

ISSN 0869-7809

Номер 4

Июль–Август 2024



ГЕОЭКОЛОГИЯ

Инженерная геология
Гидрогеология
Геокриология



НАУКА

— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 4, 2024

Особенности формирования инженерно-геологических условий на территории Белоруссии под влиянием эрозионных процессов

А. И. Павловский, А. Н. Галкин, И. А. Красовская, О. В. Шершнев 3

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Неоструктурное районирование и опасные процессы в районе Чарской рифтовой впадины

С. А. Несмеянов, Д. О. Сергеев, О. А. Воейкова, А. П. Кулаков 14

Влияние взрывных работ на возникновение техногенно-тектонических землетрясений в Восточном Оренбуржье

М. Ю. Нестеренко, В. С. Белов, Э. Р. Галеева 29

МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ И ГИДРОГЕОЛОГИИ

Влияние современных климатических изменений на параметры модели морфологической структуры речных пойм в криолитозоне

М. В. Архипова, Д. Ю. Гущина, О. Н. Трапезникова 38

ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

Физико-химическая механика дисперсных пористых материалов — новый подход к оценке механической устойчивости глинистых грунтов

В. И. Осипов, В. Н. Соколов, Ф. С. Карпенко 50

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Оценка региональных фоновых значений донных отложений водных объектов как основа их мониторинга

Г. Ю. Толкачев, Н. В. Коломийцев, Б. И. Корженевский 64

Геохимия и условия формирования состава природных вод северной окраины г. Казань

Р. Х. Мусин, А. Р. Идиятуллина, А. Д. Хамитов, К. Р. Миннебаев 71

УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

Оценка геологической среды для территориальной схемы обращения с твердыми коммунальными отходами

И. В. Козлякова, О. Н. Ерёмина, Е. Р. Романова, А. Г. Хайрединова, Е. С. Чуткерашвили 86

CONTENTS

Number 4, 2024

Formation specifics of engineering geological conditions in Belarus under the influence of water erosion processes

A. I. Pavlovsky, A. N. Galkin, I. A. Krasovskaya, O. V. Shershnev

3

NATURAL AND TECHNONATURAL PROCESSES

Neostuctural zoning and hazardous processes in the Chara rift basin

S. A. Nesmeyanov, D. O. Sergeev, O. A. Voeykova, A. P. Kulakov

14

The impact of mine blasting on the occurrence of human-induced tectonic earthquakes in the Eastern Orenburg region

M. Y. Nesterenko, V. S. Belov, E. R. Galeeva

29

MODELS IN ENGINEERING GEOLOGY AND HYDROHEOLOGY

The impact of climate change on morphological patterns of river floodplains in cryolithozone

M. V. Arkhipova, D. Yu. Gushchina, O. N. Trapeznikova

38

SOIL AND ROCK ENGINEERING AND MECHANICS

Physicochemical mechanics of disperse porous materials as a new approach to assessing mechanical stability of clay soils

V. I. Osipov, V. N. Sokolov, F. S. Karpenko

50

ENVIRONMENT CONTAMINATION

Assessment of regional background values of bottom deposits at water bodies as their monitoring basis

G. Yu. Tolkachev, N. V. Kolomyitsev, B. I. Korzhenevskiy

64

Geochemistry and formation conditions of the natural water composition in the northern outskirts of Kazan

R. Kh. Musin, A. R. Idiyatullina, A. D. Khamitov, K. R. Minnebaev

71

UTILIZATION AND DISPOSAL OF WASTE

Assessment of geological environment for the territorial scheme of municipal solid waste management

I. V. Kozliakova, O. N. Eremina, E. R. Romanova, A. G. Khairidinova, E. S. Chutkerashvili

86

УДК 551.435.1:624.131(476)

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛОРУССИИ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

© 2024 г. А. И. Павловский^{1,*}, А. Н. Галкин^{2,**}, И. А. Красовская², О. В. Шершнева^{3,***}

¹Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости 65, Минск, 220013 Беларусь

²Витебский государственный университет имени П.М. Машерова,
Московский пр. 33, Витебск, 210038 Беларусь

³Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины,
ул. Советская 104, Гомель, 246028 Беларусь

*E-mail: aipavlovsky@mail.ru

**E-mail: galkin-alexandr@yandex.ru

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

Поступила в редакцию 13.03.2024 г.

После доработки 12.04.2024 г.

Принята к публикации 20.07.2024 г.

В статье приведены результаты комплексного изучения условий развития и особенностей проявления водно-эрозионных процессов в различных природно-хозяйственных обстановках, как важное условие формирования инженерно-геологических особенностей территории. Установлено, что развитие, формы проявления и интенсивность водно-эрозионных процессов на территории Беларуси при всем многообразии природно-хозяйственных обстановок определяют энергетический потенциал рельефа, бассейновая структура территории и хозяйственная деятельность человека. Проведена типизация инженерно-геологических условий развития водно-эрозионных процессов. Наиболее сложные инженерно-геологические обстановки сложились в пределах краевых ледниковых возвышенностей, имеющих высокий энергетический потенциал рельефа, двухпородный тип грунтовой толщи, сложную бассейновую структуру, а также на территориях активного инженерно-хозяйственного освоения.

Ключевые слова: водно-эрозионно-аккумулятивный цикл, эрозия, аккумуляция, ручейковая сеть, временные русловые потоки, овраги, делювиальный смыв, конус выноса

DOI: 10.31857/S0869780924040012 EDN: SGMTKO

ВВЕДЕНИЕ

Изучению современного морфолитогенеза в настоящее время уделяется большое внимание, причем одним из самых актуальных направлений подобных работ является исследование водно-эрозионных процессов в рамках единого водно-эрозионно-аккумулятивного цикла. Это обуславливается прежде всего значительным материальным ущербом, наносимым деятельностью текущих вод, в результате которой разрушаются инженерные сооружения и коммуникации, уничтожаются сельскохозяйственные угодья, лесные насаждения и др. Кроме того, интенсивное развитие водно-эрозионных процессов значительно ухудшает среду обитания человека, обостряя и без того серьезные экологические проблемы. При этом необходимо отметить, что в каждом регионе эти процессы проявляются своеобразно и требуют специальных разносторонних исследований. Без таких работ невозможно решить сложный

комплекс задач, связанных с инженерным освоением территории, рациональным использованием природных ресурсов, улучшением экологической обстановки.

Флювиальный литоморфогенез развивается по принципу катены, основными звеньями которой являются делювиальный смыв и аккумуляция — эрозия и аккумуляция временных русловых потоков — эрозия и аккумуляция постоянных русловых потоков, которые привязаны к определенным гипсометрическим уровням, на каждом из которых происходит эрозия, транспорт и аккумуляция наносов. Важнейшие законы развития, взаимосвязь и взаимообусловленность проявления всех видов флювиальных процессов, сопряженность их развития во всех звеньях сети водных потоков сформулированы в работах Н.Е. Кондратьева, И.В. Попова, Ф.В. Снищенко [9], Н.И. Маккавеева [12–14], А.Ю. Сидорчука [28], Р.С. Чалова [14, 28] и др.

Единство и взаимосвязь всех звеньев водно-эрозионно-аккумулятивного цикла (флювиальный литоморфогенез) проявляются на склонах возвышенностей, речных долин, овражно-балочных сетей, образуя делювиальные, аллювиальные и пролювиальные отложения, а также характерные для этого цикла формы рельефа: эрозионные — овраги, балки, долины рек; и аккумулятивные — конусы выноса, поймы, террасы и дельты рек.

Важно отметить, что в системе постоянно происходят процессы, с одной стороны, приводящие к выполаживанию неровностей и уменьшающие расчлененность рельефа, а с другой — увеличивающие расчлененность рельефа и приводящие к образованию выработанных форм. Везде, где имеется сток, происходит естественная нормальная эрозия, которая в условиях интенсивного инженерно-хозяйственного освоения резко возрастает.

Все звенья водно-эрозионно-аккумулятивного цикла оказывают большое влияние на формирование инженерно-геологических условий территорий и часто изучаются в отдельности, хотя переходы из одного вида в другой происходят постепенно, без резких границ и строгих классификационных признаков, определяя тем самым непрерывность эрозионного процесса [5]. В то же время флювиальные процессы, наряду с непрерывностью, имеют и прерывистый характер, что отражается в их структурном положении в рельефе на определенных гипсометрических уровнях, которые между собой тесно взаимосвязаны. Каждое звено водно-эрозионно-аккумулятивного цикла имеет разные пространственно-временные параметры и формирует свойственные ему рельеф и отложения [4].

В пределах Белоруссии флювиальные процессы на позднелейстоцен-голоценовом этапе являются самыми существенными по литоморфогенетическому значению экзогенными геологическими и инженерно-геологическими процессами. Их изучением в разные годы занимались Б.С. Болдышев [1, 2], А.Н. Галкин [3, 4, 27], В.В. Жилко [1, 2, 6], Г.А. Колпашников [7, 8], А.А. Лепешев [10, 11], А.В. Матвеев [4, 15–20], В.М. Мотуз [22, 23], Л.А. Нечипоренко [15–17], А.И. Павловский [3, 4, 17–21, 24–27] и др. Работы этих авторов посвящены изучению условий и факторов развития и пространственной дифференциации водно-эрозионных процессов, районированию территории республики в отношении эрозионных процессов, их интенсивности в различные сезоны. Ими описаны морфолого-морфометрические характеристики овражно-балочной сети, обоснована необходимость проведения в этих районах противозерозионных мероприятий, составлен ряд карт, характеризующих развитие овражной и плоскостной эрозии на территории Белоруссии, заложены стоковые площадки, проводились стационарные наблюдения процессов эрозии почв, изучалась эффективность мероприятий по борьбе с ней.

Цель данной работы — комплексное изучение верхних звеньев водно-эрозионно-аккумулятивного цикла (делювиальный смыл и аккумуляция, эрозия и аккумуляция временных русловых потоков) в различных природно-хозяйственных обстановках, как важное условие формирования инженерно-геологических особенностей территории Белоруссии.

Работа базируется на анализе фактического материала, собранного и обработанного авторами более чем за 35-летний период, на основе использования данных собственных натурных наблюдений за развитием плоскостной и линейной эрозии и аккумуляции (рис. 1), аэрофото- и космических снимков, литературных и других открытых источников информации, фондовых материалов различных геологических организаций.

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ВОДНО-ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Территория Белоруссии занимает западную часть Восточно-Европейской равнины и входит в область развития четвертичных покровных материковых оледенений, оказавших непосредственное влияние на формирование толщи поверхностных отложений и рельефа региона.

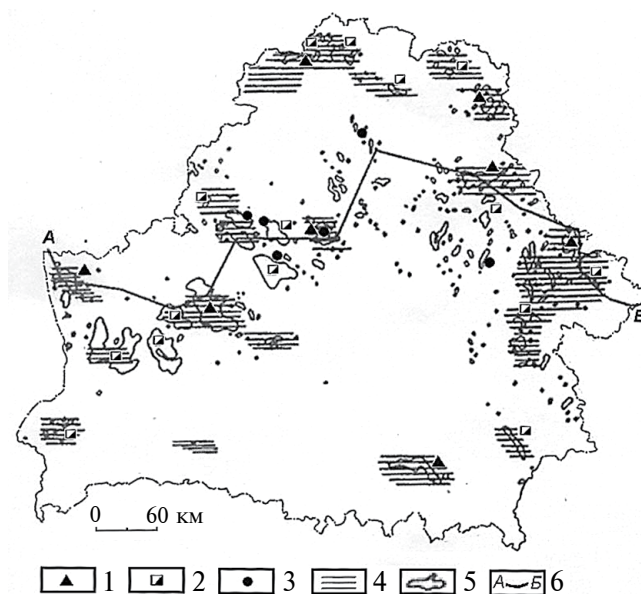


Рис. 1. Картограмма фактического материала. 1 — участки инструментальной съемки форм линейной эрозии; 2 — участки детальных полевых исследований водно-эрозионных процессов; 3 — участки, на которых получены количественные характеристики плоскостной эрозии по литературным данным; 4 — территории, на которых проводились общие геолого-геоморфологические исследования; 5 — территории распространения форм линейной эрозии; 6 — линия геолого-геоморфологического профиля.

На позднелейстоцен-голоценовом этапе происходит интенсивное преобразование реликтовых морфоскульптур ледникового, флювиогляциального, лимногляциального генезиса и формирующих их отложений современными геологическими процессами, где значительная роль принадлежит водно-эрозионному литоморфогенезу, особенности проявления которого показаны в табл. 1.

Развитие водно-эрозионных процессов на территории страны в значительной степени предопределено комплексом современных природно-антропогенных условий, которые можно разделить на климатические, морфометрические, геологические, почвенно-растительные и техногенные группы факторов.

Влияние этих групп факторов на развитие процессов отличается пространственно-временной неоднородностью. Компонентный анализ наиболее существенных параметров (крутизна и длина склонов, густота и глубина расчленения рельефа, состав и допустимые неразмывающие скорости покровных отложений, режим влажности, лесистость, распаханность площади водосборов и т.д.) позволил выделить три главные компоненты, вклад которых в общую дисперсию комплекса показателей превышает 50% [25, 29].

Первая главная компонента имеет вклад 27.5% общей дисперсии, и максимальные компонентные положительные веса приходятся на вертикальное расчленение и крутизну склонов, отрицательные — на длину речной сети и площадь водосборных бассейнов. Учитывая компонентные веса и распределение значений по карте, первую главную компоненту можно рассматривать как интегральный фактор влияния морфометрических характеристик на развитие флювиальных

процессов. Основная особенность пространственной дифференциации первой главной компоненты — это соотношение топографических ступеней и противопоставление возвышенностей Центральной Белоруссии низинам Полесья и Поозерья (рис. 2а).

Вторая главная компонента (15.9%) характеризуется следующими особенностями: положительные веса приходятся на площади водосборных бассейнов и длины водотоков, отрицательные — на слой стока в период снеготаяния и лесистость. Она отражает широтные различия (северная, центральная и южная части республики) и влияние бассейновой раздробленности территории на развитие водно-эрозионных процессов (рис. 2б).

Для третьей главной компоненты (12.8%) максимальные положительные веса приходятся на лесистость, густоту расчленения рельефа и площади водосборных бассейнов, отрицательные — на распаханность территории и величину слоя поверхностного среднего годового стока. Картографическая интерпретация полученных результатов отражает влияние степени хозяйственной освоенности территории на интенсивность водно-эрозионных процессов (рис. 2в).

Значительный процент, приходящийся на другие компоненты (в сумме >40%), свидетельствует о высокой изменчивости исследуемых процессов и их зависимости от внешних и внутренних факторов.

Таким образом, развитие, формы проявления и интенсивность водно-эрозионных процессов на территории Белоруссии определяют энергетический потенциал рельефа, бассейновая структура территории и хозяйственная деятельность человека.

Таблица 1. Особенности проявления водно-эрозионных процессов на территории Белоруссии

Арена проявления	Основные типы водотоков	Вид проявления процессов	Вид рельефа	Формы рельефа	Тип отложений
Склоновые поверхности	Пластовые (временные)	Плоскостная эрозия	Выработанный	Лопастные, линейные, овальные микропонижения	Делювий
		Рассредоточенная аккумуляция	Аккумулятивный	Маломощные делювиальные шлейфы	
	Микро-русовые (временные)	Ручейковая эрозия	Выработанный	Разнопорядковая ручейковая сеть	
		Присклоновая аккумуляция	Аккумулятивный	Сегментные микроконусы выноса	
Овражно-балочные системы	Русловые (временные)	Линейная эрозия	Выработанный	Промойны, овраги, балки	Пролувий
		Сосредоточенная аккумуляция	Аккумулятивный	Сегментные конусы выноса, балочные террасы	

ДЕЛЮВИАЛЬНЫЙ СМЫВ И АККУМУЛЯЦИЯ

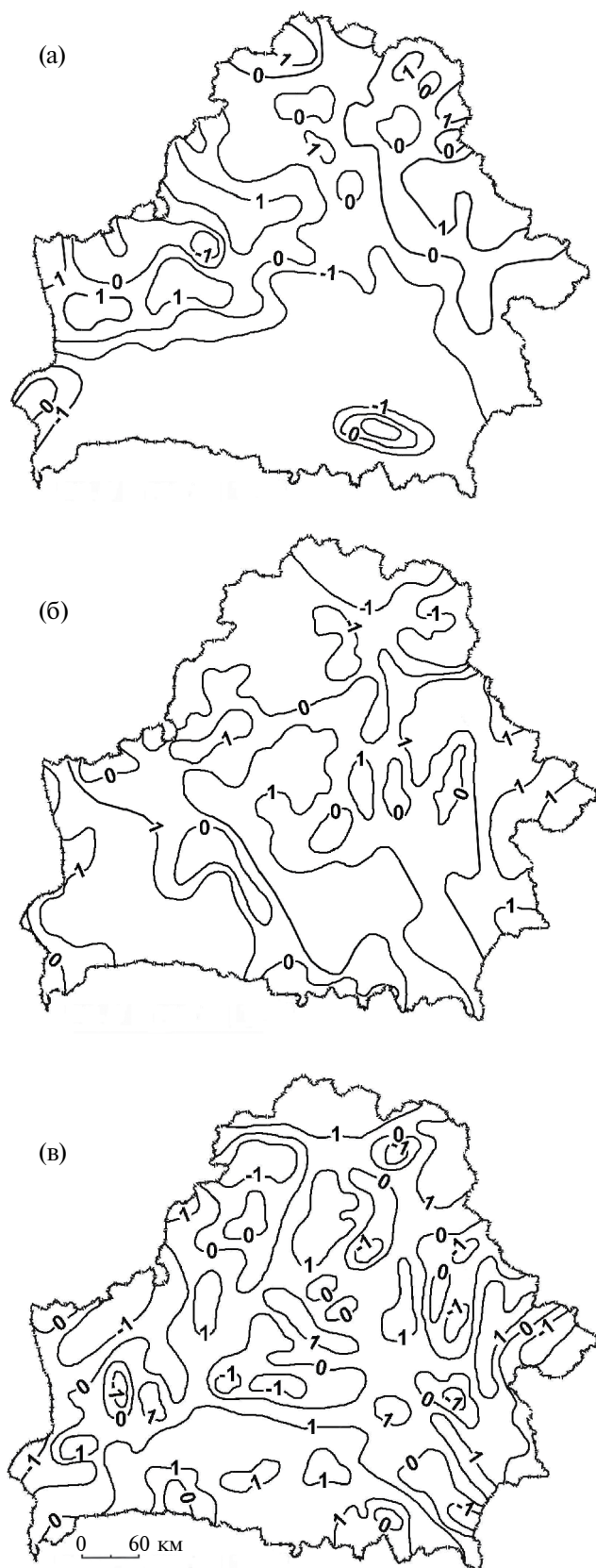


Рис. 2. Значения первой (а), второй (б) и третьей (в) главных компонент комплекса параметров, характеризующих условия развития водно-эрозионных процессов на территории Белоруссии.

Делювиальный смыв и аккумуляция на территории Белоруссии на задернованных и залесенных склонах проявляется очень слабо и активизируется на площадях, используемых в инженерно-хозяйственных целях. На приводораздельных пространствах развивается пластовый и ручейковый (струйчатый) сток, формирующий при объеме осадков, превышающем количество воды, необходимого для смачивания почвы и растительности. Глубина таких потоков зависит от микрорельефа, шероховатости и других особенностей склонов и изменяется от нескольких миллиметров до первых сантиметров. В результате на склонах образуются микропонижения различной формы, подготавливающие склон к струйчатому размыву. Морфологическая роль ручейкового стока более значительна, особенно на территориях интенсивного хозяйственного использования, и проявляется в формировании разнопорядковой ручейковой сети, формирующей особый микрорельеф (рис. 3).

Оценка интенсивности плоскостного смыва на территории Беларуси была выполнена на основании числового моделирования и последующих верификации модели и корректуры вычислительного алгоритма посредством сопоставления расчетных величин с результатами полевых и стационарных наблюдений [25]. Интенсивность смыва с используемых в инженерно-хозяйственных целях земель изменяется от 0.008 до 10.0 мм, составляя в среднем 0.42 мм в год (рис. 4). Максимальные среднегодовые значения плоскостного смыва со склонов (10 мм и более) характерны для краевых ледниковых возвышенностей (Гродненская, Волковысская, Новогрудская, Минская, Оршанская). Рельеф этих территорий в основном холмисто-увалистый или грядово-холмистый, осложненный овражно-балочно-долинной сетью с выравненными водораздельными участками, которые занимают менее 20% общей площади. Гидрографическая сеть хорошо разработана. Крутизна склонов достигает 3° – 10° , а длина – 0.2–1.0 км. Густота эрозионной сети часто превышает 1 км/км^2 , а глубина вертикального расчленения изменяется в пределах 20–50 м. Для возвышенностей характерен пестрый вещественный состав отложений, но чаще всего с поверхности залегают легкоразмываемые песчаные, супесчаные и лессовидные отложения. Все эти природные особенности в совокупности с повышенным количеством осадков (более 600 мм) создают условия для интенсивной эрозии.

Делювиальный смыв определяет баланс вещества на различных участках склона. В привершинных и наиболее крутых частях склона наблюдается размыв, по мере насыщения наносами (при постоянном уклоне) возникают зоны транзита, а у подножья склонов формируются микроконусы выноса и делювиальные шлейфы. В целом



Рис. 3. Ручейковая сеть на склоне Минской возвышенности [11].

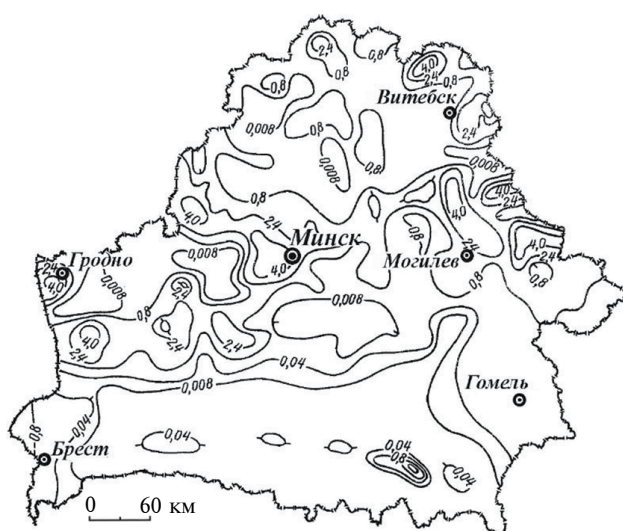


Рис. 4. Величина смыва со склонов, мм/год [4].

следует отметить, что в результате развития делювиальных процессов происходит значительное преобразование земной поверхности, высота возвышенностей юга Белоруссии уменьшилась на 15–20 м, а в северных на 3–5 м, при этом образовались шлейфы делювиально-пролювиальных отложений мощностью от 2 до 5 м [17].

ЭРОЗИЯ И АККУМУЛЯЦИЯ ВРЕМЕННЫХ РУСЛОВЫХ ПОТОКОВ

Формирование водных потоков, обладающих достаточной эрозионной и транспортирующей способностью, приводит к трансформации планетарного склонового стока в русловой, а также

усилению эрозионного процесса и образованию промоин, перерастающих в овраги. Часто можно наблюдать, как по мере увеличения “живой силы” водного потока вниз по склону, прослеживается вся цепочка образования линейной эрозионной формы. Развитие линейной эрозионной формы приводит к изменению взаимодействия русловых и склоновых процессов в следующей последовательности:

- 1) интенсивное взаимодействие руслового и склоновых процессов (морфологическая молодость эрозионной формы);
- 2) уменьшение влияния русловых процессов и увеличение роли склоновых процессов (медленный крип, плоскостной смыв, пролювиальные и делювиальные аккумуляции);
- 3) уменьшение роли склоновых процессов и относительная стабилизация развития эрозионной формы.

