурс] (дата обращения 23.11.2023).

METHODOLOGICAL BASES FOR ASSESSING GEOENVIRONMENTAL AND SOCIOECONOMIC CONDITIONS OF OPTIMAL ALLOCATION OF MSW LANDFILLS

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

^a*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,*

Ulansky per. 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia

[#]*E-mail: v.zaikanov@mail.ru*

The issues of solid municipal waste (MSW) management are very urgent now due to the increasing accumulation of MSW amount along with rapidly rising urban population. Despite all the efforts undertaken for developing a high-tech infrastructure for waste treatment and disposal, a significant part of it is still disposed to landfills. The index of favorability for the MSW landfill allocation is determined on the basis of a comprehensive account of geoecological constraints and socioeconomic conditions; it reflects the regional differentiation between the administrative subjects of the Russian Federation. The suggested approach to assessing the subjects' territory for the scientifically grounded placement of MSW landfills contributes to solving the problem of effective waste management.

Keywords: *MSW landfills, the index of favorable placement of MSW landfills, geoecological conditions and restrictions, socioeconomic conditions, physical and geographical areas, subjects of the Russian Federation*

REFERENCES

1. Boyarkin, V.M., Boyarkin, I.V. [Geography of the Irkutsk region]. Irkutsk, Sarma Publ., 2011, 255 p. (in Russian)
2. Puchkov, V.N. [Geology of the Urals and the CisUrals areas (acute issues in stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny)]. Ufa, DizainPoligrafServis Publ., 2010, 280 p. (in Russian)
3. Collection of specific indices in production and consumption waste generation. Goskomekologiya RF, 1999.
<https://www.solidwaste.ru/i/news/30019/1999.pdf> (in Russian)
4. [Technology of solid municipal waste management. Part 2: textbook]. E. A. Vasilyeva. St. Petersburg, SHTE SPbGUPTD, 2021. 80 p. (in Russian)
5. Tretyakova, E.A., Shimanovskii, D.V. [Social well-being and ecological and economic dynamics: an analytical model]. *Problemy prognozirovaniya*, 2020, no. 1, pp. 146–154.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42942040>. (in Russian)
6. <https://tass.ru/ekonomika/18518801> [Electronic resource] (accessed 11.23.2023) (in Russian)
7. <https://vyvoz.ru> [Electronic resource] (accessed 11.01.2024). (in Russian)