Такой способ образования линейных форм эрозии можно назвать открытым.

Кроме того, на территории Белоруссии встречается и “закрытый” (или тоннельный) способ образования эрозионных форм, получивший широкое развитие в районах распространения лёссовых и лёссовидных толщ значительной мощности — более 5 м (Новогрудская, Минская возвышенности, Мозырская гряда, Могилевская и Горецкая равнины). В данном случае механизм образования форм линейной эрозии будет тесным образом связан с проявлением суффозионного процесса, когда в грунтовой массе вначале в результате интенсивной инфильтрации воды происходит расширение пор, каналов и трещин, формируются суффозионные колодцы глубиной

от 0.5 до 2.5 м и диаметром от 0.3 до 1.5 м, соединенные тоннелями. Эти тоннели впоследствии размываются и расширяются, происходит активный вынос продуктов разрушения за пределы массива; своды их обрушаются и образуются провалы глубиной 2–9 м и диаметром до 25 м. Активная роль при этом принадлежит склоновым процессам. На дне провалов возможно возникновение новой серии колодцев и тоннелей. В результате одного или нескольких циклов тоннельной эрозии формируется овраг, в дальнейшем развивающийся обычным образом (рис. 5).

Бурный рост первичной эрозионной формы с сокращением площади водосбора в верховьях и уменьшением крутизны тальвега в низовьях постепенно замедляется, а при достижении предельных значений может прекращаться. Некоторое время объем оврага может увеличиваться за счет склоновых процессов. Постепенно происходит стабилизация эрозионной формы, склоны выполаживаются, днище расширяется, зарастает и образуется балка.

Эрозия и аккумуляция временных русловых потоков развита примерно на 7% территории Белоруссии. Наиболее широко линейная эрозия проявляется в пределах краевых ледниковых возвышенностей – Минской, Новогрудской, Ошмянской, Гродненской, Оршанской, Витебской, Волковысской и др., а также на значительных участках Могилевской и Горецкой равнин и в прибортовых частях крупных речных долин (рр. Днепр, Неман, Западная Двина, Березина, Сож и др.). Это обусловлено прежде всего природными особенностями этих территорий, а именно значительным перепадом высотных отметок на участках различных геоморфологических элементов (до 50 м и более), длиной склонов до 0.2–1.0 км и более, их крутизной 3° – 10° и более, пестрым составом покровных отложений с преобладанием легкоразмываемых песков, супесей и лессовидных супесчано-суглинистых образований, значительным количеством осадков в течение года (более 600 мм) и длительным хозяйственным освоением. На этих участках плотность и густота овражно-балочной сети достигают максимальных значений – плотность 4–6 ед./км², реже до 7–10 ед./км² (рис. 6а), а густота – 0.7–0.9 км/км² (рис. 6б), на отдельных площадях Новогрудской и Мозырской возвышенностях до 5–7 км/км². В наименьшей степени эрозии временных водотоков подвержены участки Загородья, Высоковской и Чечерской равнин, где плотность эрозионных форм не превышает 1 ед./км², а густота эрозионной сети измеряется 0.1–0.4 км/км², в то время как на остальной территории с распространением овражно-балочного рельефа эти показатели составляют 1–2 ед./км² и 0.4–0.5 км/км² соответственно.

Важным параметром количественной оценки интенсивности эрозионных процессов является

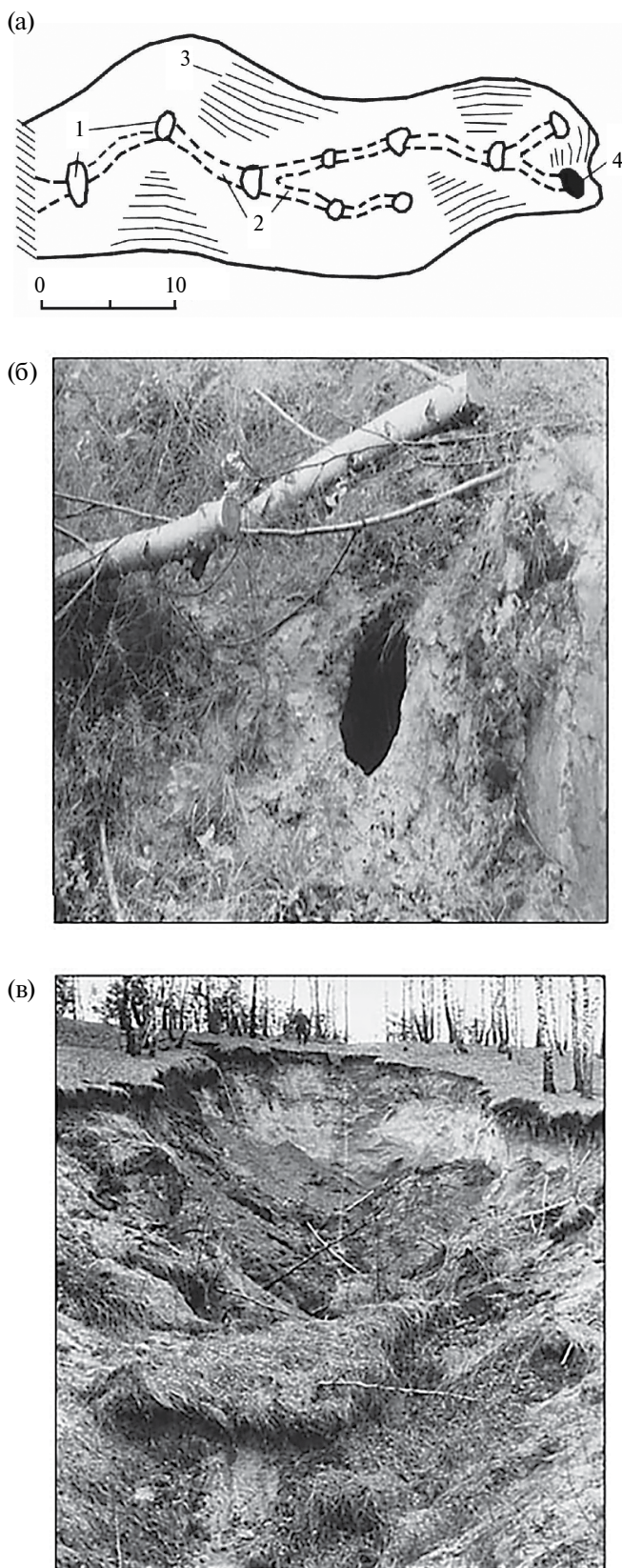


Рис. 5. Схема (а) и формы проявления тоннельной эрозии: б – суффозионный колодец; в – суффозионно-провальный овраг. 1 – колодцы; 2 – связывающие их тоннели; 3 – оползни и осыпи; 4 – водобойный колодец [4].

скорость роста оврагов. По расчетам и инструментальным измерениям современные средние скорости овражной эрозии изменяются в пределах 0.3–3.5 м/год. Необходимо отметить возрастное и морфологическое разнообразие форм линейной эрозии в пределах страны. Широко развиты молодые, активно растущие формы, представляющие собой короткие крутостенные глубокие промоины с висячими устьями, или различные по размерам овраги, приуроченные большей частью к береговому уступу надпойменных террас или участкам пересечения долинами рек возвышенностей и имеющие резко выраженные бровки, крутые, обнаженные и интенсивно обрушающиеся склоны. Довольно часто такие овраги в привершинной части имеют форму амфитеатра, а в средней и особенно нижней – V-образную форму, часто с крутым падением тальвега. Длина оврагов обычно составляет 100–150 м, реже 200–300 м (до 1 км), глубина – до 20–30 м, а ширина поверху – до 30–50 м [24, 25].

Нередко активные овраги возникают при повторном цикле эрозии, когда они врезаются в ложбины стока ледниковых вод и днища древних балок. Встречаются относительно старые, в значительной своей части заросшие овраги. Длина их обычно составляет 0.3–0.5 км, местами до 1.5 км, а глубина – 20–30 м. Поперечный профиль оврагов чаще U-образный, реже V-образный, по форме явно преобладают линейно-вытянутые и булавовидные разновидности, днище хорошо выражено, обычно залесено или задерновано. Склоны в большинстве мест закреплены растительностью. Процессы эрозии в таких оврагах протекают обычно локально, растут они в естественных условиях медленно. Крупные овраги, длиной до 2.0–2.5 км (максимально до 5.5 км) и глубиной вреза до 50 м, встречаются существенно реже.

Разнообразие развития и активное влияние верхних звеньев водно-эрозионно-аккумулятивного цикла (делювиальный смыл и аккумуляция – эрозия и аккумуляция временных русловых потоков) на формирование инженерно-геологических особенностей территории Белоруссии позволили по определенным наборам классификационных признаков выделить наиболее типичные условия их проявления. Характерные для каждого типа параметры указаны в табл. 2. В основу разработанной типизации был положен принцип однородности количественных характеристик выделяемых объектов. При решении этой задачи использовалось 10 параметров, на основании которых выделено 6 типов территорий по условиям развития водно-эрозионных процессов (рис. 7).

В настоящее время делювиальный смыл и линейная эрозия наиболее активно проявляются в районах интенсивного инженерно-хозяйственного освоения. В результате нарушения

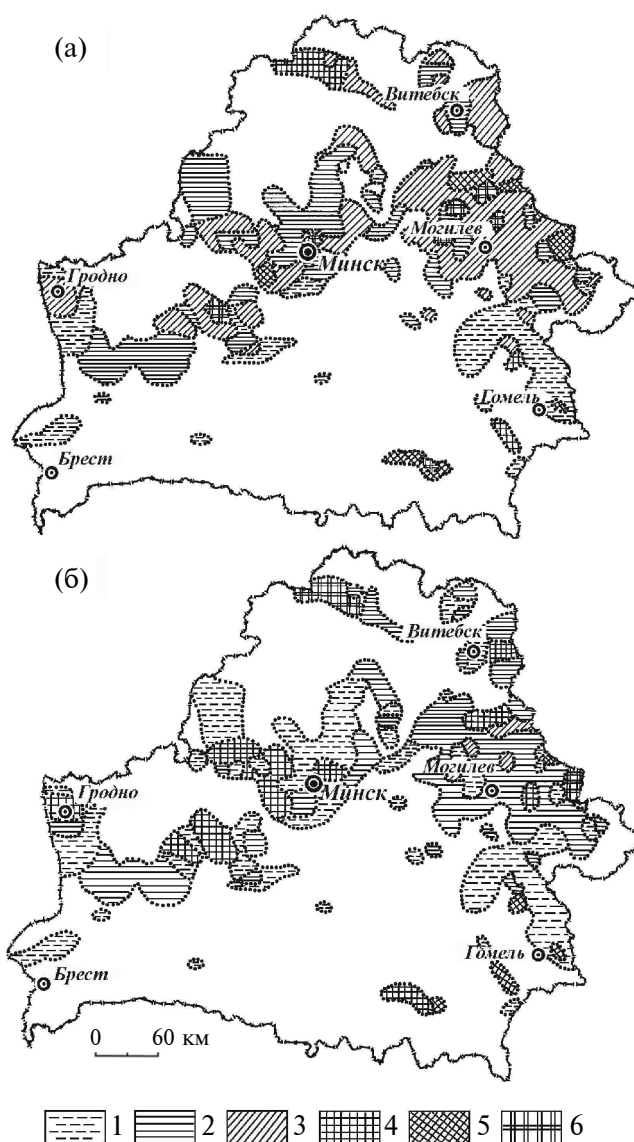


Рис. 6. Схематические карты плотности (а) и густоты (б) форм линейной эрозии [4]. Плотность, [ед./км²]: 1 – до 1.0; 2 – 1.1–2.0; 3 – 2.1–4.0; 4 – 4.1–6.0; 5 – 6.1–7.0; 6 – более 7.0.

Густота, [км/км²]: 1 – 0.40 и менее; 2 – 0.41–0.50; 3 – 0.51–0.60; 4 – 0.61–0.70; 5 – 0.71–0.80; 6 – 0.81 и более.

растительного покрова, изменения водопроницаемости грунтов, потери их структуры, происходят перераспределение поверхностного стока, изменение гидрологического режима малых водосборов в сторону концентрации и неравномерности поверхностного стока и как следствие возрастающие вероятности развития опасных геоморфологических процессов. Морфология и характер развития и проявления аналогичен формам, образующимся в естественных условиях, но резко возрастают скорости смыва поверхностных отложений и линейного роста оврагов, достигающие 10–100 м/год, а также усиливаются склоновые

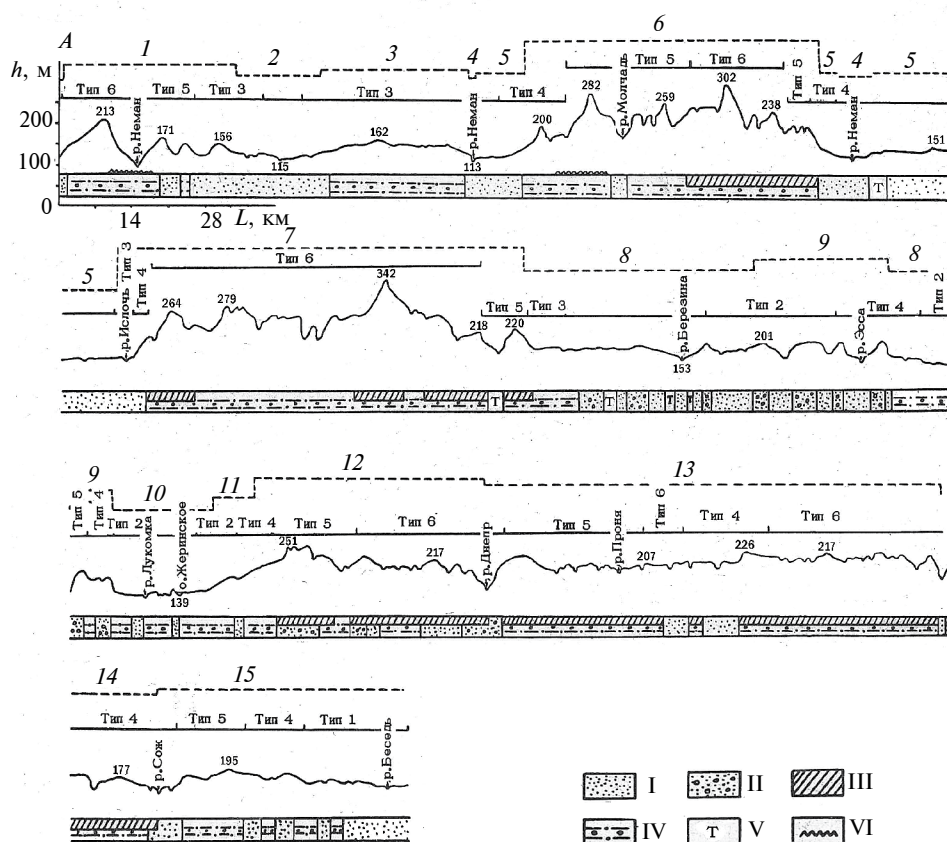


Рис. 7. Профиль по линии А–Б (см. рис. 1), отражающий инженерно-геологические условия развития водно-эрозионных процессов на территории Белоруссии. Тип отложений и строение грунтовой толщи: I – пески; II – песчано-гравийно-галечный материал; III – лессовидные супеси и суглинки; IV – моренные супеси и суглинки; V – торф; VI – напорные краевые морены. Геоморфологические районы: 1 – Гродненская краевая ледниковая возвышенность; 2 – Скидельская озерно-ледниковая низина; 3 – Лидская моренная равнина; 4 – долина р. Неман; 5 – Любчанская водно-ледниковая низина; 6 – Новогрудская краевая ледниковая возвышенность; 7 – Минская краевая ледниковая возвышенность; 8 – Верхнеберезинская водно-ледниковая равнина; 9 – Лукомская краевая ледниковая возвышенность; 10 – Чашникская водно-ледниковая низина; 11 – Сенненская моренная равнина; 12 – Оршанская краевая ледниковая возвышенность; 13 – Горькая моренная равнина с краевыми ледниковыми образованиями; 14 – Могилевская водно-ледниково-моренная равнина; 15 – Костюковичская моренно-водно-ледниковая равнина. Характеристику типов инженерно-геологических условий развития водно-эрозионных процессов (1–6) см. в табл. 2.

и другие процессы. Значительная работа по преобразованию рельефа и грунтов приводит к осложнению инженерно-геологической обстановки в пределах краевых ледниковых возвышенностей, бортовых частей речных долин, котловин озер и крупных водохранилищ, а также территорий населенных пунктов и крупных строительных площадок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Делювиальный смыв и аккумуляция – эрозия и аккумуляция временных русловых потоков, как звенья единого водно-эрозионно-аккумулятивного цикла, являются осложняющим фактором инженерно-геологических условий отдельных территорий Белоруссии, особенно в пределах интенсивного инженерно-хозяйственного освоения.

Результаты их влияния на инженерно-геологические условия территорий можно представить следующим образом.

1. Эрозия и нарушение целостности грунтовых толщ поверхностными плоскостными и временными русловыми потоками, транспортировка и вынос разрушенного материала с последующей аккумуляцией в виде делювиальных присклоновых шлейфов и конусов выноса, сложенных делювиальными и пролювиальными отложениями.

2. Формирование комплекса форм выработанного и аккумулятивного рельефа территории (ручейковая сеть, промоины, овраги, балки, конусы выноса, делювиальные шлейфы и т.д.), изменяющего структуру распределения поверхностного стока и гидрологический режим малых водосборов.

Таблица 2. Типизация инженерно-геологических условий развития водно-эрозионных процессов на территории Белоруссии

Тип	Длина склонов, км	Крутизна склонов, град.	Глубина расчленения, м/км ²	Допустимые неразмывающие скорости поверхностных отложений, м/с	Тип грунтовой толщи	Модуль среднегодового поверхностного стока, л/с×км ²	Распаханность, %	Величина смыва, мм/год	Густота форм линейной эрозии, км/10 км ²	Плотность форм линейной эрозии, шт/10 км ²
1	0.20–0.28	2.0	7.5	0.42	Дисперсный, однородный	5.6	30	0.08	0.4	2–4
2	0.35–0.40	2.5	12.5	0.75	Тот же	6.9	35	0.12	0.45	8–12
3	0.44–0.50	3.5	15.0	0.55	- « -	6.3	35	0.52	0.5	19–20
4	0.52–0.54	4.5	20.0	0.60	- « -	6.5	40	1.6	0.65	25–40
5	0.40–0.55	4.5–5.5	25.0	0.65	Дисперсный, двухпородный	6.6	45	3.2	0.75	44
6	0.44–0.60	5.0–6.0	30.0	0.71	Тот же	6.7	45	>4	0.9	>50

3. Подготовка склоновых поверхностей различных эрозионных форм к развитию на них гравитационных склоновых процессов в виде различных видов оползней, в зависимости от типа грунтовой толщи (однородный, двухпородный).

4. Рост масштабов проявления водно-эрозионно-аккумулятивных процессов и усложнение инженерно-геологических и инженерно-геоморфологических условий на территориях интенсивного хозяйственного освоения.

Изучение особенностей формирования инженерно-геологических условий под влиянием водно-эрозионных процессов имеет важное практическое значение и может использоваться по целому ряду прикладных направлений — в строительстве гидротехнических и линейных сооружений, градостроительстве, сельском хозяйстве, мелиорации и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болдышев Б.С., Жилко В.В. Развитие овражной эрозии на территории Белоруссии // Проблемы изучения экзогенных геологических процессов. Минск: БелНИГРИ, 1980. С. 64–69.
2. Болдышев В.С., Жилко В.В. Основные закономерности развития линейной эрозии на территории Новогрудской возвышенности и Оршано-Могилевского плато // Почвоведение и агрохимия. 1975. Вып.12. С. 30–37.
3. Галкин А.Н., Красовская И.А., Павловский А.И., Косинова И.И. Инженерная геоморфология. Витебск: ВГУ имени П. М. Машерова, 2022. 256 с.
4. Галкин А.Н., Матвеев А.В., Павловский А.И., Санько А.Ф. Инженерная геология Беларуси. В 3 ч. Ч. 2. Инженерная геодинамика Беларуси / Под ред. В.А. Королёва. Витебск: ВГУ им. П.М. Машерова, 2017. 452 с.
5. Динамическая геоморфология / Под ред. Г.С. Афаньева, Ю.Г. Симонова, А.И. Спиридонова. М.: Изд-во МГУ, 1992. 448 с.
6. Жилко В.В. О потенциальной опасности развития эрозии почв в различных районах Белоруссии // Изв. АН БССР. Сер. с/х наук. 1974. № 4. С.43–48.
7. Колпашников Г.А. Инженерная геология. Минск: Технопринт, 2005. 132 с.
8. Колпашников Г.А. Особенности развития экзогенных геологических процессов в пределах ледниковой формации северо-западной части Русской равнины // Проблемы изучения экзогенных геологических процессов. Минск: БелНИГРИ, 1980. С. 26–36.
9. Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Сущенко Ф.В. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 272 с.
10. Лепешев А.А. Овражная эрозия Новогрудской возвышенности и меры борьбы с ней: автореф. дис. канд. с/х наук. Минск, 1969. 23 с.
11. Лепешев А.А., Кадацкий В.Б., Кучерова Е.В. Овражная эрозия почв в Беларуси // Географія. Праблемы выкладання. 2014. № 5. С. 3–7.
12. Маккавеев Н.И. Основные модели развития рельефа // Геоморфология. 1986. № 3. С. 6–15
13. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 346 с.
14. Маккавеев Н.И., Чалов Р.С. Русловые процессы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 263 с.
15. Матвеев А.В., Нечипоренко Л.А. Особенности проявления и взаимодействия современных геологических процессов на территории Беларуси // Веснік Брэсц. ун-та. Сер. 5. Хімія. Біялогія. Навукі аб Зямлі. 2011. № 1. С. 91–99.
16. Матвеев А.В., Нечипоренко Л.А. Последствия проявления опасных геологических процессов на территории Беларуси // Природопользование. 2016. Вып. 29. С. 30–37.

17. Матвеев А.В., Нечипоренко Л.А., Павловский А.И. и др. Современная динамика рельефа Белоруссии. Минск: Навука і тэхніка, 1991. 102 с.
18. Матвеев А.В., Павловский А.И. Плоскостная эрозия на территории Белоруссии // Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях. М.: Изд-во МГУ, 1987. С. 129.
19. Матвеев А.В., Павловский А.И. Современные рельефообразующие процессы на территории Мозырской гряды // Докл. АН БССР. 1987. Т. 31. № 4. С. 347–350.
20. Матвеев А.В., Павловский А.И., Сачок Г.И. Типизация и районирование территории БССР по водно-эрозионным процессам // Буклет ВДНХ СССР. Минск: Наука и техника, 1988. 4 с.
21. Моисеенко В.Ф., Павловский А.И. Морфология овражно-балочных систем Мозырской гряды // Морфогенез на территории Белоруссии. Минск: Наука и техника, 1983. С. 56–64.
22. Мотуз В.М. Геоморфологические и гидрологические факторы развития водной эрозии на территории Белоруссии // Проблемы изучения экзогенных геологических процессов. Минск: БелНИГРИ, 1981. С. 70–79.
23. Мотуз В.М. Линейная (овражная) эрозия лесовых почвогрунтов Белоруссии // Эрозия почв и борьба с ней. Минск: Ураджай, 1968. С. 88–96.
24. Павловский А.И. Закономерности проявления эрозионных процессов на территории Беларуси. Минск: Навука і тэхніка, 1994. 102 с.
25. Павловский А.И. Морфологические особенности оврагов на территории Белоруссии // Современные рельефообразующие процессы. Минск: Наука и техника, 1986. С. 36–43.
26. Павловский А.И. Тоннельная эрозия на территории Мозырской гряды // Геологическое строение осадочной толщи Белоруссии. Минск: Наука и техника, 1985. С. 128–131.
27. Павловский А.И., Галкин А.Н., Моляренко В.Л., Андрушко С.В. Инженерно-геоморфологическая оценка экзогенной динамики рельефа Беларуси // Веснік Брэст. ун-та. Сер. 5. Хімія. Біялогія. Навукі аб Зямлі. 2022. № 2. С. 24–34.
28. Эрозионно-русловые системы / Под ред. Р.С. Чалова, А.Ю. Сидорчука, В.Н. Голосова. М.: ИНФРА-М, 2017. 697 с.
29. Харман Г. Современный факторный анализ. М.: Статистика, 1972. 486 с.

FORMATION SPECIFICS OF ENGINEERING GEOLOGICAL CONDITIONS IN BELARUS UNDER THE INFLUENCE OF EROSION PROCESSES

A. I. Pavlovsky^{1,*}, A. N. Galkin^{2,##}, I. A. Krasovskaya², O. V. Shershnev^{3,###}

¹Belarusian National Technical University, pr. Nezavisimosti 65, Minsk, 220013 Belarus

²Masherov Vitebsk State University, Moskovskii pr., 33, Vitebsk, 210038 Belarus

³Skorina Gomel State University, Sovetskaya ul., 104, Gomel, 246028 Belarus

*E-mail: aipavlovsky@mail.ru

##E-mail: galkin-alexandr@yandex.ru

###E-mail: gomegeo@yandex.ru

The article presents the results of a comprehensive study of the development conditions and features of water erosion manifestation in various natural and economic settings as an important condition of the formation of engineering geological features of the territory. The authors have established that the development, forms of manifestation and intensity of water erosion processes in the territory of Belarus, with all the diversity of natural and economic situations, are controlled by the energy potential of the relief, the basin structure of the territory and human economic activity. Engineering geological conditions were typified for the development of water erosion processes. The most complex engineering geological situations are observed within the marginal glacial uplands, which have a high energy potential of the topography, a two-rock type of ground massif, and a complex basin structure; as well as in areas of active economic development.

Keywords: water-erosion-accumulation cycle, erosion, accumulation, rill network, temporary channel flows, ravines, colluvial washout, alluvial fan

REFERENCES

1. Boldyshev, B.S., Zhilko, V.V. [Development of gully erosion on the territory of Belarus]. In: [Problems of studying exogenous geological processes]. Minsk, BelNIGRI Publ., 1980, pp. 64–69. (in Russian)
2. Boldyshev, V.S., Zhilko, V.V. [Basic patterns of development of linear erosion on the territory of the Novogrudok Upland and the Orshano-Mogilev Plateau]. *Pochvovedeniye i agrokhimiya*, 1975, issue 12, pp. 30–37. (in Russian)
3. Galkin, A.N., Krasovskaya, I.A., Pavlovsky, A.I., Kosinova, I.I. [Engineering geomorphology]. Vitebsk, Masherov VSU Publ., 2022, 256 p. (in Russian)
4. Galkin, A.N., Matveev, A.V., Pavlovsky, A.I., San'ko, A.F. [Engineering geology of Belarus. In 3 parts. Part 2. Engineering geodynamics of Belarus]. Korolev, V.A., Ed. Vitebsk, Masherov VSU Publ., 2017, 452 p. (in Russian)
5. [Dynamic geomorphology]. G.S. Anan'ev, Yu.G. Simonov, A.I. Spiridonov, Eds. Moscow, Moscow State University Publ., 1992, 448 p. (in Russian)
6. Zhilko, V.V. [On the potential hazard of soil erosion development in various regions of Belarus]. *Izvestiya AN BSSR. Seriya sel'skokhozyaystvennykh nauk*, 1974, no. 4, pp. 43–48. (in Russian)
7. Kolpashnikov, G.A. [Engineering geology]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 2005, 132 p. (in Russian)

8. Kolpashnikov, G.A. [Features of the development of exogenous geological processes within the glacial formation of the northwestern part of the Russian Plain]. In: [Problems of studying exogenous geological processes]. Minsk, BelNIGRI Publ., 1980, pp. 26–36. (in Russian)
9. Kondrat'ev, N.E., Popov, I.V., Snishchenko, F.V. [Fundamentals of the hydromorphological theory of channel process]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1982, 272 p. (in Russian)
10. Lepeshev A.A. [Gully erosion of the Novogrudok Upland and measures to control it]. Extended abstract of Cand. Sci. (Agricultural) diss., Minsk, Belarusian Research Institute of Agriculture, 1969, 23 p. (in Russian)
11. Lepeshev, A.A., Kadatskii, V.B., Kuchero, E.V. [Gully soil erosion in Belarus]. *Geografiya. Problemy vykladannya*, 2014, no. 5, pp. 3–7. (in Russian)
12. Makkaveyev, N.I. [Basic models of relief development]. *Geomorfologiya*, 1986, no. 3, pp. 6–15. (in Russian)
13. Makkaveyev, N.I. [River bed and erosion in its basin]. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ., 1955, 346 p. (in Russian)
14. Makkaveyev, N.I., Chalov, R.S. [Channel processes]. Moscow, Moscow State University Publ., 1986, 263 p. (in Russian)
15. Matveev, A.V., Nechiporenko, L.A. [Peculiarities of manifestation and interaction of modern geological processes in the territory of Belarus]. *Vesník Brestskaga universiteta. Seriya 5, Khimíya. Bíyalogíya. Navukí ab Zyamlí*, 2011, no. 1, pp. 91–99. (in Russian)
16. Matveyev, A.V., Nechiporenko, L.A. [Consequences of the manifestation of hazardous geological processes in the territory of Belarus]. *Prirodopol'zovaniye*, 2016, issue 29, pp. 30–37. (in Russian)
17. Matveyev, A.V., Nechiporenko, L.A., Pavlovsky, A.I. et al. [Modern dynamics of the relief of Belarus]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1991, 102 p. (in Russian)
18. Matveyev, A.V., Pavlovsky, A.I. [Plane erosion on the territory of Belarus]. In: [Patterns of manifestation of erosion and channel processes in various natural conditions]. Moscow, Moscow State University Publ., 1987, p. 129. (in Russian)
19. Matveyev, A.V., Pavlovsky, A.I. [Modern relief-forming processes on the territory of the Mozyr ridge]. *Doklady AN BSSR*, 1987, vol. 31, no. 4, pp. 347–350. (in Russian)
20. Matveyev, A.V., Pavlovsky, A.I., Sachok, G.I. [Typification and zoning of the territory of the BSSR according to water erosion processes]. In: [Booklet of VDNKh USSR]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1988, 4 p. (in Russian)
21. Moiseyenko, V.F., Pavlovsky, A.I. [Morphology of gully-beam systems of the Mozyr ridge]. In: [Morphogenesis in the territory of Belarus]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1983, pp. 56–64. (in Russian)
22. Motuz, V.M. [Geomorphological and hydrological factors in the development of water erosion in the territory of Belarus]. In: [Problems of studying exogenous geological processes]. Minsk, BelNIGRI Publ., 1981, pp. 70–79. (in Russian)
23. Motuz, V.M. [Linear (gully) erosion of loess soils in Belarus]. In: [Soil erosion and its control]. Minsk, Uradzhai Publ., 1968, pp. 88–96. (in Russian)
24. Pavlovsky, A.I. [Morphological features of ravines in the territory of Belarus]. In: [Modern relief-forming processes]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1986, pp. 36–43. (in Russian)
25. Pavlovsky, A.I. [Patterns of manifestation of erosion processes in the territory of Belarus]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1994, 102 p. (in Russian)
26. Pavlovsky, A.I. [Tunnel erosion in the territory of the Mozyr ridge]. In: [Geological structure of the sedimentary strata of Belarus]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1985, pp. 128–131. (in Russian)
27. Pavlovsky, A.I., Galkin, A.N., Molyarenko, V.L., Andrushko, S.V. [Engineering geomorphological assessment of exogenous dynamics of the relief in Belarus]. *Vesník Brestskaga universiteta. Seriya 5, Khimíya. Bíyalogíya. Navukí ab Zyamlí*, 2022, no. 2, pp. 24–34. (in Russian)
28. [Erosion-channel systems]. R.S. Chalov, A.YU. Sidorchuk, V.N. Golosov, Eds. Moscow, INFRA-M Publ., 2017, 697 p. (in Russian)
29. Kharman, G. [Modern factor analysis]. Moscow, Statistika Publ., 1972, 486 p. (in Russian)

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.248.2;571.5

НЕОСТРУКТУРНОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ И ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В РАЙОНЕ ЧАРСКОЙ РИФТОВОЙ ВПАДИНЫ

© 2024 г. С. А. Несмеянов^{1,*}, Д. О. Сергеев^{1,**}, О. А. Воейкова^{1,*}, А. П. Кулаков^{1,***}

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

*E-mail: voa49@mail.ru

**E-mail: sergeevdo@mail.ru

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

Поступила в редакцию 05.02.2024 г.

После доработки 13.03.2024 г.

Принята к публикации 25.03.2024 г.

Традиционное выделение морфоструктур при изучении неотектоники района Чарского рифта дополнено применением оротектонического метода. Это позволило охарактеризовать этапность и неравномерность орогенеза и разрывных смещений по региональному сбросу. Выявлены нестабильность мезозойского и новейшего структурообразования, а также неоплейстоценовая активизация структур, известная в альпийских орогенах. Показано, что структурно обусловленные особенности рельефа определяют специфику проявления опасных экзогенных процессов. С применением оротектонического метода установленные закономерности могут оказаться свойственными и другим рифтам Байкальской рифтовой зоны.

Ключевые слова: неотектоника, Чарская рифтовая впадина, хребет Кодар, хребет Калар, хребет Удокан, неотектоническое районирование, сброс, разрывное смещение

DOI: 10.31857/S0869780924040025 EDN: SFZETT

ВВЕДЕНИЕ

Анализ неотектоники может производиться с применением различных методов. В большинстве регионов он ограничивается выделением основных морфологических элементов. Именно так до настоящего времени характеризовались новейшие структуры Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) [6, 15–17 и др.].

С применением метода обособления морфоструктур выделены основные типичные неотектонические элементы БРЗ. Таковыми в поперечном сечении (с северо-запада на юго-восток) считаются: 1) наклонные горсты и асимметричные глыбовые поднятия северо-западного крыла рифтовой зоны; 2) центральные цепи рифтовых долин и сопровождающие или разделяющие их глыбовые поднятия; 3) сводовый изгиб юго-восточного крыла рифтовой зоны [16, с. 211]. Построенная с выделением подобных элементов БРЗ состоит из цепи отдельных рифтов, именуемых по соответствующим рифовым долинам, и включает Хубсугульский, Тункинский, объединенные Южнобайкальский и Северобайкальский, Верхнеангарский, Муйский и Чарский рифты [16, с. 214]. В качестве типичных дополнительных

элементов, осложняющих эту схему, обычно рассматриваются высокие тектонические уступы и связанные с ними “промежуточные” или краевые ступени [16, с. 219].

Однако только морфологическая характеристика новейших структур явно недостаточна для решения ряда прикладных задач, в том числе задач строительного проектирования, поскольку проектирование нуждается в районировании территории по активности современных тектонических движений, определяющих активность экзогенных процессов.

Для активных новейших орогенов Средней Азии и Кавказа предложен оротектонический метод, позволяющий количественно оценивать поэтапные воздымания и разрывные смещения [11]. Для инженерных изысканий именно выявление опасных разрывных смещений представляет особый интерес [9]. Целесообразно оценить возможности применения данного метода для существенно иных сибиретипных активных новейших структур БРЗ.

В качестве опорного объекта применения оротектонического метода выбрана Чарская впадина (ЧВ), расположенная на севере Забайкальского

края в верхнем течении р. Чара между хребтов Станового нагорья: Кодарского, Удоканского и Каларского, на восточном краю БРЗ между Муйской впадиной на западе и Токкинской впадиной на востоке. В геологическом отношении она принадлежит новейшей Байкальской рифтовой области, наложенной на структуры Алдано-Станового докембрийского щита Восточно-Сибирской платформы. В этой области платформенные условия мезозоя и начала кайнозоя сменились в неогене рифтогенной тектонической активизацией с углублением прогибов и орогенными воздыманиями хребтов.

В полном соответствии с упомянутой выше типовой схемой Чарская впадина асимметрична (грабен-сиклинальный тип). У нее сбросовый северо-западный борт (Кодарский хребет) и пологий (почти пликтивный) юго-западный (Удоканский хребет).

Цели дистанционных неотектонических исследований, проведенных авторами с применением оротектонического метода:

- неоструктурное районирование центральной части ЧВ и смежных хребтов;
- характеристика разрывных смещений особенно на северном борту ЧВ;
- оценка влияния полученной неотектонической характеристики выделенных структур на специфику опасных геологических процессов.

Достижение этих целей требует дополнительной характеристики этапности рельефообразования и осадконакопления для надежного возрастного расчленения рельефа.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О НЕОТЕКТЕНИКЕ И ЭТАПНОСТИ РЕЛЬЕФООБРАЗОВАНИЯ И ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ

Решение поставленных задач опирается на корреляцию разновозрастных эрозионных и денудационных элементов рельефа с аккумулятивными бассейновыми образованиями, выполняющими Чарскую впадину. При этом геологические моменты орогенических импульсов в начале формирования эрозионно-денудационных поверхностей (геоморфологических уровней) обычно сопоставляются с моментами образования поверхностей размыта, несогласия или границ между аккумулятивными толщами. Предполагается, что такие границы и поверхности также отвечают импульсам орогенического воздымания, а отложение последующих толщ – разномасштабным по времени эпохам тектонической стабилизации и расширения первоначальных врезов.

В соответствии с предложенным подходом сначала рассматривается строение разреза Чарской впадины, затем анализируются материалы по типизации и количеству разновозрастных эрозионно-денудационных элементов рельефа, а после этого проводится их корреляция с выделением основных этапов орогенеза и рельефообразования.

Основные этапы седиментации в Чарской впадине

Представления о строении разреза Чарской впадины менялись. Однако единой надежной схемы до сих пор нет. Верхняя часть разреза известна ныне по данным бурения. Строение низов разреза опирается на корреляции с соседними районами. Тем не менее, бурением не подтвердилось присутствие мощных толщ вулканогенных пород, предполагавшихся на глубинах около 500 м и ниже [1]. Однако к югу от Чарской впадины, в среднем течении р. Верхний Ингамакит выявлена 300-метровая толща базальтов, подстилаемая галечно-валунными конгломератами с позднеэоплейстоценовыми спорово-пыльцевыми спектрами [2].

Разрез наиболее прогнутой части Чарской впадины описан по скважине № 126, которая расположена в центральной части впадины (1 км на юг от западной окраины с. Кюсть-Кемда) (рис. 1) [4].

Анаргинская свита (N_{an}) залегает на глубине 1036–1180 м. Вскрытая мощность 144 м, подошва не вскрыта. Отложения анаргинской свиты представлены переслаиванием алевролитов, песчаников, аргиллитов и бурых углей. Литифицированные осадки мелководного озера содержат богатый спорово-пыльцевой комплекс, характеризующий тсугово-елово-сосновые горные леса с участием разнообразных широколиственных и реликтов палеогеновой флоры. Комплексы микрофлор и диатомей характеризуют осадки среднего миоцена. По многим признакам анаргинская свита является аналогом танхойской (угленосной) свиты Байкальской впадины.

Тырынтайская свита (N_{2tr}) залегает в интервале 874–1036 м на отложениях анаргинской свиты со значительным стратиграфическим перерывом (5–7 млн лет). Свита сложена мелкогалечными галечниками с прослоями грубых песков. В верхней части уменьшается количество обломочного материала и возрастает участие мелкозернистых песчаников и алевролитов. Мощность 162 м. Отложения тырынтайской свиты отражают этап очередной компенсации впадины и превращение ее в суходольную депрессию. Увеличение в верхах разреза осадков озерно-аллювиального и озерного генезисов свидетельствует о постепенном возрождении в Чарской впадине озерного режима седиментации, обусловленном

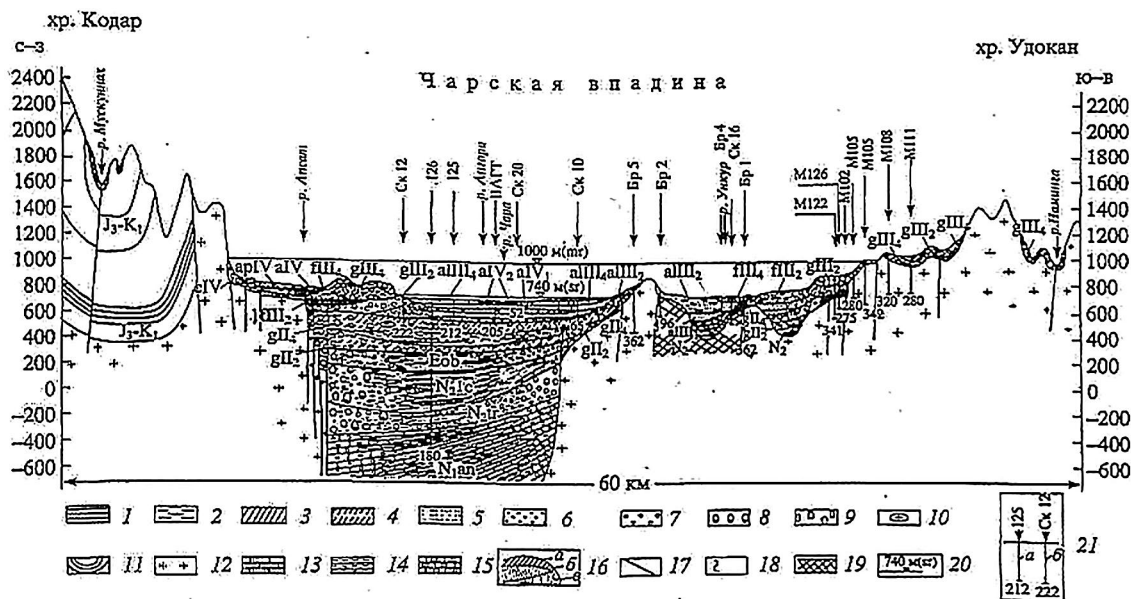


Рис. 1. Геологический разрез Чарской впадины [3]. 1 – глина, алевроит; 2 – отложения пылеватые; 3 – суглинок; 4 – супесь; 5 – песок; 6 – гравий; 7 – галька; 8 – валуны; 9 – дресва, щебень, глыбы; 10 – отторженец; 11 – мезозойские осадочные отложения (Апсатская муфта); 12 – кристаллические породы фундамента; 13 – песчаник; 14 – алевролит; 15 – конгломерат; 16 – конечная морена (а – абляционная, б – ребристая, в – напорная); 17 – тектоническое нарушение; 18 – сейсмодислокация; 19 – участок разреза вдоль зоны разлома; 20 – абсолютные отметки уровня ледниково-подпрудного озера (sg – сартанской эпохи, mg – муруктинской эпохи); 21 – скважина. Цифры: вверху – номер, внизу – глубина в метрах (а – скважина в плоскости разреза, б – спроектированная на плоскость разреза).

увеличением скорости прогибания фундамента. Спорово-пыльцевые спектры тырынтайской свиты сопоставляются с палинофлорой ановской свиты Байкальской впадины [6].

Люксюгунская свита (N_2lk) залегает в интервале 550–874 м. Состав пород указывает на возрождение глубоководного озерного режима Чарской впадины. Свита представлена переслаивающимися песками, алевроитами, глинами и илами. Мощность 324 м. Эти преимущественно озерные осадки донной фации залегают на отложениях тырынтайской свиты и содержат богатый спорово-пыльцевой комплекс, характеризующий развитие горной хвойной тайги с редкими представителями неморальной флоры. В составе диатомовой флоры много плиоценовых видов в настоящее время не существующих.

Ойбонская свита (E_1ob) вскрыта в интервале 425–550 м и представлена переслаиванием песков, алевроитов, илов и гравийных песков. Мощность 125 м. Залегает согласно, без следов углового и стратиграфического несогласия на отложениях люксюгунской свиты и с глубоким перерывом перекрывается ледниковыми отложениями среднего неоплейстоцена. Характер накопления осадков свиты свидетельствует о последнем этапе озерного режима байкальского типа в Чарской впадине. Преимущественно озерный генезис отложений сменяется в верхней части свиты (10 м) аллювиальным. Спорово-пыльцевые

спектры характеризуют тсугово-елово-сосновые леса с единичным участием широколиственных пород. Имеется термолюминесцентная датировка (>640 тыс. лет назад, № 347, ГИН СОРАН, г. Улан-Удэ).

Залегающие выше отложения представлены двумя толщами, резко различающимися по литологии. Тырынакская толща (Q_{II}) грубообломочная, преимущественно валунно-галечная, перекрывающая ее топалахская (Q_{III}) – в основном песчаная. В связи с тем, что в самаровское время Чарская впадина представляла собой ледом с мощностью льда около 1500 м, отложения верхнего эоплейстоцена, нижнего и низов среднего неоплейстоцена оказались частично ассимилированными в мореносодержащую часть ледника, а главным образом срезанными и вынесенными за пределы депрессии.

Тырынакская толща (Q_{II}), залегает в интервале 180–424.7 м, т.е. имеет мощность около 245 м и трехчленное строение. Два ледниковых горизонта разделены водноледниковыми, аллювиальными и озерными осадками.

Самаровский горизонт (Q_{IIsm}) вскрыт в интервале 337–424.7 м и представлен, главным образом, валунными супесями и суглинками, перекрытыми маломощными ленточными алевроитами мощностью около 88 м. Горизонт с достаточно монотонным строением имеет сложную палинологическую характеристику. Частое чередование

“теплых” и “холодных” спектров (“зебра”) обусловлено ассимиляцией ледником доледниковых отложений, а также активным взаимодействием донной морены с породами ложа. Процесс захвата в мореносодержащую часть ледника отложений эоплейстоцена подтверждается как палинологическими данными, так и термолюминесцентным возрастом песчаного заполнителя морены (>680 тыс. лет назад — № 348, ГИНСО РАН, г. Улан-Удэ). В частности, в составе “теплых” спектров доминируют сосна лесная, кустарниковые березки, осоки, злаки. Сопутствуют ели, сосна сибирская, вересковые, сложноцветные. Единично присутствуют зерна тсуги, экзотических сосен, дуба, липы, лоховых.

Резкий перерыв в подошве самаровского горизонта, продолжительностью около 0.5 млн лет связан с ледниковым срезом доледниковых толщ и находит свое отражение в резком разрыве климатической кривой.

Ширтинский горизонт (Q_{IIsg}) вскрыт в интервале 263.5–337.0 м (мощность 73.5 м) и сложен слоистой толщей разнообразного состава — от глин, суглинков до валунных прослоев. Характеризуется спорово-пыльцевыми спектрами, соответствующими лесному типу растительности. В целом характер флоры типично пресноводный. Благодаря обилию видов обростателей можно сказать, что в Чарской впадине накопление осадков происходило в пресном водоеме с широко развитой прибрежной полосой водной растительности.

Тазовский горизонт (Q_{Itz}) залегает в интервале 173.1–263.5 м. (мощность около 90 м). Сложен валунными суглинками и включает гранитный отторженец вертикальным размером 27.6 м (214.8–242.4 м). Морена перекрыта водно-ледниковыми образованиями мощностью 6.9 м (ленточные алевроиты, валуны, галька, песок, слагающие низы топалахской толщи). Отложения почти “немые”, только в кровле и подошве горизонта выделены “холодные” спектры. В них преобладает пыльца кустарниковых березок, ольховника, кедрового стланика, осоки, вересковых. Пыльца древесных представлена небольшим количеством зерен ели, лиственницы, сосны. На глубине 202 м получен относительно “теплый” спектр, связанный с ледниковым захватом более древних осадков. В его составе ель обыкновенная, сосна сибирская, березы, осоки, сложноцветные, вересковые. Единично встречена пыльца дуба, ильмовых, лоховых. В период формирования тарынакской толщи темнохвойные леса постепенно замещались светлохвойной тайгой. Такая же смена фитоценозов происходила на территории юго-западной части Якутии.

В Березовском прогибе Сибирской платформы на северной периферии ледникового покрова Байкало-Станового нагорья пески тазовского времени, залегающие в основании конечного

гляциолимноплена, имеют термолюминесцентный возраст 200 ± 20 тыс. лет (№ 352, ГИНСОРАН, г. Улан-Удэ). Проба на абсолютный возраст взята из основания правобережного, постоянно подмываемого руслом Чары высокого (более 100 м) обнажения напротив устья р. Джелинда (непосредственно у северной границы Забайкальского края).

Топалахская толща (Q_{III}) преимущественно песчаного состава завершает разрез рыхлых отложений центральной части Чарской впадины (0–180 м). Четко делится на пять литоциклов, соответствующих пяти терморитмам. Каждый цикл начинается с маломощных озерных отложений донной фации и завершается достаточно мощным слоем песков и гравийно-галечников с песчаным заполнителем. Нижняя часть толщи мощностью 6.9 м имеет среднеплейстоценовый возраст.

Казанцевский горизонт (Q_{IIIkz}) — первый снизу литоцикл, залегает в интервале 138.8–173.1 м. Характеризуется распространением светлохвойных лесов среднетаежного типа. Тип растительности лесной и отражает климат несколько более теплый, чем современный, но все же имеет менее выразительную характеристику, чем одновозрастные им палинокомплексы Западной Сибири и Прибайкалья.

Муруктинский горизонт (Q_{IIImr}) выделен в интервале 73–138.8 м и объединяет два литоцикла, один из которых стадияльной природы. По периферии Чарской впадины коррелятные отложения представлены валунными суглинками, слагающими наиболее выдвинутый из троговых долин конечно-моренный комплекс. Спектры стадияльного цикла отражают лесотундровый тип растительности.

Каргинский горизонт (Q_{IIIkr}) представлен отложениями четвертого литоцикла, залегающего в интервале 41.2–73.0 м. Радиоуглеродный возраст древесных остатков, отобранных на глубине 54 м в соседней скв. № 125 из этого же горизонта, — 38210 ± 870 лет (ЛУ–977). Состав спорово-пыльцевого комплекса соответствует лесному типу растительности с сильно разреженным древостоем, с участием в ландшафтах степных и тундровых группировок.

Сартанский горизонт (Q_{IIIsr}) мощностью 41 м в основании представлен ленточными алевроитами, перекрытыми песками с гравием и галькой. По подсчетам варв в ленточных алевроитах время существования ледниково-подпрудного озера во впадине не менее 5 тыс. лет. Коррелятные озерным осадкам ледниковые отложения слагают самый верхний конечно-моренный комплекс по периферии впадины.

Голоцен. На климатической кривой, составленной по скважине № 126, голоценовый (Н) “всплеск” получен в результате иллювиального заражения современной пылью и спорами

отложений кровли сартанского горизонта. В многочисленных скважинах и обнажениях послеледниковых образований Чарской впадины выделяются спектры, указывающие на климатическую обстановку, близкую к обстановке в каргинское межледниковье.

Скважина № 126 не достигла фундамента. По результатам вибросейсмопрофилирования, проведенного после проходки скважины, фундамент залегает на глубине 2500–2600 м [4]. Следовательно, от забоя скважины до кровли фундамента существует интервал мощностью порядка 1300–1400 м.

Отсутствие представителей олигоценовой флоры в отложениях прибортовых частей впадины, где рыхлый чехол вскрыт горными выработками до кристаллического фундамента, а также отсутствие их в толще внутригорных впадин, выполненных миоценовыми осадками (Сюльбанской, Лурбунской, Ингамакитской и т.д.), позволяет сделать предварительный вывод, что и нижние, не вскрытые интервалы, вероятно, сложены породами миоцена [4].

В смежных районах Витимского плоскогорья на докембрийско-палеозойском основании развита олигоценовая каолиновая кора выветривания, выше которой залегают миоценовые преимущественно вулканогенные отложения [1].

Поверхности выравнивания и террасовые образования

Традиционная схема древних поверхностей выравнивания рассматриваемого региона [1, 5] включает следующие геоморфологические уровни:

1. *Домеловая* поверхность, развитая на отдельных вершинах в Кодарском хребте;

2. *Мел-палеогеновая (исходная)* поверхность, по-видимому, полициклична и образовалась в результате двух этапов выравнивания, разделенных этапом расчленения рельефа (обычной глубиной до 100 м), и с повторным обновлением выравнивания в позднем палеоцене-раннем эоцене, т.е. ее можно индексировать как преимущественно эоценовую, но с тремя этапами планации, последний из которых считается позднеолигоценовым (домиоценовым);

3. *Ранннеогеновая (придолинная)* поверхность часто локализуется на абсолютных высотах 1300–1500 м;

4. *Эоплейстоценовая* поверхность, развитая фрагментарно на бортах Муйской впадины, в пределах Муйско-Чарской перемычки, в среднем течении р. Апсата (хр. Кодар), в долинах рек Ингамакита, Эйманаха, Калара (хр. Удокан) и в районе Чара-Токкинской перемычки;

5. *Плейстоценовые* речные террасы, обычно располагающиеся ниже [1].

В осевой части хр. Кодар развита *мел-палеогеновая (исходная)* поверхность выравнивания и К–Р кора выветривания. Ей принадлежит зона дезинтеграции мощностью до 200 м со следами каолинизации [1, с. 35; 8], а ее высоты в хребтах Кодар и Северо-Муйском составляют 1900–2300 м [1, с. 44].

Ранннеогеновая поверхность выравнивания формировалась по принципу “выравнивания сбоя”. Такие поверхности по положению в рельефе часто именуются “придонными”. Ее фрагменты и коррелятные коры выветривания описаны и в пределах северо-восточной части БРЗ. В Кодаро-Удоканском районе это туолбинская поверхность [7, 8 и др.]. Как правило, миоценовые коры выветривания имеют вишнево-красную окраску и состоят из смеси каолинита, гидрослюда и других минералов выветривания с дресвой выветрелых пород субстрата. Синхронные этому этапу выветривания осадки нередко содержат бурогольные прослои. По механическому составу это преимущественно тонкообломочные образования [1, с. 40]. Западнее миоцен-среднеплиоценовый возраст поверхности определяется тем, что выровненная поверхность расположена выше уровней наиболее высоких террас, датируемых серединой или концом плиоцена [1, с. 41; 12, 14]. Как было отмечено выше, эта придолинная поверхность обычно локализуется на абсолютных отметках 1300–1500 м.

Эоплейстоценовая поверхность выравнивания в пределах БРЗ развивалась на осадочных аллювиальных отложениях, а в отдельных местах наблюдается ее врезание и в коренные кристаллические породы. Формирование этого уровня завершилось в нижнечетвертичное время [8 и др.]. В тех случаях, когда поверхность развивалась на кайнозойских осадочных образованиях, ей соответствует бурый ожелезненный аллювий или буро-красные коры выветривания. Если коррелятные отложения или коры выветривания отсутствуют, то непосредственно на поверхности выравнивания эоплейстоцена накладываются отложения среднечетвертичного возраста, или у подножия склона, отделяющего педимент от современного ложа долин, наблюдаются плиоцен-четвертичные осадки. Характерная черта этого уровня – крайне выдержанное высотное положение в современном рельефе [1, с. 42]. Ее фрагменты обычно находятся на абсолютной высоте 900–1100 м [5, с. 31].

Более низкие поверхности аккумулятивны. В Муйской впадине развиты песчаные массивы средне-верхннеоплейстоценового возраста. Абсолютная высота позднеоплейстоценовой поверхности, которая их венчает, достигает 650–700 м. Разность высот позднеплейстоценового и голоценового уровней составляет 20–25 м. Они разделены обрывистыми склонами. На голоценовом уровне развиты озера и заболоченность. В Чарской

впадине уровень осадков, выполняющих днище, формируется с конца верхнего плейстоцена и расчленению в голоцене не подвергался [1, с. 43].

Выделение поверхностей выравнивания усложняется широким распространением плоских поверхностей современной нагорной планации, которые могут быть случайно сопоставлены высотам истинных поверхностей выравнивания.

Этапы рельефообразования

Этапность рельефообразования в рассматриваемом регионе понимается неоднозначно. С одной стороны, утверждается, что новейший этап в развитии Саяно-Байкальского горного пояса наступил не в среднем олигоцене, как на Среднесибирском плоскогорье, а существенно раньше, по крайней мере, в среднем эоцене. В полной мере это относится к северо-восточному флангу БРЗ [1, с. 40].

В то же время отмечается [1, с. 35], что межгорные (рифтовые) впадины хребтов Кодар, Удокан и Калар возникли в мезозое. Но некоторые из них прекратили свое развитие в кайнозое. Такова синклиналичная структура на левобережье р. Апсат (в хребте Кодар), которая ныне поднята на высоты 2–2.5 км. Предлагается для краткости именовать ее Апсатской грабен-синклиалью. В ней осадконакопление с постранимелового времени не происходило. Для всех впадин этого района БРЗ характерен перерыв в осадконакоплении на рубеже нижнего и верхнего мела. Ему отвечает кора выветривания.

Наконец, как было отмечено выше, существующие материалы позволяют предполагать, что активное прогибание Чарской впадины началось с миоцена [1, 4], т.е. существенно позже начала новейшего развития данного региона.

Во всяком случае, для рассматриваемой части восточного сегмента БРЗ можно констатировать нестабильность расположения зон активного (рифтового) прогибания, подтверждаемую несовпадением Апсатской мезозойской и Чарской новейшей отрицательных структур в одном поперечном сечении БРЗ.

Описанная выше схема поверхностей выравнивания достаточно четко фиксируется геоморфологическим профилированием в районе Апсатской синклинали и сочленения Кодарского хребта-поднятия по Южнокодарскому сбросу с Чарской впадиной (рис. 2).

В приводораздельной части хребта Кодар ниже отдельных вершин хорошо различаются три сближенных уровня *мел-палеогеновой (исходной)* поверхности, которые можно условно проиндексировать соответственно: K_2-P_1 ; P_2 ; P_3-N_1 . Наиболее молодая из них может, вероятно, отвечать подошве новейших отложений в Чарской впадине.

В крутом склоне поднятого крыла Южноапсатского сброса можно проследить два эрозионных уровня, отвечающих соответственно *ранненеогеновой* и *эоплейстоценовой* поверхностям. Их абсолютные высоты на сопряжении с проекцией разрывного сместителя близки к стандартным для этих поверхностей высотам: соответственно 1300 м и 1100 м. *Ранненеогеновый* уровень при этом

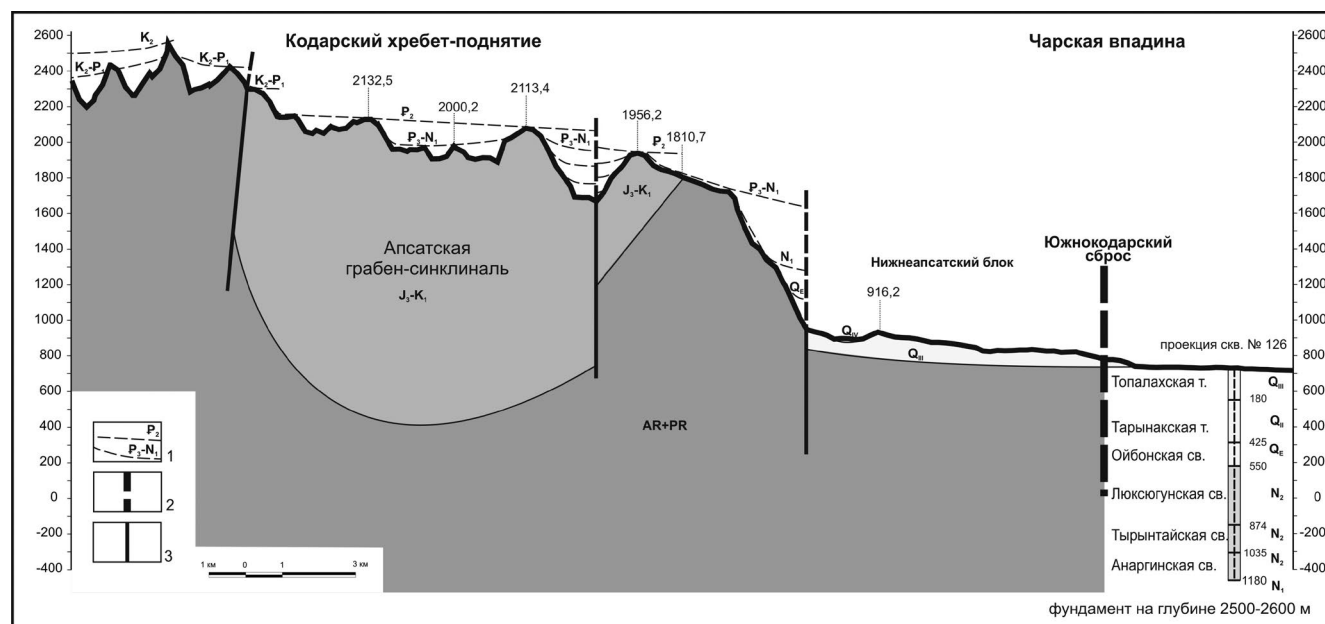


Рис. 2. Геолого-геоморфологический профиль (по линии А–Б, рис. 3). Сочленение Кодарского хребта-поднятия с Чарской рифтовой впадиной. 1 – геоморфологические уровни; 2–3 – новейшие разрывы: 2 – региональные, 3 – локальные.

сопоставляется с подошвой миоценовых отложений, а *эоплейстоценовый* — с подошвой *ойбонской свиты* (E_{1ob}). *Неоплейстоценовые* геоморфологические уровни здесь не просматриваются.

НЕОСТРУКТУРНОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ

Основные элементы неоструктурного районирования

Морфология основных новейших структур достаточно хорошо отражается на геоморфологических профилях, на которых отчетливо видны деформации рассмотренных выше геоморфологических уровней (рис. 3).

В качестве крупнейших структур с северо-запада на юго-восток выделяются: I — Кодарский хребет-поднятия; II — Чарская впадина; III — Удоканский хребет-поднятия; IV — Чина-Каларская впадина; V — Каларский хребет-поднятия. При этом Удоканский хребет-поднятия отчетливо делится на три локальных блока: IIIa — Западноудоканский свод, IIIб — Верхнеикабьянская седловина, IIIв — Восточноудоканский свод.

Характеристика блоковых структур

Кодарский хребет-поднятия (I) попадает в исследуемый район небольшим фрагментом, в пределах которого он осложнен Апсатской мезозойской грабен-синклиналью. Эта отмершая структура не проявляется в неотектонических деформациях (см. рис. 2). Юго-восточный склон хребта-поднятия здесь осложнен серией ступенчатых сбросов. Вдоль оси хребта наблюдаются пологие деформации сводового типа.

С юго-востока хребет-поднятия ограничен региональным Южнокодарским сбросом, в поднятом крыле которого наблюдается крупный Нижнеапсатский блок отседания. Морфологически он в конце четверичного периода может считаться принадлежащим впадине, поскольку плоская кровля древнего цоколя перекрыта в нем тонким чехлом познеплейстоценовых отложений. Вероятно, этот блок отседал постепенно и оказался в области четверичной седиментации относительно поздно.

Соответственно, на Нижнеапсатском участке региональный Южнокодарский сброс перестает быть краевым, он здесь становится внутривпадинным, а краевым приходится считать локальный Южноапсатский сброс, являющийся оперяющим по отношению к Южнокодарскому сбросу.

Чарская впадина (II) представляет собой понижение рельефа шириной порядка 30 км с четким обрывистым северо-западным бортом, имеющим явно разрывную природу, и относительно пологим, ступенчатым юго-восточным бортом. Но

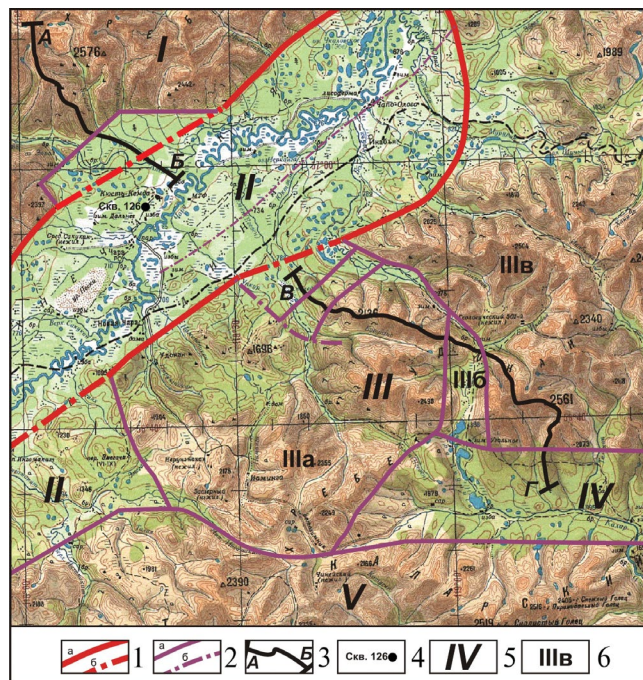


Рис. 3. Схема неоструктурного районирования центральной части Чарской впадины и смежных хребтов-поднятий. 1–2 — разрывы (а — достоверные, б — предполагаемые): 1 — региональные, 2 — локальные; 3 — линии геолого-геоморфологических профилей (А–Б — см. рис. 2, В–Г — см. рис. 4); 4 — скважина № 126; 5–6 — индексы блоковых структур: 5 — региональных, 6 — локальных.

на глубине ее строение меняется. Согласно современным материалам бурения, Чарская впадина представляет собой относительно узкий (шириной порядка 12–15 км) и глубокий (до 2.5 км глубиной) грабен, по периферии которого расположены слабо просевшие в четверичное время блоки (см. рис. 1) [3, с. 44]. Эти краевые блоки образуют периферию осевого грабена. Его юго-восточный борт ограничен погребенным разломом, практически не проявляющимся на земной поверхности. По южному краю Чарской впадины фиксируется сложная “клавиатура” мелких блоков, перемещавшихся дифференцированно. Некоторые блоки начали проседать еще в плиocene. Мозаичное расположение таких блоков осложняет проведение южной границы Чарской впадины. В частности, на западном окончании впадины к ней может быть отнесен Среднеингамакитский блок, отделяющий Чара-Муйскую перемычку от Удоканского хребта-поднятия.

Удоканский хребет-поднятия (III) обрамляет Чарскую впадину с юга и востока. В рассматриваемый район попадает западная его часть, расположенная между Среднеингамакитским опущенным блоком и Чина-Каларской впадиной. В пределах этой части хребта-поднятия выделяются Западноудоканский (IIIa) и Восточноудоканский (IIIв) своды, разделенные Верхнеикабьянской (IIIб)

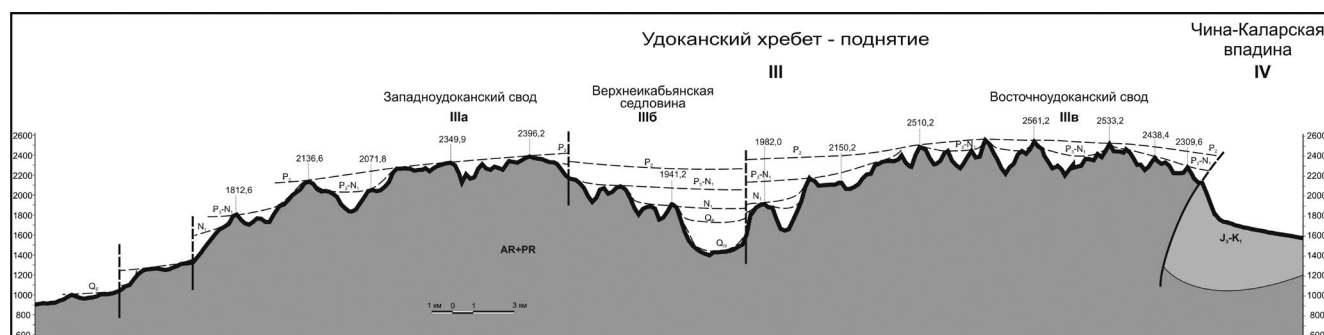


Рис. 4. Геолого-геоморфологический профиль по линии В–Г. Удоканский хребет-поднятия и его сочленение с Чина-Каларской впадиной. (Условные обозначения см. рис. 2).

седловиной. Западный борт этой седловины осложнен малоамплитудным сбросом (рис. 4).

Чина-Каларская впадина (IV) – субширотная, отчетливо выраженная в рельефе, имеет сложное строение за счет наложения двух этапов разновозрастного прогибания. Отражением мезозойского прогибания служит грабен-синклиналь, расположенная вдоль северного борта новейшей впадины. В центре морфологически выраженной депрессии присутствуют неогеновые отложения второго этапа прогибания.

Каларский хребет-поднятия (V) попадает в рассматриваемый район только своей северной частью, где отмечается его блоковая ступенчатость.

Основные варианты структурных перестроек

Во-первых, проведенное районирование подтверждает разновозрастность прогибообразования на рассматриваемой территории и существенную структурную перестройку вследствие разных геологических процессов во времени и пространстве. Так, Апсатская грабен-синклиналь осложняет Кодарский новейший хребет-поднятия, а Северокаларская грабен-синклиналь является предтечей Чина-Каларской новейшей впадины. Очевидно, мезозойские прогибы не связаны с основной зоной новейшего рифтообразования, т.е. с Чарской впадиной.

Во-вторых, анализ соотношения зон активной седиментации и разновозрастных поверхностей выравнивания позволил выделить два этапа в развитии новейшей рифтовой Чарской впадины. На первом этапе здесь формировался относительно узкий осевой неогеновый грабен, а в четвертичном периоде началось массивное расширение области прогибания, т.е. оформление современной впадины. При этом расширение впадины происходит не только на юго-восток к относительно менее активно воздымающемуся Удоканскому своду, но и фрагментарно, в виде Южноапсатского блока

отседания, который разрушает юго-восточный фас Кодарского хребта-поднятия.

Следует заметить, что данная тенденция последовательного “втягивания” краевых частей поднятий в прогибание рифтовой впадины принципиально отличается от преобладающей тенденции перераспределения структур в альпийских орогенах, где преобладает “втягивание” краевых частей впадин в воздымания [9, 11].

В-третьих, сопоставление эрозионных элементов юго-восточного склона Кодарского хребта и разреза Чарской впадины свидетельствует об определенной неравномерности относительных вертикальных перемещений этих структур:

- в меловое время и палеогене медленно воздымался преимущественно Кодарский хребет над равниной на месте будущей Чарской впадины;
- в неогене и большей части четвертичного периода активно двигались в противоположных направлениях, как хребет, так и впадина, причем впадина прогибалась интенсивнее, чем воздымался хребет;
- в самом конце неоплейстоцена и голоцене, поскольку отмечается вложение соответствующих разновозрастных террасовых образований, вновь, по-видимому, интенсивнее воздымался Кодарский хребет.

Характеристика разрывных смещений

По протяженности и амплитудам разрывных смещений четко выделяются два типа новейших разрывов: региональные с многокилометровыми амплитудами и локальные с амплитудами в несколько сотен метров.

Региональным является Южнокодарский сброс, имеющий весьма впечатляющий эскарп (рис. 5).

Количественная оценка разрывных смещений на основе существующих геолого-геоморфологических и топографических материалов может быть реализована только в самых общих чертах

и на достаточно приблизительном уровне с учетом ряда допущений.

Во-первых, рассматривается единый сместитель Южнокодарского сброса.

Во-вторых, принимается, что границы разновозрастных отложений примыкают к этому сместителю на тех же высотных уровнях, на которых они вскрыты скважиной № 126 и геофизическими методами.

В-третьих, все оценки высот округляются до сотен метров.

В-четвертых, следует учитывать, что оценки абсолютной продолжительности рассматриваемых этапов также весьма приблизительны.

Опираясь на упомянутые допущения, может быть предложена следующая очень упрощенная схема расчета (рис. 6).

На ней показаны весьма приблизительно и округленно определенные амплитуды дифференцированных разрывных смещений по Южнокодарскому сбросу за:

- 1) неоген-четвертичное время продолжительностью порядка 24 млн лет с амплитудой 3 км;
- 2) эоплейстоцен, неоплейстоцен и голоцен, длительностью 1.8 млн лет с амплитудой 1 км;
- 3) средний-поздний неоплейстоцен и голоцен, длительностью 0.4 млн лет с амплитудой 0.7 км.

Опираясь на эти данные, можно рассчитать средние суммарные скорости соответствующих разрывных смещений. Суммарными они считаются потому, что не учитывают возможных встречных перемещений, а средними – потому, что не учитывают неравномерности смещений. Соответственно получены следующие скорости смещений:

$$N + Q = 0.1 \text{ мм/год};$$

$$Q_E + Q_{I-IV} = 0.55 \text{ мм/год};$$

$$Q_{II-IV} = 0.75 \text{ мм/год}.$$

Путем вычитания данных о смещениях по разновозрастным этапам могут быть оценены амплитуды и скорости поэтапных разрывных смещений:

- 1) за неогеновый (доэоплейстоценовый) этап: амплитуда составляет $3 - 1 = 2$ км; продолжительность $24 - 1.8 = 22.2$ млн лет; а скорость смещений 0.09 мм/год;
- 2) за эоплейстоценовый этап: амплитуда $1 - 0.7 = 0.3$ км, продолжительность $1.8 - 0.4 = 1.4$ млн лет, скорость смещений 0.21 мм/год;
- 3) позднечетвертичный этап (Q_{II-IV}): амплитуда 0.7 км, продолжительность 0.4 млн лет, скорость смещений 0.75 мм/год.

Сопоставление этих скоростей, очевидно, свидетельствует об их существенном нарастании в неоплейстоцене (рис. 7). Это соответствует



Рис. 5. Обрывистый фас Южнокодарского сброса (фото А. Леснянского).

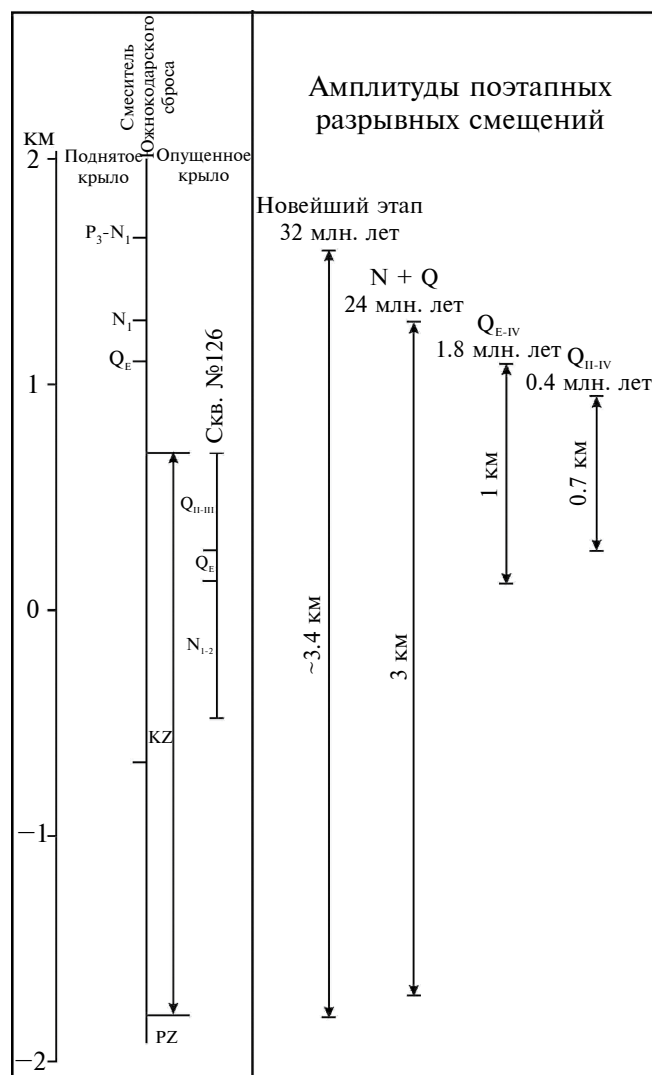


Рис. 6. Схема расчета поэтапных смещений по Южнокодарскому сбросу.

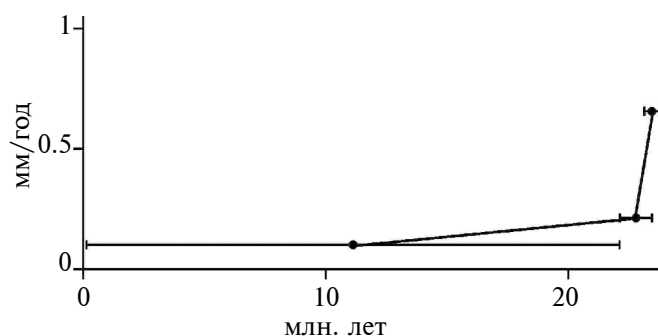


Рис. 7. График изменения поэтапных скоростей разрывных смещений по Южнокодарскому сбросу.

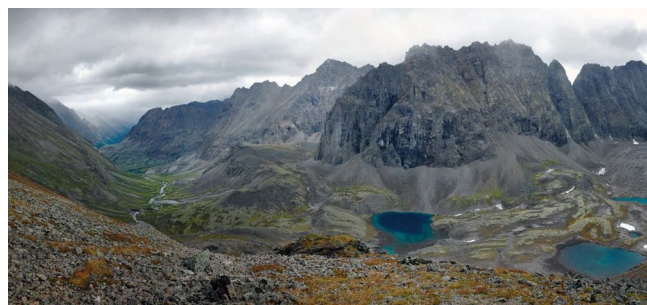


Рис. 8. Альпинотипный тип рельефа Кодарского хребта-поднятия с преобладающими крутыми склонами и широким распространением обвально-осыпных, лавинных и селевых шлейфов конусов выноса (фото А. Леснянского).

общим тенденциям во многих других орогенах, в том числе высокоактивных альпийских [9, 10]. Данная закономерность, вероятно, свойственна и другим наиболее активным региональным разрывам в БРЗ.

Поскольку в рифтовом орогенезе проявляются определенные черты сходства с альпийским орогенезом, соответственно для таких структур при строительном проектировании, могут использоваться существующие методики расчета максимальных разрывных смещений за срок службы инженерных сооружений [9, с. 342–343].

ОТРАЖЕНИЕ НЕОСТРУКТУРНОГО РАЙОНИРОВАНИЯ В РАСПРОСТРАНЕНИИ ОПАСНЫХ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Выделенные основные структурные элементы характеризуются специфическим рельефом и существенными различиями в наборе (комплексе) геологических процессов, что отражается и в особенностях хозяйственного освоения территории. Связанная с рифтогенезом деструкция литосферы обуславливает проявление выраженных на поверхности сейсмодетформаций и сейсмодислокаций [18].

Кодарский хребет-поднятие (I) отличается альпинотипным рельефом (рис. 8) с глубоким эрозийным расчленением и цепочками островеиных гребней и пиков.

Здесь нередки крутые (более 33°) и отвесные склоны, где активизируются осыпные и обвальные процессы, в том числе сейсмогенные. На менее крутых склонах проявляются лавинно-селевая аккумуляция и криогенные процессы (солифлюкция, десерпция). Наименьшую площадь в долинах и ледниковых трогах занимают аккумулятивные поверхности, в том числе моренные, где происходит наледообразование. Большие сложности представляют также много-снежье и высокая степень лавинной опасности

[13]. Наиболее благоприятны для традиционного освоения поверхности морен в относительно широких троговых долинах. Большая часть территории хребта (более 95%) не осваивается из-за сложных инженерно-геологических и логистических условий. В последние годы разрабатывалось Апсатское каменноугольное месторождение.

Чарская впадина (II). Рифтовое прогибание впадины предопределило формирование обширных субгоризонтальных (с уклонами до 2–3°) озерных и долинно-маревых поверхностей, в том числе заболоченных, а также пояс меандрирования р. Чара (до 6–7 км шириной) в центральной ее части (рис. 9).

Широко распространены многолетнемерзлые породы, с которыми связаны термокарст, морозобойное растрескивание и образование повторно-жильных льдов, морозное пучение, наледообразование и термоэрозия. Активность процессов подтверждается глубокими морозобойными трещинами, обширными мерзлотными полигонами, крупными буграми пучения, повторяющимися термокарстовыми просадками и огромными наледями, распространенными на аллювиальных равнинах. Низкие террасы речных долин нередко подтапливаются и полностью затапливаются в результате половодий и паводков, что усиливает процессы термокарста и термоэрозии берегов.

Наиболее благоприятными территориями для ведения хозяйственной деятельности следует считать возвышенные участки конечно-моренных холмов и гряд, моренных и террасированных поверхностей с хорошим дренажем и глубоким сезонно-талым слоем, а также водно-ледниковые песчаные террасированные равнины из-за слабой активности экзогенных процессов и глубокого оттаивания многолетнемерзлых пород. Однако пески при нарушении целостности верхних горизонтов могут легко развеваться, особенно на открытых песчаных массивах [13]. Заболоченные грунты с повышенной льдистостью не всегда обеспечивают устойчивость инженерных сооружений.



Рис. 9. Равнинный тип рельефа Чарской рифтовой впадины с поясом меандрирования р. Чара и заболоченными редколесьями — марями (фото А. Кулакова).

В пределах впадины располагается несколько малых населенных пунктов, небольших промышленных предприятий и традиционных хозяйств. Но особую значимость для региона представляет Байкало-Амурская магистраль и прилегающие к ней железнодорожные ветки, функционирование которых осложняется разнообразными опасными процессами (рис. 10).

Удоканский хребет-поднятия (III) объединяет разновысотные блоки с развитием денудационных процессов и следами различных ледниковых процессов. Расчлененный гольцовый рельеф самых высоких блоков с признаками альпинотипности и следами экзарации характеризуется распространением гравитационных, селевых, лавинных, мерзлотно-склоновых (криогенная десерпция, солифлюкция) процессов (рис. 11). На более широко распространенных средневысотных блоках с куполообразными плоскими вершинами и склонами проявляется курумообразование с формированием нагорных террас. Для низкогорных и предгорных блоков с округлыми и сглаженными вершинами характерны эрозионно-склоновые и мерзлотно-склоновые процессы (криогенная десерпция, солифлюкция) [13].

В настоящее время в пределах хребта-поднятия осваивается крупное Удоканское месторождение меди, а также существует недействующая железнодорожная ветка Новая Чара — Чина, проложенная от Байкало-Амурской магистрали к крупному



Рис. 10. Образование суффозионной воронки глубиной 1.5 м на железнодорожной ветке Новая Чара — Чина (3-й километр дороги) (фото А. Кулакова).



Рис. 11. Гольцовый тип рельефа Удоканского хребта-поднятия с “куполообразными” вершинами и чехлом грубообломочных скоплений – курумов (фото А. Кулакова).

неразработанному Чинейскому месторождению. Эти сооружения подвержены разнообразным опасным процессам (рис. 12).

Чина-Каларская впадина (IV) в значительной степени вовлечена в воздымания и эрозионное расчленение совместно со смежными хребтами. В четвертичном периоде здесь формировался ледом, оказавший влияние на морфологию рельефа. В настоящее время днище впадины частично заполнено талыми водами (рис. 13).

Основными современными экзогенными процессами во впадине являются эрозия берегов и днища, а также мерзлотно-склоновые процессы (солифлюкция, десерпция), термокарст, морозное пучение, наледеобразование и заболачивание.

Впадина практически не освоена в хозяйственном отношении. Благоприятными для такого освоения можно считать моренные холмы и гряды, а также возвышенные участки озерных и аллювиальных террас [13].

Каларский хребет-поднятия (V). На характер современных экзогенных процессов повлияли интенсивность прошедшего оледенения, а также блоковое строение хребта-поднятия. Доминирующим современным процессом на пологих



Рис. 12. Осыпные конусы выноса, перекрывшие участок железнодорожной ветки Новая Чара – Чина (51-й километр дороги) (фото А. Кулакова).

и средней крутизны склонах (до 5–25°) является десерпционное перемещение грубообломочного материала. Крутые склоны (от 33°) троговых долин подвержены в большей степени гравитационно-склоновым процессам (осыпи, обвалы, камнепады) (рис. 14).

В пределах Каларского хребта-поднятия имеется крупное неразработанное Чинейское ванадий-содержащее титаномagnetитовое месторождение

с подъездным неэксплуатируемым участком железнодорожной ветки Новая Чара — Чина и вахтовым поселком Чина. Используемые в качестве относительно благоприятных мест для освоения слабонаклонные и выровненные участки расширенных троговых долин, где расположены основные объекты инженерной инфраструктуры, подвержены преимущественно криогенным процессам в виде термокарста (рис. 15) и наледообразования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ позволил сделать ряд выводов.

1. Чарский рифт может считаться типичным для Байкальской рифтовой зоны, поскольку в нем представлены все главные типовые для этой зоны структурные элементы. Выявленные для этого рифта закономерности, вероятно, будут свойственны и другим рифтам.

2. Применение оротектонического метода позволило получить более разностороннюю информацию о строении и истории развития рифтовых структур. Поэтому можно считать целесообразным использование данного метода и при изучении других элементов Байкальской рифтовой зоны.

3. Выявлены некоторые локальные особенности развития Чарского рифта:

- нестабильность расположения зон активного прогибания, подтверждающаяся несовпадением Апсатского мезозойского и собственно Чарского новейшего прогибов в одном поперечном сечении БРЗ;

- намечено два этапа в развитии новейшей рифтовой впадины: в неогене формировался узкий грабен, а в квартере происходило последовательное расширение впадины;

- проявляются черты неравномерности орогенических воздыманий:

- в меловое время и палеогене намечен медленный рост Кодарского хребта-поднятия,

- в неогене и начале квартера характерны дифференцированные движения хребтов-поднятий и впадины,

- в конце квартера снова активизируются воздымания Кодарского хребта-поднятия.

4. Намечаются определенные черты сходства и различия в развитии областей альпийского орогенеза и рифтогенеза:

- сходство проявляется в нарастании неоплейстоценовой активности тектонических движений, в том числе разрывных;

- принципиальное различие проявляется в тенденциях территориального преобладания



Рис. 13. Холмисто-западинная моренная равнина внутригорной Чина-Каларской впадины, частично заполненная талыми водами (фото А. Леснянского).



Рис. 14. Резкорасчлененные гольцы Каларского хребта-поднятия с крутыми обвально-осыпными склонами (фото А. Кулакова).



Рис. 15. Волнообразные просадки участка железнодорожной ветки Новая Чара — Чина (68-й километр дороги), вызванные термокарстовым процессом (фото А. Кулакова).

прогибов и поднятий: в альпийских орогенах преобладает “втягивание” краевых частей прогибов в воздымания, а в областях рифтогенеза — краевых частей поднятий в прогибания.

5. Намечаются некоторые тектогенные особенности, которые следует учитывать при строительном проектировании:

— пересечение Кодарского высокоподнятого хребта-поднятия линейными сооружениями экономически целесообразно преимущественно по долинам поперечных рек;

— разрывная зона Южнокодарского регионального сброса отличается наиболее интенсивными возможными разрывными смещениями.

6. Структурно обусловленные особенности рельефа определяют специфику распространения и интенсивности проявления опасных экзогенных процессов. В хребтах-поднятиях с альпийским рельефом преобладают гравитационные (обвалы-осыпи), нивально-гляциальные, селевые и лавинные процессы. На средневысотных гольцовых куполообразных поверхностях активизируются процессы курумообразования. Для низкотерри характерны мерзлотно-склоновые процессы (криогенная десерпция, солифлюкция, осывы крупнообломочного материала). Во впадинах преобладает аллювиальная и ледниковая аккумуляция материала, в котором проявляются термокарсты, морозобойное растрескивание с образованием повторно-жильных льдов, морозное пучение. Характерны заболачивание, наледообразование и термоэрозия берегов. Все эти процессы осложняют хозяйственное освоение территории.

7. Предложенное неоструктурное районирование определяет специфику распространения и комплексирования опасных геологических процессов и особенности строительного освоения территорий. Поэтому неоструктурное районирование с применением оротектонического метода должно входить в комплекс работ при инженерных изысканиях в области Байкальской рифтовой зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Неотектоника. Новосибирск: Наука, 1984. 208 с.
2. Ендрихинский А.С. Развитие речной сети Станового нагорья в позднем кайнозое // Рельеф и четвертичные отложения Станового нагорья. М.: Наука, 1981. С. 135–166.
3. Еникеев Ф.И. Плейстоценовые оледенения Восточного Забайкалья и юго-востока Средней Сибири // Геоморфология. 2009. № 2. С. 33–49.
4. Еникеев Ф.И. Поздний кайнозой Северного Забайкалья и палеоклимат юга Восточной Сибири // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 8. С. 794–804.
5. Леви К.Г., Кульчицкий А.А. Поверхности выравнивания северо-восточной части Байкальской рифтовой зоны // Рельеф и четвертичные отложения Станового нагорья. М.: Наука, 1981. С. 19–35.
6. Логачев Н.А. Осадочные и вулканогенные формации Байкальской рифтовой зоны // Байкальский рифт. М.: Наука, 1968. С. 72–101.
7. Лопатин Д.В. Геоморфология восточной части Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Наука, 1972. 115 с.
8. Лопатин Д.В. О поверхностях и процессах выравнивания в восточной части Байкальской рифтовой зоны // Поверхности выравнивания. М.: Наука, 1973. С. 211–217.
9. Несмеянов С.А. Инженерная геотектоника. М.: Наука, 2004. 780 с.
10. Несмеянов С.А. Количественная оценка новейших движений и неоструктурное районирование горной области. М.: Недра, 1971. 144 с.
11. Несмеянов С.А. Оротектонический метод. М.: ООО “Миттель Пресс”, 2017. 376 с.
12. Плоскогорья и низменности Восточной Сибири / Адаменко О.М., Долгушин И.Ю., Ермолов В.В. и др. М.: Наука, 1971. 320 с.
13. Природные условия освоения севера Читинской области / Отв. ред. А.А. Недешев, В.С. Преображенский. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 127 с.
14. Равский Э.И. Осадконакопление и климаты Внутренней Азии в антропогене. М.: Наука, 1972. 336 с.
15. Уфимцев Г.Ф. Горные пояса континентов и симметрия рельефа. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1991. 160 с.
16. Уфимцев Г.Ф. Морфотетоника Евразии. Иркутск: ИГУ, 2002. 494 с.
17. Флоренсов Н.А. Мезозойские и кайнозойские впадины Прибайкалья. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1960. 258 с.
18. Шерман С.И., Демьянович В.М., Лысак С.В. Сейсмический процесс и современная многоуровневая деформация литосферы в Байкальской рифтовой зоне // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 12. С. 1458–1470.

NEOSTRUCTURAL ZONING AND HAZARDOUS PROCESSES IN THE CHARA RIFT BASIN

S. A. Nesmeyanov^{a,#}, D. O. Sergeev^{a,##}, O. A. Voeykova^{a,#}, A. P. Kulakov^{a,###}

^aSergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences

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

[#]E-mail: voa49@mail.ru,

^{##}E-mail: sergeevdo@mail.ru,

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

Routine distinguishing of morphostructures upon neotectonical studies in the Chara rift area is supplemented by the orotectonic method. This combination permitted us to characterize the phases and unevenness of

orogenesis and faulting along the regional normal fault. The instability of Mesozoic and recent structure formation is revealed, as well as the Neo-Pleistocene activation of the structures known in Alpine orogens. It is shown that the structurally dependent features of the relief control the specifics of exogenous geohazards manifestation. Using the tectonic method, the established patterns may also be valid for other rifts in the Baikal Rift Zone.

Keywords: *neotectonics, Chara Rift Basin, Kodar ridge, Kalar range, Udokan ridge, neotectonic zoning, normal fault, faulting*

REFERENCES

1. [Geology and seismicity of the BAM zone. Neotectonics]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984, 208 p. (in Russian)
2. Endrikhinskii, A.S. [Development of the river network of the Stanovoi Highlands in the Late Cenozoic]. In: [Relief and Quaternary deposits of the Stanovoi Highlands]. Moscow, Nauka Publ., 1981, pp. 135–166. (in Russian)
3. Enikeev, F.I. [Pleistocene glaciations of the Eastern Transbaikalia and the southeast of Central Siberia]. *Geomorfologiya*, 2009, no. 2, pp. 33–49 (in Russian)
4. Enikeev, F.I. [Late Cenozoic of Northern Transbaikalia and paleoclimate in the south of the Eastern Siberia]. *Geologiya i Geofizika*, 2008, vol. 49, no. 8, pp. 794–804. (in Russian)
5. Levi, K.G., Kul'chitskii, A.A. [Leveling planes of the northeastern part of the Baikal rift zone]. In: [Relief and Quaternary deposits of the Stanovoi Highlands]. Moscow, Nauka Publ., 1981, pp. 19–35. (in Russian)
6. Logachev, N.A. [Sedimentary and volcanogenic formations of the Baikal rift zone]. In: [Baikal Rift]. Moscow, Nauka Publ., 1968, pp. 72–101. (in Russian)
7. Lopatin, D.V. [Geomorphology of the eastern part of the Baikal rift zone]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1972, 115 p. (in Russian)
8. Lopatin, D.V. [About leveling planes and processes in the eastern part of the Baikal rift zone]. In: [Leveling planes]. Moscow, Nauka Publ., 1973, pp. 211–217. (in Russian)
9. Nesmeyanov, S.A. [Engineering geotectonics]. Moscow, Nauka Publ., 2004, 780 p. (in Russian)
10. Nesmeyanov, S.A. [Quantitative assessment of the latest movements and non-structural zoning of the mountain region]. Moscow, Nedra Publ., 1971, 144 p. (in Russian)
11. Nesmeyanov, S.A. [Orotectonic method]. Moscow, Mittel Press, 2017, 376 p. (in Russian)
12. [Plateaus and lowlands of Eastern Siberia]. Adamenko, O.M., Ed., Moscow, Nauka Publ., 1971, 320 p. (in Russian)
13. [Natural conditions of the development of the Chita region north]. Nedeshev, A.A., Preobrazhenskii, V.S., Eds., Moscow, AN SSSR Publ., 1962, 127 p. (in Russian)
14. Ravskii, E.I. [Sedimentation and climates of the Inner Asia in Anthropogene]. Moscow, Nauka Publ., 1972, 336 p. (in Russian)
15. Ufimtsev, G.F. [Mountain belts of continents and the relief symmetry]. Novosibirsk, Nauka Publ., Siberian division, 1991, 160 p. (in Russian)
16. Ufimtsev, G.F. [Morphotectonics of Eurasia]. Irkutsk, IGU Publ., 2002, 494 p. (in Russian)
17. Florensov, N.A. [Mesozoic and Cenozoic depressions of the Baikal region]. Moscow, Leningrad, AN SSSR Publ., 1960, 258 p. (in Russian)
18. Sherman, S.I., Dem'yanovich, V.M., Lysak, S.V. [Seismic process and modern multilevel destruction of the lithosphere in the Baikal rift zone]. *Geologiya i Geofizika*, 2004, vol. 45, no. 12, pp. 1458–1470. (in Russian)

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 502.35

ВЛИЯНИЕ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ТЕХНОГЕННО-ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ВОСТОЧНОМ ОРЕНБУРЖЬЕ

© 2024 г. М. Ю. Нестеренко^{1,*}, В. С. Белов¹, Э. Р. Галеева^{2,**}

¹Оренбургский федеральный исследовательский центр УрО РАН (Отдел геоэкологии),
ул. Набережная 29, Оренбург, 460014 Россия

²Оренбургский государственный университет,
пр. Победы 13, Оренбург, 460018 Россия

*E-mail: n_mu@mail.ru

**E-mail: galeevskoe@mail.ru

Поступила в редакцию 07.11.2023 г.

После доработки 16.04.2024 г.

Принята к публикации 20.07.2024 г.

Представлен анализ геодинамической обстановки на территории восточной части Оренбургской обл. за 2006–2022 гг. Количество зарегистрированных сейсмических событий составляет в среднем 742 соб./год. Рассмотрено влияние горнодобывающих предприятий на увеличение техногенной сейсмичности. Установлено, что наибольшее количество сейсмических событий приходится на территории вблизи разрабатываемых месторождений твердых полезных ископаемых. Проведен анализ техногенных землетрясений с магнитудой $M_I \geq 3.0$. Выявлены причины увеличения техногенно-тектонической сейсмичности. Описаны особенности возникновения сильных ($M_I \geq 3.0$) техногенно-тектонических землетрясений при динамических воздействиях взрывных работ при добыче полезных ископаемых. Выявлена временная зависимость между проведенными взрывами на промышленных площадках и зарегистрированными сейсмическими событиями (коэффициент корреляции 0.89). Рассмотрены виды техногенной сейсмичности: статические и динамические. Периодические динамические воздействия взрывных работ могут быть триггером для разрядки существующего напряженного состояния тектонических структур. Геодинамические события с магнитудой $M_I \geq 4.0$ оказывают наиболее опасное воздействие на промышленные и гражданские здания и сооружения, а также сказываются на экологической ситуации в регионе и безопасности жизни населения. Проведено районирование территории с выделением двух обособленных участков с повышенным количеством зарегистрированных сейсмических событий с магнитудой $M_I \geq 3.0$: Адамовский и Ясненский районы.

Ключевые слова: геодинамика, техногенно-тектоническая сейсмичность, техногенные землетрясения, Оренбургская область

DOI: 10.31857/S0869780924040036 EDN: SFVGSX

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных проблем при ведении крупномасштабных горнодобывающих работ является техногенная сейсмичность, влекущая за собой не только катастрофические технико-экономические последствия (землетрясения, оползни, горные удары и др.), но и приводящая иногда к человеческим жертвам. Подобные техногенные землетрясения происходили практически во всех странах, где добывают твердые полезные ископаемые [1].

В России проблема возникновения техногенной сейсмичности остро стоит в областях, где добыча полезных ископаемых из недр Земли ведется активно и постоянно. Техногенные землетрясения,

вызванные работами на горнодобывающих предприятиях, встречаются во многих промышленных областях страны: Кемеровская область (Бачатское землетрясение 18.06.2013 г.) [3]; Кольский полуостров (рудник “Умбозеро” 17.08.1999 г.) [6]; Хибинское месторождение (Кировский рудник 21.10.2010 г.) [5]; Республика Башкортостан, Учалинское месторождение, 05.09.2012 г.) [12] и др. Исследования сейсмических событий на рудниках являются важной задачей для управления геодинамическими рисками при промышленной разработке месторождений.

Рассмотрением вопроса влияния промышленной разработки месторождений полезных ископаемых на геодинамическую активность верхней части земной коры, занимается ряд российских

ученых, среди которых геофизик, академик В.В. Адушкин. Он считает, что при ведении взрывных работ в условиях постоянно действующей техногенной нагрузки появляется триггерный эффект возникновения сильных землетрясений [2].

При этом наиболее существенное воздействие на изменения геодинамического режима в структурах земной коры оказывают статические и динамические воздействия при добыче твердых полезных ископаемых (ТПИ) [11]. Таким образом, их можно классифицировать на две группы, согласно причинам их появления [2]:

1. *Статические*, постоянно воздействующие на массивы горных пород. К ним можно отнести извлечение и перемещение горной массы. Они влияют и подвергают изменениям существующее естественное напряженное состояние в структурах земной коры в местах изъятия горной породы (карьеры, шахты) и в местах складирования пустой породы (отвалы).

2. *Динамические*, импульсные, возникающие от проведения взрывных работ при добыче ТПИ.

В настоящее время на территории восточной части Оренбургской области располагается значительное количество горнодобывающих предприятий. Взрывные работы, а также работы по извлечению и перемещению горной породы происходят систематически, и их объемы растут с каждым годом. При этом нарушается целостность верхней оболочки земли, оказывая влияние на напряженно-деформированное состояние геологической среды, что может стать причиной возникновения техногенных геодинамических явлений с негативными последствиями. Одним из таких проявлений является возросшее в последние десятилетия количество регистрируемых сейсмических событий в восточной части области.

Цель данной работы — выявление закономерностей формирования и изменения напряженно-деформированного состояния и техногенно-тектонической сейсмичности земной коры на территории восточной части Оренбургской обл. вследствие воздействия промышленных взрывов.

Важно выяснить особенности и механизмы формирования очаговых зон техногенно-тектонических землетрясений. Решение данных вопросов является составной частью проблемы развивающегося техногенеза на территории Оренбургской обл.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Восточная часть Оренбургской обл. охватывает южную оконечность Урала и южное Зауралье. Согласно тектонической карте (рис. 1), восточная часть области располагается в Урало-Охотском поясе и разделяется на Западно-Уральскую внешнюю надвиговую систему, Магнитогорскую систему мегасинклинорий и Восточно-Уральскую

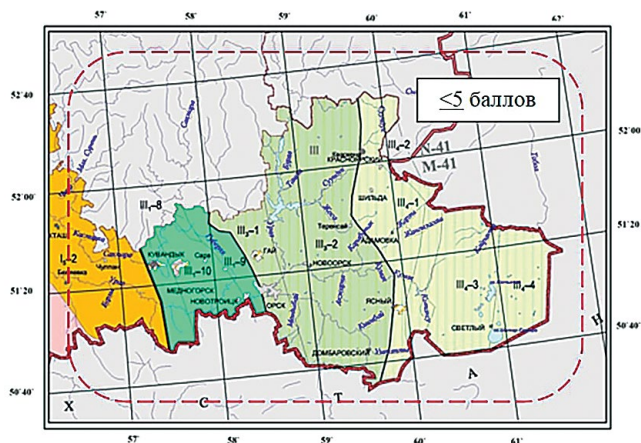


Рис. 1. Территория восточной части Оренбургской обл. Штрихпунктирной красной линией обозначена зона сейсмического районирования согласно данным ОСР-2016 (в баллах шкалы MSK-64).

систему аллохтонных выступов, которые в свою очередь осложнены системой выступов и поднятий, расчлененных тектоническими разломами.

В соответствии с картой сейсмического районирования ОСР-2016, территория восточного Оренбуржья относится к зоне 5-бальной сейсмической активности по шкале MSK-64 [11]. Однако регистрируемые сейсмические события магнитудой более 4 подтверждают необходимость уточнения карты.

О необходимости уточнения карт сейсмического районирования и применения новых подходов к оценке сейсмичности, отмечено в работе [13].

На исследуемой территории сосредоточено множество разрабатываемых месторождений ТПИ. Значимое влияние на напряженное состояние и геодинамику верхней части земной коры оказывают изъятие и перемещение горной породы вследствие отработки месторождений, которые совместно с сопутствующими буровзрывными работами и накопленными тектоническими напряжениями приводят к природно-техногенным сейсмическим событиям значительной силы.

Вероятно, наиболее существенное воздействие на изменения геодинамического режима в структурах земной коры оказывают ударные воздействия при проведении взрывных работ. От взрывов горной массы в блочных структурах земной коры могут развиваться области остаточных, необратимых деформаций. Взрывные импульсы также могут обладать триггерным эффектом, освобождая накопленную потенциальную энергию между блоками тектонических структур, как региональными, так и субрегиональными [2].

Разработка месторождений полезных ископаемых и проводимые массовые взрывы вызывают перераспределение напряжений в земной коре. В зависимости от масштабов взрывов размеры

напряженных областей блочных тектонических структур, вовлеченных в движение, могут изменяться. В еще более обширной области упругих деформаций развиваются процессы перестройки существующего там напряженного состояния с возможной их концентрацией на неоднородностях массива, зонах трещиноватости и разломов [2], что говорит о неравномерности распределения остаточной нагрузки на массив и необходимости изучения влияния зон трещиноватости и разломов на проявления сейсмической активности в регионе.

В основу настоящего анализа сейсмической активности восточного Оренбуржья положены данные инструментальных наблюдений Казахстанского национального центра данных [4] и данных сейсмологической сети ОФИЦ УрО РАН с 2006 по 2022 г.

В табл. 1 сейсмические события, произошедшие за указанный период, дифференцированы по величинам магнитуд: $M_I \geq 1.0$; 1.5; 2.0; 2.5; 3.0

и 4.0. В первых четырех группах магнитуд сейсмические события инициированы, главным образом, массовыми взрывами, и только некоторое число событий может оказаться техногенно-тектоническими землетрясениями. В группах 5 и 6 сейсмических событий с магнитудами $M_I \geq 3.0$, вероятно, представлены техногенно-тектонические землетрясения, в связи с их высокой интенсивностью, значительно превышающей энергию проводимых взрывов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Из приведенных данных о сейсмических событиях (см. табл. 1) можно выделить два временных периода: 2006–2014 гг. и 2015–2022 гг. Средневзвешенное количество сейсмических событий в этих периодах составляет в среднем по 742 событий за год. Однако количество сейсмических событий с магнитудами $M_I = 1–1.5$ во втором периоде увеличилось в 2 раза, а событий с $M_I = 1.5–2$ в 1.5 раза.

Таблица 1. Ежегодное число сильных сейсмических событий и потребление взрывчатых веществ (ВВ) в горновзрывных работах на территории восточной части Оренбургской обл. в период инструментальных наблюдений за 2006–2022 гг.

Год	Количество зарегистрированных событий на территории исследования							Потребление ВВ, тыс. т/год	Ежегодный прирост потреб. ВВ, тыс. т/год	Поток сейсмической энергии, МДж/год	Общее количество произведенных взрывов за год
	$1 \geq M_I > 1.5$	$1.5 \geq M_I > 2.0$	$2.0 \geq M_I > 2.5$	$2.5 \geq M_I > 3.0$	$3.0 \geq M_I > 4.0$	$M_I \geq 4$	Всего за год				
2006	29	92	218	187	91		617			2446	
2007	30	142	255	147	79	1	654			1715	
2008	56	195	301	152	30		734			421.8	
2009	26	204	346	155	14		745			409.9	
2010	19	163	382	173	27		764			645.2	
2011	15	169	374	154	16		728			623.9	
2012	24	239	432	145	3		843			572.1	
2013	28	323	457	172	13		993			819.7	
2014	22	207	299	155	55	2	740			1288.1	
2015	29	325	396	58	3		811			591.1	
2016	25	322	367	79	4		797			420.8	
2017	49	324	312	84	4		773			473.6	
2018	70	311	282	82	17		762	15.26		530.0	2195
2019	42	282	313	71	4		712	16.38	1.12	404.9	1646
2020	33	289	356	77	3		758	17.46	1.08	334.4	1994
2021	37	241	281	79	3		641			375.8	
2022	30	182	243	84	3		542			479.8	

Число сейсмических событий с $M_I = 2-2.5$ осталось на прежнем паритетном уровне – 1.1, с $M_I = 2.5-3$ уменьшилось в 2 раза, а с $M_I \geq 3.0$ – в 7 раз во втором периоде.

Уменьшение количества сейсмических событий с магнитудами $M_I \geq 2.5$, видимо, связано с сокращением работ на железорудных месторождениях Орско-Халиловской группы, Буруктаальском месторождении никель-кобальтовых руд и на Аккермановском месторождении флюсовых известняков, где производили наиболее мощные взрывы.

Распределение эпицентров сейсмических событий с магнитудой $M_I \geq 3.0$ по территории восточного Оренбуржья показано на рис. 2.

Можно проследить, что за период 2018–2020 гг. на медно-колчеданных и хризотил-асбестовых месторождениях потребление взрывчатых веществ увеличивалось с ежегодным приростом около 1 тыс. т/год. Плавное увеличение потребления ВВ за год (~7%) указывает на повышение негативной геодинамической нагрузки на земную кору в районе разрабатываемых месторождений.

За период 2006–2014 гг. средняя величина глубин зарегистрированных сейсмических событий составляет 2.2 км; за период 2015–2022 гг. – 2.0 км.

По методике, предложенной в статье [8], для территории Оренбургской области оценены базовые характеристики сети в ее восточной части: чувствительность, представительность каталога землетрясений и пр.

На рис. 3. представлен график повторяемости сейсмических событий на территории восточной части Оренбургской области. Выполненный анализ графика повторяемости регистрируемых сейсмических событий показал, что диапазон представительной магнитуды начинается от 2.0.

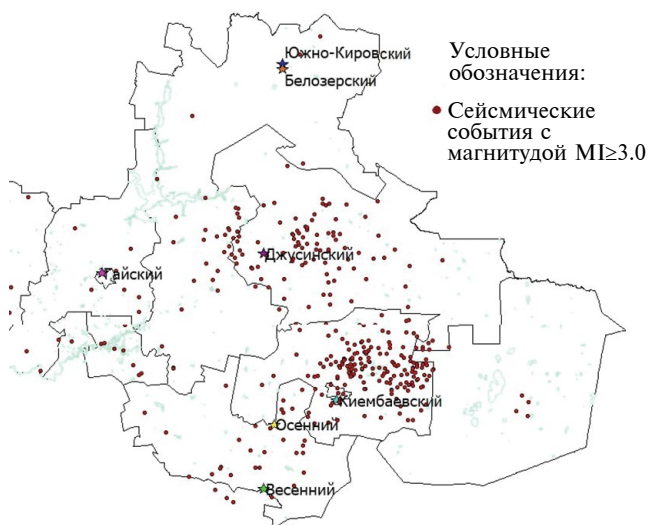


Рис. 2. Схема расположения эпицентров сейсмических событий на территории восточной части Оренбургской обл. в период 2006–2022 гг.

Полученные результаты позволяют найти практическое применение для проведения статистической обработки эмпирических данных выделенного диапазона. [9]

Для классификации сейсмических событий применены два критерия: критерий “максимально допустимой магнитуды” и критерий “ночные события” [2].

Критерий “максимально допустимой магнитуды” означает, что магнитуда техногенных сейсмических событий, связанных с взрывами, не должна превышать определенную максимально допустимую величину по регламенту буровзрывных работ (БВР). Тем не менее, при некоторых массовых взрывах магнитуда сейсмических событий достигала, а иногда превышала уровень магнитуд величиной $M_I \geq 4.0$ (3 события), поэтому в случае проведения взрывных работ этот критерий оказался не эффективным. Классифицировать сейсмические события как техногенно-тектонические или тектонические невозможно. Такие мощные сейсмические события могут иметь и естественное происхождение, так как область характеризуется повышенной естественной сейсмичностью, связанной со сложным тектоническим строением.

Критерий “ночные события” основан на запрете проведения взрывных работ в ночное время. При выделении ночных событий принято, что местное время, в течение которого возможно проведение взрывных работ, начинается в 6:00 и заканчивается в 01:00. Время фиксации ночных событий уменьшено с учетом возможной задержки подрыва в конце рабочего дня и ранних взрывов до 7:00, возникающих по различным организационно-техническим причинам.

Результаты разделения сейсмических событий на ночные и дневные представлены в табл. 2 по трем

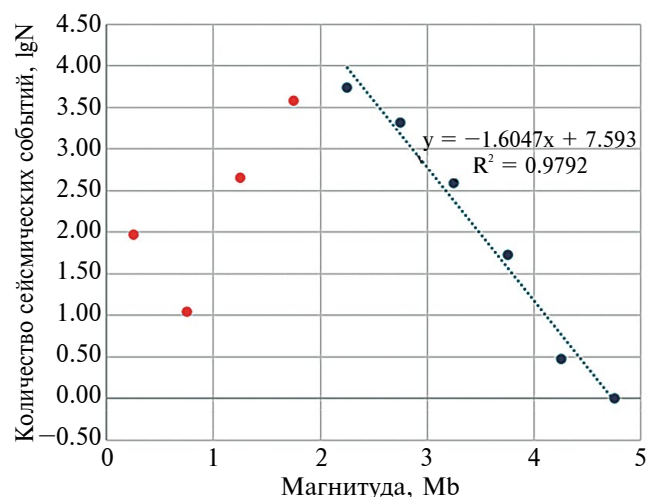


Рис. 3. Распределение сейсмических событий в восточной части Оренбургской области по магнитуде за 2004–2021 гг.

Таблица 2. Ежегодное число сильных ($M_I \geq 3.0$) дневных (“день”) и ночных (“ночь”) сейсмических событий на территории Восточного Оренбуржья в различных диапазонах магнитуд в период 2006–2022 гг.

Диапазон магнитуд	$3.0 \leq M_I \leq 3.4$		$3.5 \leq M_I \leq 3.9$		$4.0 \leq M_I \leq 4.5$	
Время суток	день	ночь	день	ночь	день	ночь
2006	91	—	—	—	—	—
2007	79	—	—	1	1	—
2008	30	—	—	—	—	—
2009	13	—	1	—	—	—
2010	27	—	—	—	—	—
2011	15	—	1	—	—	—
2012	3	—	—	—	—	—
2013	13	—	—	—	—	—
2014	39	1	13	—	2	—
2015	3	—	—	—	—	—
2016	3	1	—	—	—	—
2017	4	—	—	—	—	—
2018	15	—	1	1	—	—
2019	4	—	—	—	—	—
2020	3	—	—	—	—	—
2021	3	—	—	—	—	—
2022	3	—	—	—	—	—

Таблица 3. Землетрясения магнитудой $M_I \geq 4.0$ за период инструментальных наблюдений с 2007 по 2022 г. на территории восточного Оренбуржья

Дата	Время местное, час: мин	Широта	Долгота	Глубина, Н, км	Магнитуда, M_I	Энергетический класс, К	Энергия, Е, МДж
14.09.2007	18:41	50.7085	59.7089	4	4.2	8.7	501.2
26.03.2014	13:14	51.0806	59.7342	4	4.4	8.4	251.2
22.09.2014	17:17	50.6435	59.1641	4	4.1	8.0	100.0

диапазонам магнитуд ($3.0 \leq M_I \leq 3.4$; $3.5 \leq M_I \leq 3.9$; $4.0 \leq M_I \leq 4.5$) [2]. Ночные события (“ночь”) — это, вероятно, техногенно-тектонические землетрясения, дневные события (“день”) — в основном, массовые взрывы, хотя возможно, в их числе есть техногенно-тектонические землетрясения.

Согласно данным табл. 2, за период 2006–2022 гг. было зарегистрировано: 4 ночных техногенно-тектонических землетрясения, 2 события с магнитудой $3.0 \leq M_I \leq 3.4$ (2014 и 2016 г.) и 2 в диапазоне магнитуд $3.5 \leq M_I \leq 3.9$ (2007 и 2018 г.). Появление таких сильных сейсмических событий говорит об изменении геодинамического режима в структурах земной коры.

Список сейсмических событий с магнитудой $M_I \geq 4.0$ за весь период инструментальных

наблюдений представлен в табл. 3. За период 2007–2022 гг. в данном диапазоне магнитуд произошло 3 дневных техногенно-тектонических землетрясения. Вероятно, происходящие геодинамические процессы в земной коре реагируют на изменение напряженного состояния при крупных массовых взрывах. Такие процессы происходят на всех уровнях земной коры. Но с уверенностью отнести их к техногенным невозможно. События произошли на глубине 4.0 км и на расстоянии 15 и 21 км от промышленных площадок. Поэтому, возможно лишь предположить, что эти землетрясения могли быть спровоцированы техногенным воздействием.

В вертикальной плоскости движение земной коры происходит повсеместно и постоянно. Это

тектонические движения различных масштабов, площадного распространения, скоростей, амплитуд. Согласно карте современных вертикальных движений земной коры, для Оренбургской области характерно вертикально движение земной коры 3.5 мм/год [8]. При этом постоянно происходит процесс перераспределения энергии в недрах Земли, что может оказывать влияние на распределение нагрузки в толще земной коры.

Из данных в табл. 2 и 3 следует, что на территории восточного Оренбуржья за период 2006–2022 гг. зарегистрировано около 463 сейсмических событий с магнитудой $M_I \geq 3.0$. Расположение их эпицентров на территории восточного Оренбуржья показано на рис. 4.

Приведены данные трех диапазонов магнитуд: в диапазоне $3.0 \leq M_I \leq 3.4$, в котором оказалась большая часть таких событий (~95%), в диапазоне $3.5 \leq M_I \leq 3.9$ — 18 сейсмических событий (~4%), и в диапазоне $M_I \geq 4.0$ — три техногенно-тектонических землетрясения (<1%).

Наиболее сейсмоактивные районы выделены в пределах Киембаевского рудника (Ясненский район) и Джусинского рудника (Адамовский район). Здесь сосредоточено наибольшее количество сейсмических событий с магнитудой $M_I \geq 3.0$.

Сопоставим промышленные взрывы с зафиксированными сейсмическими событиями на ближайшей территории от Киембаевского рудника в пределах 20 км за период 2018–2020 гг. На графике (рис. 5а) заметно, что максимальное количество

зарегистрированных сейсмических событий пришлось на временные промежутки после проведения взрывных работ (коэффициент корреляции 0.89), что свидетельствует об их временной взаимосвязи. Такая же взаимосвязь прослеживается и на Весеннем руднике (коэффициент корреляции 0.89), где наибольшее количество взрывов происходило в 14:30. При этом наибольшее количество зарегистрированных событий приходится также на промежуток времени 14:00–15:00 (рис. 5б).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Происходившие в структурах недр Земли процессы перестройки геодинамического режима и тектонического поля напряженного состояния, развивались по своим законам, реагируя в основном на изменения только числа самых крупных массовых взрывов. Такое развитие процессов перестройки напряженного состояния происходило одновременно на всех структурных уровнях земной коры.

Массив горной породы в районе добычи ТПИ всегда находится напряженном состоянии. Нагрузка постоянно присутствует в массиве, так как процессы по добыче и транспортировке горной породы происходят систематически. Периодические динамические воздействия взрывных работ являются триггером для разрядки существующего напряженного состояния тектонических структур.

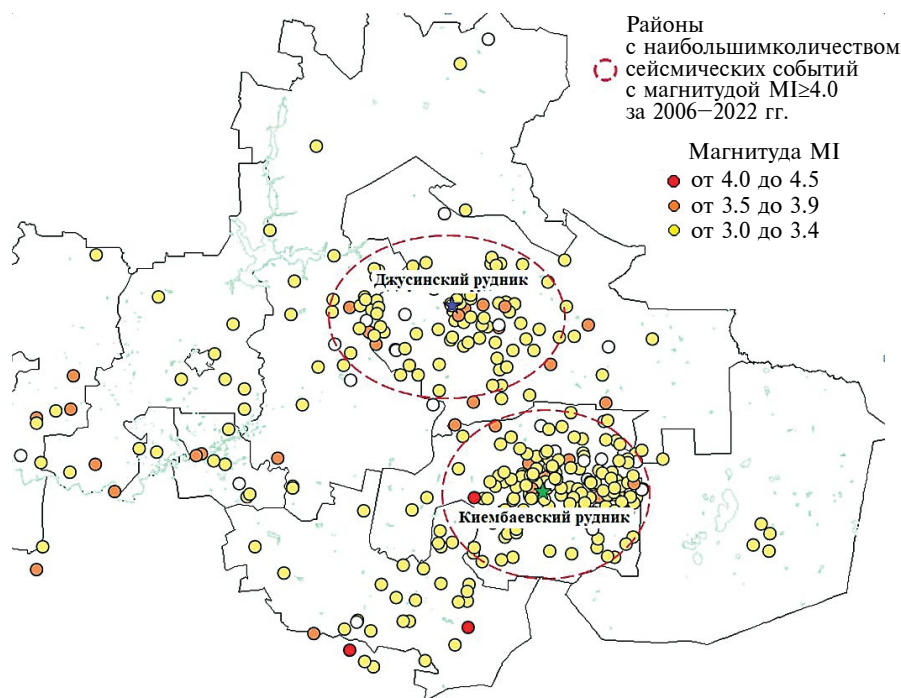


Рис. 4. Расположение эпицентров техногенно-тектонических землетрясений на территории восточной части Оренбургской обл. в период 2007–2022 гг. с диапазоном магнитуд 3.0–3.4, 3.5–3.9 и 4.0–4.5.

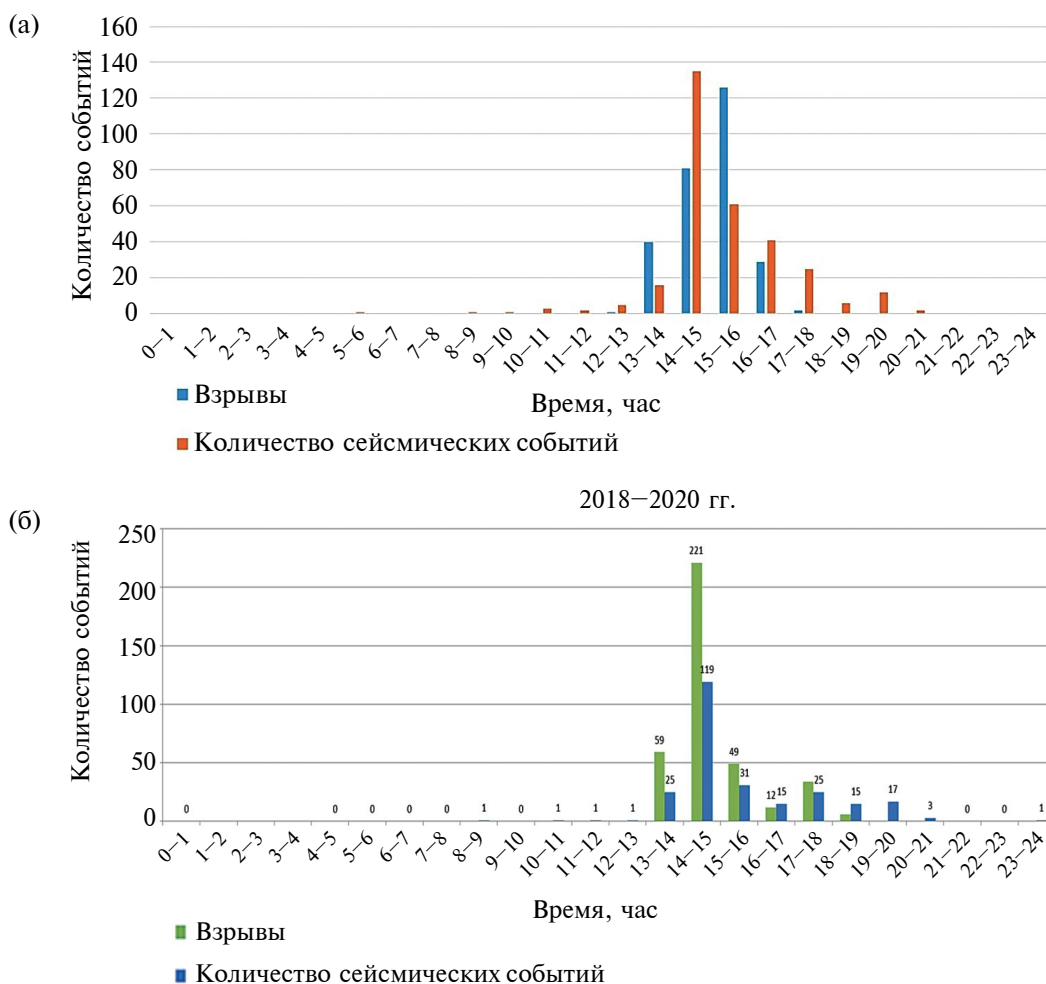


Рис. 5. Графики корреляции промышленных взрывов на Кiemбаевском (а) и Весеннем (б) рудниках с сейсмическими событиями в ближнем радиусе около 20 км за период 2018–2020 гг.

Расположение и интенсивность всех зарегистрированных землетрясений в восточной части Оренбургской обл. с магнитудой $M_I \geq 3.0$ можно проследить на рис. 4. По распределению эпицентров техногенно-тектонических землетрясений, можно выделить несколько регионов (их контуры обозначены на рис. 3). Повышенной активностью в отношении появления сильных техногенно-тектонических землетрясений выделяются два региона: Адамовский и Ясненский районы, где располагаются рудники Джусинский и Кiemбаевский. Следует отметить, менее активные регионы располагаются в восточной и северной частях территории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С каждым годом в восточной части Оренбургской области происходит увеличение объема добычи ТПИ и перемещения горной массы, следовательно, возрастает и уровень техногенно-тектонической нагрузки в недрах Земли.

Описаны особенности возникновения сильных ($M_I \geq 3.0$) техногенно-тектонических землетрясений. На изменение геодинамической обстановки и появление большего количества сейсмических событий с магнитудой $M_I \geq 3.0$ оказывают влияние постоянное статическое воздействие на структуры земной коры при извлечении горной массы при добыче ТПИ и динамическое воздействие взрывных работ.

Проведена оценка представительной магнитуды. Построен график повторяемости сейсмических событий. Выполненный анализ графика повторяемости регистрируемых сейсмических событий показал, что диапазон представительной магнитуды начинается с 2.0.

Выявлена временная зависимость между проведенными взрывами на промышленных площадках и зарегистрированными сейсмическими событиями.

Рассмотрены виды техногенной сейсмичности. Выявлено, что кратковременные, динамичные нагрузки с магнитудой $M_I \geq 4.0$ оказывают наиболее опасное воздействие на недра Земли,

источниками или триггерами которых могут служить буровзрывные работы при добыче ТПИ.

Проведено районирование территории с выделением двух обособленных участков (районы рудников Джусинский и Киембаевский) с повышенным количеством зарегистрированных сейсмических событий с магнитудой $M_I \geq 3.0$.

Работа выполнена в соответствии с программой госзадания Отдела геоэкологии ОФИЦ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абенев А.М., Мынгжасаров Б., Кыргызбаева Г.М., Нурпеисова М.Б. Ведение мониторинга за деформациями земной поверхности с использованием спутниковых систем и обработка его результатов // Молодой ученый. № 18 (413). 2022. С. 102-106.
2. Адушкин В.В. Влияние взрывных работ на возникновение катастрофических техногенно-тектонических землетрясений в Кузбассе // Триггерные эффекты в геосистемах: матер. V Междунар. конф. 2019. С. 203-218.
3. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В. Бачатское техногенное землетрясение 18 июня 2013 г. с $M_L = 6.1$, $I_0 = 7$ (Кузбасс) // Российский сейсмологический журнал. 2020. С. 48-61.
4. Казахстанский Национальный Центр данных. [Электронный ресурс] URL: <https://www.kndc.kz> (дата обращения 02.02.2023 г.)
5. Козырев А.А., Каган М.М., Константинов К.Н., Жиров Д.В. Деформационные предвестники техногенного землетрясения на объединенном Кировском руднике ОАО «Апатит» // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: тр. Всерос. конф., посв. 80-летию акад. М.В. Курлени (3-6.10. 2011). Новосибирск: ИГД СО РАН, 2011. С. 228-234.
6. Козырев А.А., Ловчиков А.В., Кузьмин И.А. Сильнейшее техногенное землетрясение на российских рудниках, 17 августа 1999 г., рудник «Умбозеро» (Кольский полуостров) // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2000. №6. С. 169-173.
7. Мещеряков Ю.А. Карта современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы. Масштаб: 1 : 10 000 000 // Международный геодезический и геофизический союз. Международная ассоциация геодезии. Комиссия по современным движениям земной коры. Подкомиссия по карте Восточной Европы. Главное Управление геодезии и картографии. 1971.
8. Нестеренко М.Ю., Алёшин И.М., Гоев А.Г. и др. Оренбургская региональная сеть «Нефтегаз-сейсмика» // Сейсмические приборы. 2023. Т. 59. № 2. С. 5-17. <https://doi.org/10.21455/si2023.2-1>.
9. Нестеренко М.Ю., Капустина О.А. Оценка представительности каталога сейсмических событий оренбургской области // Проблемы недропользования. 2019. Вып. 2. С. 52-55. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2019.02.052>
10. Томилин Н.Г., Воинов К.А., Селивоник В.Г., Глотов С.В. Техногенное землетрясение как результат неустойчивости шахтного поля // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: тр. Всерос. конф., посв. 80-летию акад. М.В. Курлени (3-6 октября 2011). Новосибирск: ИГД СО РАН. 2011. С. 68-73.
11. Уломов В.И., Богданов М.И. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-2016. Масштаб: 1:8 000 000. 2016.
12. Учалинское техногенное землетрясение 5 сентября 2012 г. // Землетрясения Северной Евразии. Вып. 21. 2018. С. 387-391.
13. Шебалин П.Н., Гвишиани А.Д., Дзедобоев Б.А., Скоркина А.А. Почему необходимы новые подходы к оценке сейсмической опасности? // Доклады Российской академии наук. Науки о земле. 2022. Т. 507. № 1. С. 91-97.

THE IMPACT OF MINE BLASTING ON THE OCCURRENCE OF HUMAN-INDUCED TECTONIC EARTHQUAKES IN THE EASTERN ORENBURG REGION

M. Yu. Nesterenko^{1, #}, V. S. Belov¹, E. R. Galeeva^{2, ##}

¹Orenburg Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Department of Geoecology), ul. Naberezhnaya 29, Orenburg, 460014 Russia

²Orenburg State University, pr. Pobedy 13, Orenburg, 460018 Russia

[#]E-mail: n_mu@mail.ru

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

The geodynamic situation is analyzed in the area of the eastern Orenburg region for 2006-2022. The number of recorded seismic events averages 742 events per /year. The impact of mining works on the increase of technogenic seismicity is considered. It is established that most of seismic events occur in the territories near the developed mineral deposits. The technogenic earthquakes with a magnitude $M_I > 3.0$ were analyzed. The reasons of intensifying technogenic-tectonic seismicity are revealed. The specific features of strong ($M_I \geq 3.0$) technogenic-tectonic earthquakes under the dynamic effects of blasting operations upon mining are described. The time dependence between the explosions carried out at industrial sites and the recorded seismic events (correlation coefficient 0.89) is found. The types of technogenic seismicity, static and dynamic, are considered. Recurrent dynamic impacts of blasting operations can trigger the stress state discharge in tectonic structures. Geodynamic events with magnitude $M_I \geq 4.0$ exert the most

hazardous impact on industrial and civil buildings and structures; they also affect the environmental situation in the region and the population safety. The zoning of territory was carried out, and two separate areas were distinguished with an elevated number of recorded seismic events with a magnitude of $M_l > 3.0$, i.e., Adamovsky and Yasnensky districts.

Keywords: *geodynamics, technogenic-tectonic seismicity, technogenic earthquakes, Orenburg region*

REFERENCES

1. Abenov, A.M. Myngzhasarov, B., Kyrgyzbaeva, G.M., Nurpeisova, M.B. [Monitoring deformations of the Earth's surface using satellite systems and processing of its results]. *Molodoi uchenyi*, 2022, no. 18 (413), pp. 102-106. (in Russian)
2. Adushkin, V.V. [The impact of blasting operations on the occurrence of catastrophic techno-genic-tectonic earthquakes in Kuzbass]. In: [Trigger effects in geosystems. Proc. V-th Intern. Conf.]. 2019. pp. 203-218. (in Russian)
3. Emanov, A.F., Emanov, A.A., Fateev, A.V. [Bachatskoe technogenic earthquake on June 18, 2013 with $M_l = 6.1$, $I_0 = 7$ (Kuzbass)]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal*, 2020, pp. 48-61. (in Russian)
4. Kazakhstan National Data Center. [Electronic resource]. URL: <https://www.kndc.kz> (accessed 02.02.2023)
5. Kozyrev, A.A., Kagan, M. M., Konstantinov, K.N., Zhirov, D.V. [Deformation precursors of a technogenic earthquake at the united Kirov mine of JSC Apatit]. In: [Geodynamics and the stress state of the Earth's interior. Proc. All-Russian conference dedicated to the 80th anniversary of academician M.V. Kurlenya, October 3-6, 2011], Novosibirsk, IGD SB RAS, 2011, pp. 228-234. (in Russian)
6. Kozyrev, A.A., Lovchikov, A.V., Kuz'min, I.A. [The strongest technogenic earthquake at Russian mines, August 17, 1999, Umbozero mine (Kola Peninsula)]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, 2000, no. 6, pp. 169-173 (in Russian)
7. Meshcheryakov, Yu.A. [Map of modern vertical movements of the Earth's crust in Eastern Europe. Scale: 1 : 10000000]. International Geodetic and Geophysical Union. International Association of Geodesy. Commission on Modern Movements of the Earth's Crust. The Subcommittee on the Map of Eastern Europe. The Main Directorate of Geodesy and Cartography. 1971. pp. 68-73. (in Russian)
8. Nesterneko, M.Yu, Aleshin, I.M., Goev, A.G. et al. [Oernburg regional network "Neftegaz-seismika"]. *Seismicheskie pribory*, 2023, vol. 59, no. 2, pp. 5-17. <https://doi.org/10.21455/si2023.2-1>. (in Russian)
9. Nesterneko, M.Yu, Kapustina, O.A. [Assessment of the representativeness of the catalog of seismic events in the Orenburg region]. *Problemy nedropol'zovaniya*, 2019, issue 2, pp. 52-55. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2019.02.052> (in Russian)
10. Tomilin, N.G., Voinov, K.A., Selivonik, V.G., Glotov, S.V. [Technogenic earthquake as a result of mine field instability]. In: [Geodynamics and the stress state of the Earth's interior. Proc. All-Russian conference dedicated to the 80th anniversary of academician M.V. Kurlenya, October 3-6, 2011]. Novosibirsk, IGD SB RAS, 2011, pp. 68-73. (in Russian)
11. Ulomov, V.I., Bogdanov, M.I. [A set of maps of the general seismic zoning of the Russian Federation OSR-2016. Scale: 1:8000000]. 2016. (in Russian)
12. [Uchaly human-induced earthquake, September 5, 2012]. *Zemletryaseniya Severnoi Evrazii*, issue 21, 2018, pp. 387-391. (in Russian)
13. Shebalin, P.N., Gvishiani, A.D., Dzeboev, B.A., Skorkina, A.A. [Why are new approaches to seismic hazard assessment necessary?]. *Doklady Rossiiskoi Akademii nauk, nauki o Zemle*. 2022, vol. 507, no. 1, pp. 91-97. (in Russian)

МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ И ГИДРОГЕОЛОГИИ

УДК 551.4+551.5:519.21

ВЛИЯНИЕ СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ РЕЧНЫХ ПОЙМ В КРИОЛИТОЗОНЕ

© 2024 г. М. В. Архипова^{1,*}, Д. Ю. Гущина^{2,**}, О. Н. Трапезникова^{1,***}

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

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы 1, Москва, 119234 Россия

*E-mail: masha-a@yandex.ru

**E-mail: dasha155@mail.ru

***E-mail: ontolga@gmail.com

Поступила в реакцию 04.04.2024 г.

После доработки 22.04.2024 г.

Принята к публикации 01.06.2024 г.

Настоящая работа представляет собой попытку оценки влияния современных климатических изменений на развитие в криолитозоне морфологической структуры речных пойм со свободным меандрированием на основе моделирования методами математической морфологии ландшафта. Исследование проведено на участках пойм, для которых имелись два срока съемки с достаточно большим интервалом между ними (около 50 лет). Поймы рек — динамичные территории со сложным “лоскутным” строением, находящиеся в состоянии динамического равновесия. В качестве характеристики изменения климатических условий рассчитаны тренды аномалий приземной температуры воздуха за период 1956–2019 гг. Для всех участков проверена математическая модель морфологической структуры ландшафта аллювиальной равнины. Анализ показал соответствие эмпирических данных теоретическим, что позволяет выбрать параметры модели для оценки изменения характера морфологической структуры под воздействием климатических изменений. Выдвинуто предположение, что климатические изменения могут приводить к изменению характеристик соответствующего распределения переменных, участвующих в модели, из-за нарушения динамического равновесия, что было проверено с использованием критерия Смирнова для двух независимых выборок. Выполнена оценка корреляции между температурными трендами и изменениями параметров модели. Показано, что влияние современных температурных изменений на развитие морфологической структуры речных пойм за последние 40–50 лет проявляется в изменении параметров распределений формирующихся пойменных сегментов, но существенно не меняет в целом статистические распределения в математической модели морфологической структуры аллювиальной равнины (поймы).

Ключевые слова: математическая модель, морфологическая структура, приземная температура, критерий Смирнова, пойменный сегмент, стрела сегмента, космические снимки, флювиальные процессы

DOI: 10.31857/S0869780924040042 EDN: SFUCJY

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдающееся с середины XX в. изменение климата, несомненно, оказывает влияние на особенности динамики природных процессов, включая флювиальные. Как известно, флювиальные процессы отличаются повышенной изменчивостью. Особенности динамики этих процессов с учетом влияния изменения климата всегда были в центре внимания и дискуссий исследователей. Достаточно подробно изучены как современные флювиальные процессы [10, 13, 16, 18, 21, 24], так и их палеодинамика, связанная

с межледниково-ледниковыми климатическими циклами [9, 22]. По мнению А.В. Панина с соавторами [9], голоценовая динамика пойменного рельефообразования в северной части Евразии за пределами валдайского оледенения связана с гидроклиматическими и температурными колебаниями, когда периодом похолодания соответствовал рост стока и флювиальной активности, а периодом относительного потепления — снижение стока и падение флювиальной активности. Много работ посвящено оценке изменений речного стока, в частности, рек высоких широт РФ за последние 50–60 лет, и их связи

с климатическими изменениями [1, 7, 23]. Обзор публикаций последних лет вкупе с собственными исследованиями по оценке изменений водного режима рек России представил коллектив исследователей во главе с Н.Д. Фроловой [12]. Эти работы свидетельствуют о том, что в целом по России в последние десятилетия произошли значимые изменения годовых и максимальных расходов рек. Сильнее всего увеличились расходы рек на восточном склоне Урала, Обь-Иртышском междуречье и на востоке Евразии от Восточной Сибири до Колымы (10—50%). Напротив, северная часть Западно-Сибирской равнины, бассейны Ангары и Енисея характеризуются более или менее стабильными показателями расходов в реках ($\pm 10\%$). Снижение расходов в высоких широтах отмечено только на Чукотке, северном побережье Охотского моря и Камчатке.

Однако непосредственно влияние современных климатических изменений, происходивших в течение последних 50 лет [15], на пойменное рельефообразование пока анализировалось мало. Кроме того, большинство таких исследований носит качественный, а не количественный характер.

Целью настоящей работы является попытка оценить влияние современных климатических изменений на развитие речных пойм в криолитозоне на основе методов математической морфологии ландшафта [5].

Для выполнения поставленной цели были решены следующие задачи:

- проверка применимости математической модели морфологической структуры пойменных равнин (см. [4]) для рек криолитозоны;
- сбор и анализ данных по изменению климатических параметров (трендов аномалий температур) для выявления его влияния на формирование рельефа пойм;
- проверка влияния климатических изменений на морфологическую структуру пойм рек криолитозоны на основании результатов, полученных при решении первых двух задач.

В исследовании анализировались поймы рек со свободным меандрированием, чей рельеф сформирован флювиальными процессами на разных стадиях развития, поэтому они представляют собой динамичные территории со сложным “локутным” строением. Такие ландшафты (равнины в геоморфологическом отношении) широко распространены в большинстве природно-климатических зон в качестве интразональных. В нашем исследовании рассматриваются современные поймы рек со свободными излучинами, расположенные в криолитозоне, — территории, особо чувствительной к климатическим изменениям.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование опирается на математическую модель морфологической структуры ландшафта аллювиальной равнины [3]. Модель позволяет работать с количественными характеристиками ландшафтного рисунка аллювиальных равнин, к которым относятся и современные поймы рек. Эти характеристики достаточно просто получить, используя данные дистанционного зондирования. Модель прошла эмпирическую проверку на ряде участков рек (см. работы [2, 4]). Аналогов моделей, анализирующих ландшафтные рисунки, возникающие в результате меандрирования рек немного. В основном при моделировании внимание уделяется геометрии речных русел и форм меандр. Из наиболее интересных можно назвать работы [16, 17, 21, 25].

Данная модель описывает ландшафтный рисунок современной аллювиальной равнины (поймы), сформированной свободно меандрирующими излучинами, который в основном состоит из повышений (грив) и понижений между ними, имеющих форму дуг, согласованных друг с другом. Они возникают в процессе развития излучины, который представляет собой постепенное изгибание, завершающееся спрямлением излучины. Такой этап развития излучины, включающий интервал времени от спрямления до спрямления, в рамках настоящей статьи называется циклом развития излучины. Назовем совокупность грив и межгривных понижений, генерирующихся за один цикл развития излучины, пойменным сегментом. Сегменты, сгенерированные в разное время, без видимого порядка и с угловым несогласием прилегают друг к другу, порой “съедая” части друг друга, при этом могут сохраняться фрагменты сегментов. Пойменные сегменты образуют ландшафтный рисунок этого типа пойм. Пойменный сегмент, непосредственно опирающийся на русло, является самым молодым сегментом, сформировавшимся в результате последнего цикла формирования излучины, поэтому этот сегмент не мог подвергнуться стиранию в отличие от предшествующих. Таким образом, в пределах аллювиальной равнины наблюдается набор разновозрастных, разнесенных во времени фрагментов пойменных сегментов (рис. 1).

Для анализа развития пойменных сегментов взята одна из определяющих морфологических характеристик рассматриваемого ландшафта — распределение размера (длины стрелы) сегмента. Стрелой сегмента по аналогии со стрелкой дуги называется размер сегмента в направлении, перпендикулярном хорде основания.

Охарактеризованная выше сложная морфологическая и возрастная дифференциация речных пойм может быть описана с помощью математической модели морфологической структуры аллювиальных равнин [3—5]. Модель использует следующие допущения:

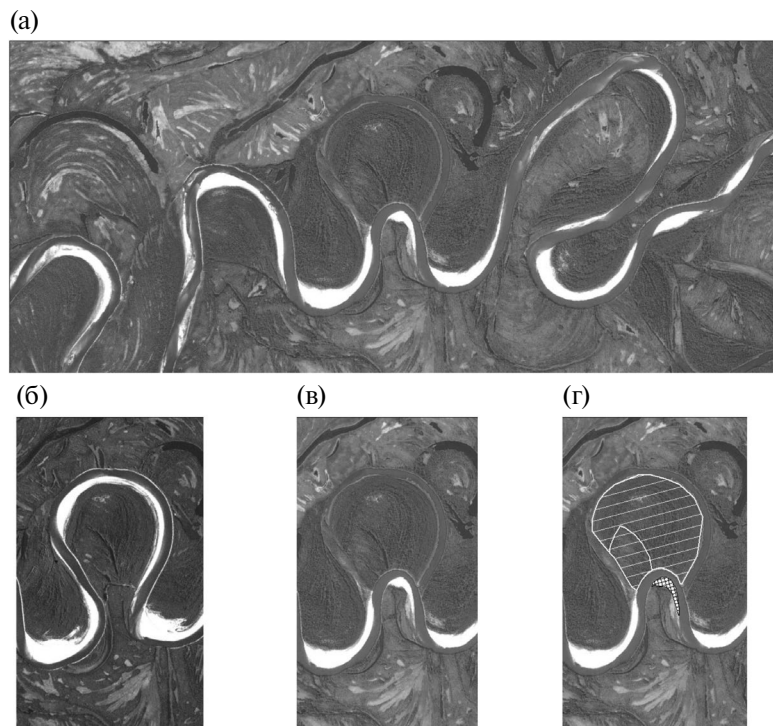


Рис. 1. Типичное изображение речной поймы на материалах космической съемки: а — участок р. Хейгияха, б — пойменная излучина космическом снимке 1964 г., в — эта же излучина на снимке 2017 г. (произошло спрямление излучины), г — сегменты в пределах излучины (молодые сегменты показаны решетчатой штриховкой, старые — наклонной штриховкой).

— спрямления излучин происходят независимо друг от друга;

— вероятность k спрямлений за интервал времени Δt (p_k) зависит только от величины интервала времени¹;

$$p_1 = \mu \Delta t + o(\Delta t), \quad (1)$$

$$p_k = o(\Delta t) \quad k \geq 2, \quad (2)$$

где μ — среднее число спрямлений излучин за единицу времени;

— стрела излучины растет равномерно во времени.

Последнее допущение является линейным приближением реальной зависимости роста стрелы излучины со временем, данные о которой в литературе весьма ограничены [8]; оно представляется более точным прежде всего для широко распространенных сегментных излучин.

Анализ модели позволил показать [4, 6], что здесь устанавливается состояние динамического равновесия. Показано, что в условиях динамического равновесия в любой момент времени распределение длин стрел сегментов отвечает экспоненциальному распределению

$$F_\varepsilon(x) = 1 - e^{-\lambda x}, \quad (3)$$

¹ При этом для малых временных интервалов вероятность одного спрямления много больше вероятности развития нескольких спрямлений.

где λ — параметр (в нашем случае величина обратная средней длине стрелы на участке исследования), тоже относится и к распределению длин стрел молодых сегментов.

В задачу исследования входила проверка соответствия модели данным, полученным по материалам дистанционного зондирования, и анализ связи изменений параметров модели между двумя сроками съемки с климатическими изменениями.

Исследование было проведено на участках пойм, для которых имелись два срока съемки с достаточно большим (в идеале около 50 лет) интервалом между ними. Были использованы следующие материалы космической съемки:

— архивные снимки Corona (3–7 м/пикс, 1964–1980 гг.) для срока наблюдения 1;

— современные высокдетальные снимки 0.5–0.7 м/пикс (Pleiades, Worldview 2, 2011–2018) для срока наблюдения 2.

Для данного исследования выбраны участки, расположенные на севере Восточно-Европейской равнины (2 участка), на Западно-Сибирской низменности (3 участка), в бассейне р. Лена (3 участка), в Восточной Сибири (2 участка), на Камчатке (1 участок) (рис. 2). Таким образом, они представляют различные регионы криолитозоны. Участки захватывают поймы и вытянуты вдоль течения рек, длина участков колеблется от 10 до 30 км. Основным требованием к выделению участка была

его морфологическая однородность (включая отсутствие крупных притоков).

В работе в качестве характеристики климатических изменений используются тренды аномалий приземной температуры воздуха (на высоте 2 м — стандартный уровень измерений температуры воздуха на метеорологических станциях) за период 40–50 лет (длина периода определялась интервалом времени между используемыми спутниковыми снимками). Для расчета температурных трендов использованы данные Web-приложения Climate at a Glance (Климат с первого взгляда) NOAA — Национального центра информации по окружающей среде [20].

Аномалии температуры воздуха рассчитывались путем вычитания из данных о температуре воздуха за каждый текущий месяц значения за соответствующий месяц, осредненного по периоду 1981–2010 гг. (референтный период, используемый во многих современных климатических исследованиях). Затем были рассчитаны тренды (в °C за десятилетие) аномалий температуры воздуха за период 1956–2018 гг., охватывающий максимальный интервал между двумя исследуемыми сроками. Поскольку использованные реанализы представляют собой продукт интерполяции станционных наблюдений на градусную сетку, для оценки возможных отклонений данных реанализа от наблюдений было проведено сравнение рассчитанных по ним трендов аномалий температуры и данных наблюдений на метеостанциях из архива Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации, мирового центра

данных — ВНИИГМИ-МЦД (<http://meteo.ru/data>). Результаты сравнения показали, что знаки температурных трендов на всех участках и для всех месяцев года для станционных данных и реанализа совпадают. Величина отклонения при этом не превышает 20%.

В работе [9] установлено, что современный рисунок пойм может быть сформирован сегментами разного возраста, морфологические характеристики которых связаны с климатическими условиями в период их формирования. Поскольку данные по климатическим изменениям существуют за последние 50 лет, то исследование было сфокусировано на современных проявлениях флювиального процесса.

В исследовании сделана попытка выявить как климатические изменения могут отразиться на характере меандрирования рек, и, следовательно, на характеристиках излучин (в данном случае на изменении свойств выборок длин стрел пойменных сегментов) для чего были проверены следующие предположения:

1. Изменения климата оказывают столь сильное воздействие на речные поймы, что нарушается состояние динамического равновесия. В этом случае распределение длин стрел в молодых сегментах не должно отвечать экспоненциальному распределению.

2. Происходящие климатические изменения могут приводить к изменению характера соответствующего распределения параметров модели из-за нарушения динамического равновесия, в результате чего длины стрел в разные сроки будут



Рис. 2. Расположение ключевых участков речных пойм.

характеризоваться различными распределениями пусть и одного вида, но с разными значениями параметров.

В связи с изложенным было проведено сравнение выборок двух сроков, относящихся к одному участку, на предмет наличия статистически значимых различий с использованием критерия Смирнова для двух независимых выборок [11]. Сравнение было проведено как для стрел *всех пойменных сегментов*, так и отдельно только для *молодых стрел* на каждом ключевом участке.

Проведена оценка тесноты связи между климатическими изменениями и изменениями морфологической структуры ключевых участков пойм на основе корреляции между температурными трендами и изменениями параметров модели между сроком наблюдения 1 и сроком наблюдения 2. Для расчета корреляции использованы следующие параметры:

- тренды аномалий приземной температуры воздуха и изменения параметра модели (λ) [2],
- изменение средней длины стрелы ($\bar{l}$) для каждого участка.

Эти величины были выбраны, исходя из их роли в математической модели морфологической структуры аллювиальных равнин. Поскольку предполагается, что климатические изменения влияют на интенсивность флювиальных процессов, что может приводить как к уменьшению $\bar{l}$, так и к ее увеличению, то также были рассчитаны корреляции трендов температурных аномалий с изменениями параметров модели, взятых по модулю. Проведена оценка значимости полученных результатов с использованием критерия Стьюдента.

При расчете корреляции было принято во внимание, что, хотя подбирались реки близкие по морфологическому строению, они все же различаются по водности и другим параметрам.

Чтобы учесть это обстоятельство, было произведено нормирование исследуемых параметров, с использованием средней длины стрел. За единицу выбрана средняя длина стрел, полученная со снимков Согопа (первый срок наблюдений). Изменение средних длин стрел вычислялось, как доля от средней по первому сроку (рис. 3).

$$\Delta \bar{l} = \frac{(\bar{l}_{\text{срок2}} - \bar{l}_{\text{срок1}})}{\bar{l}_{\text{срок1}}}, \quad (4)$$

где $\bar{l}_{\text{срок1}}$ – средняя длина стрелы на сроке 1, а $\bar{l}_{\text{срок2}}$ – средняя длина стрелы на сроке 2.

Аналогично проведено нормирование изменения параметра λ ($\Delta \lambda$)

$$\Delta \lambda = \frac{(\lambda_{\text{срок2}} - \lambda_{\text{срок1}})}{\lambda_{\text{срок1}}}, \quad (5)$$

где λ – параметр, обратный среднему значению длин стрел.

Поскольку тренд температурных аномалий рассчитывался по скользящему десятилетнему периоду, то нормированное изменение средних длин стрел и изменение значения λ между сроками также было рассчитано по десятилетним периодам в предположении, что в первом приближении имеет место линейная зависимость между временем и изменениями длин стрел сегментов и λ (рис. 4).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что используемая математическая модель морфологической структуры ландшафта аллювиальной равнины [3–5] верна для выбранных участков. Так, распределение длин стрел молодых сегментов за оба срока, согласно критерию Пирсона, отвечает экспоненциальному распределению со сдвигом, как это следует из данной модели (табл. 1). Распределения длин стрел всех сегментов за оба срока были исследованы ранее и было показано,

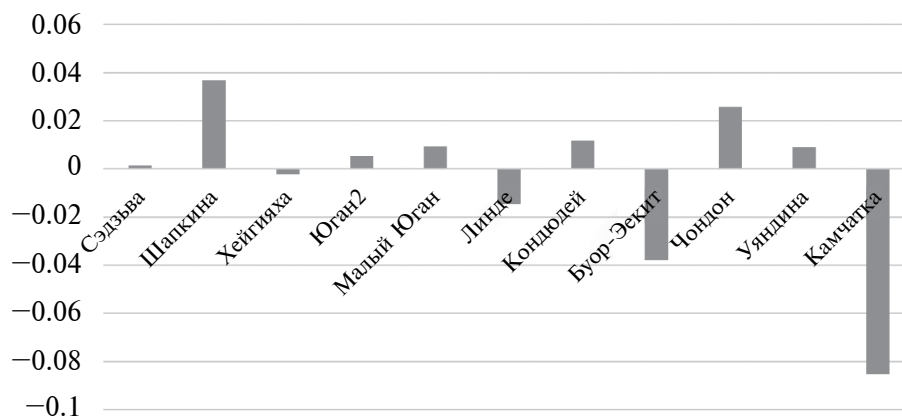


Рис. 3. Нормированное изменение средних длин стрел $\Delta \bar{l}$ формирующихся сегментов (реки ранжированы по местоположению участка с запада на восток).

что они также отвечают экспоненциальному распределению со сдвигом [26]. Использование **экспоненциальных распределений со сдвигом** обусловлено тем, что при дешифрировании снимков могут быть выделены фрагменты сегментов, состоящие как минимум из двух гив и одного межгивного понижения, а состоящие из одной гивы не выделяются.

Анализ рассчитанных для исследуемых участков трендов аномалий приземной температуры показал их неоднородность, как по временам года, так и по географической привязке при устойчивом увеличении приземной температуры в целом за исследованный период (табл. 2). Так, максимальные положительные тренды наблюдаются в переходные сезоны (весна и осень), минимальные положительные тренды в летний период.

Однако существуют различия в зависимости от географической локализации точек и от месяца года. В основном, максимальный тренд аномалий

температуры отмечается весной и достигает $0.88^{\circ}\text{C}/10$ лет в Средней и Восточной Сибири. В Западной Сибири максимальный тренд наблюдается в марте-апреле. На участках в Восточной Сибири максимальный тренд отмечается в апреле и ноябре. В Коми тренд относительно небольшой по сравнению с участками в Сибири, его максимум $0.41^{\circ}\text{C}/10$ лет приходится на апрель. В Сибири менее всего изменились летние температуры, тогда как в Коми, напротив, зимние. Меньше всего выражены тренды температурных аномалий на Камчатке. Вероятнее всего максимальные весенние тренды температуры связаны с более ранними сроками начала таяния и схода снежного покрова, но при этом имеет место положительная обратная связь температура-альbedo-снежный покров: общее потепление приводит к более раннему таянию снега, что уменьшает альbedo поверхности (даже при отсутствии схода снежного покрова, подтаявший снег имеет меньшее альbedo по сравнению со

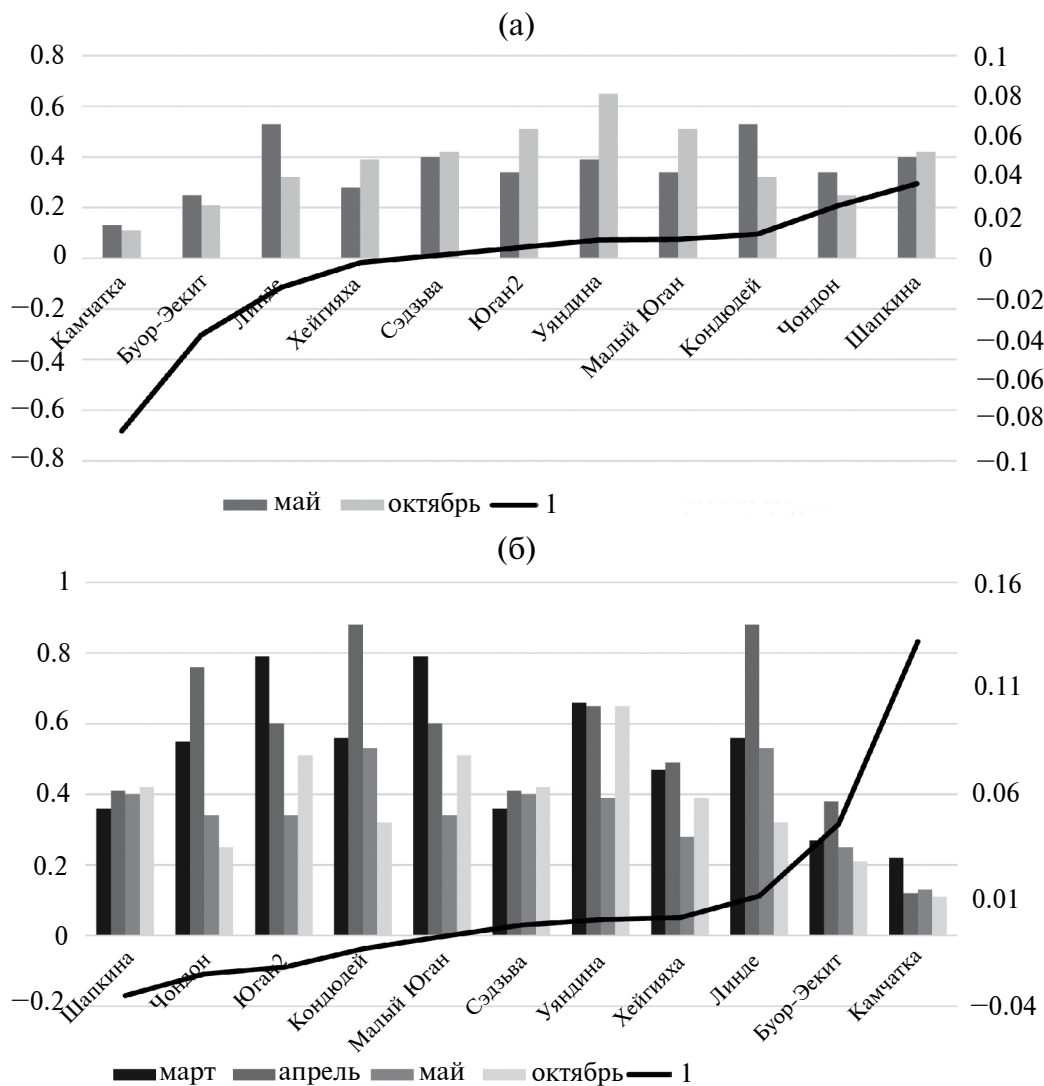


Рис. 4. Изменение средних длин стрел ($\Delta \bar{l}$) (а) и $\Delta \lambda$ (б) формирующихся сегментов в сравнении с величинами трендов аномалий температуры (1). На левой оси показаны изменения аномалий температуры в $^{\circ}\text{C}/10$ лет, по правой — изменения средних длин стрел (Δl) (м) и параметра $\Delta \lambda$ (1/м).

Таблица 1. Соответствие эмпирических распределений длин стрел пойменных сегментов экспоненциальному распределению со сдвигом

Местоположение, пойма реки	Год съемки	Объем выборки	Сдвиг	Параметр λ	хи-квадрат	хи-квадрат (0.95)
Шапкина	1976	53	25	0.004645	1.899	7.815
	2017	53	25	0.003961	7.506	7.815
Сэдьзва	1976	53	21	0.006619	1.188	9.488
	2017	50	21	0.006571	4.86743	9.488
Хейгияха	2017	56	32	0.003123	5.760	9.488
	1964	56	31	0.003153	4.160	9.488
Юган	2012	52	27	0.004163	0.606	7.815
	1970	51	43	0.004579	1.816	7.815
Малый Юган	2012	61	17	0.005762	0.856	5.99
	1970	57	13	0.00594	4.544	11.07
Буор-Эекит	2018	55	47	0.002343	5.430	5.99
	1968	60	34	0.004938	2.010	7.815
Линде	2017	55	27	0.003436	5.37	9.488
	1980	55	32	0.003289	8.186	9.488
Кондюдей	2017	68	19	0.006955	1.110	9.488
	1980	68	19	0.007304	0.617	9.488
Уяндина	2018	53	74	0.002383	1.101	5.99
	1975	56	54	0.002374	5.214	5.99
Чондон	1965	57	18	0.00568	1.793	9.488
	2018	52	18	0.004934	4.072	11.07
Камчатка	2017	58	22	0.005626	1.807	5.99
	1975	57	35	0.003619	4.322	9.488

свежевыпавшим), это увеличивает радиационный баланс поверхности Земли, что, в свою очередь, приводит к дальнейшему росту температуры.

Как уже было сказано выше, проверялось предположение, что климатические изменения могут отразиться в изменении свойств выборок длин стрел сегментов. Однако проверка различий между двумя выборками за 1964–1980 и 2011–2019 гг. для каждого ключевого участка не выявила статистически значимых различий (по критерию Смирнова) как в характеристиках всех сегментов, так и в характеристиках формирующихся сегментов (длинах молодых стрел) (табл. 3). Подчеркнем, что проверка с использованием указанного критерия не связана с гипотезой о том, какому теоретическому закону подчиняется данное распределение. Это означает, что на настоящий момент влияние климатических изменений на русловые процессы не настолько существенно, чтобы поменять параметры распределения так сильно, чтобы

речь шла уже о двух выборках, принадлежащих к различным генеральным совокупностям.

Анализ полученных результатов (табл. 4) показал, что большинство полученных значений коэффициента корреляции оказываются **незначимыми** (на уровне 0.05) по критерию Стьюдента. В наибольшей степени это относится к выборкам по всем совокупностям стрел, где значимая (на уровне 0.05) отрицательная корреляция между $\Delta\lambda$ и трендами температур отмечается только в мае и январе. Отсутствие значимой корреляции и близкая к нулю корреляция в данном случае может быть объяснена тем, что вся совокупность сегментов в пределах участка формировалась задолго до возникновения современных климатических трендов.

Для выборок формирующихся сегментов (молодых) отмечается более тесная корреляция с трендами температур, а именно: значимая (на уровне 0.05) отрицательная корреляция между $\Delta\lambda$ и трендами температур апреля, мая и октября, а также

Таблица 2. Тренды аномалий приземной температуры

Месяц года	Местоположение участка								
	Коми	Западная Сибирь		Средняя Сибирь, бассейн р. Лены		Восточная Сибирь		Камчатка	
	Пойма реки								
	Шапкина, Сэдзъя	Хейгияха	Юган2, Малый Юган	Линде	Буор-Экит	Конюлей	Чондон	Уяндина	Камчатка
12	0.24	0.26	0.45	0.18	0.13	0.18	0.35	0.47	0.12
1	0.3	0.19	0.26	0.64	0.28	0.64	0.55	0.39	0.14
2	0.17	0.34	0.56*	0.23	0.02	0.23	0.06	0.21	0.19
3	0.36	0.47	0.79	0.56	0.27	0.56	0.55	0.66	0.22
4	0.41	0.49	0.6	0.88	0.38	0.88	0.76	0.65	0.12
5	0.4	0.28	0.34	0.53	0.25	0.53	0.34	0.39	0.13
6	0.4	0.43	0.42	0.27	0.36	0.27	0.17	0.17	0.15
7	0.27	0.09	0	0.16	0.56	0.16	0.31	0.32	0.21
8	0.2	0.09	0.08	0.16	0.26	0.16	0.3	0.37	0.18
9	0.29	0.15	0.02	0.12	0.09	0.12	0.16	0.31	0.16
10	0.42	0.39	0.51	0.32	0.21	0.32	0.25	0.65	0.11
11	0.24	0.29	0.35	0.48	0.33	0.48	0.68	0.88	0.2
Зима	0.22	0.26	0.42	0.37	0.15	0.37	0.35	0.39	0.16
Весна	0.4	0.41	0.59	0.64	0.29	0.64	0.59	0.54	0.16
Лето	0.3	0.20	0.18	0.18	0.41	0.18	0.26	0.29	0.19
Осень	0.3	0.28	0.29	0.33	0.23	0.33	0.41	0.61	0.17

*Жирным шрифтом выделены значимые тренды температур.

значимая положительная корреляция между $\Delta\bar{l}$ и трендами температур мая и октября.

Было сделано допущение, что об интенсивности флювиального процесса может свидетельствовать, не только намыв кос и, как следствие, увеличение размеров сегмента и его стрелы (в этом случае $\Delta\bar{l}$ будет иметь положительное значение), но и прорыв меандров и формирование новых сегментов (в этом случае $\Delta\bar{l}$ будет иметь отрицательное значение). Так как, и то, и другое события являются показателем интенсивных флювиальных процессов, была рассчитана корреляция для взятых по модулю $\Delta\bar{l}$ и $\Delta\lambda$ с трендами аномалий температуры. Отмечена значимая отрицательная корреляция $\Delta\bar{l}$ и трендов аномалий температуры в марте, апреле, мае и октябре и значимая отрицательная корреляции $\Delta\lambda$ и трендов аномалий температуры в апреле, мае и октябре. Корреляция трендов аномалий температуры с абсолютными значениями изменений как параметра λ , так и изменений

средних длин стрел $\Delta\bar{l}$ выражена сильнее, чем при учете знака параметров. Причем в случае абсолютных значений коэффициент корреляции оказался отрицательным не только для $\Delta\lambda$, но и для изменений средних длин стрел $\Delta\bar{l}$.

Если рассматривать тренды аномалий температуры по сезонам (зима, весна, лето, осень), то отмечена значимая корреляция изменений параметров модели ($\Delta\lambda$, $\Delta\bar{l}$ молодых стрел) и трендов аномалий температуры в весенний период. Она характеризуется значениями от 0.78 до 0.70. Для параметров $\Delta\lambda$, $\Delta\bar{l}$ молодых стрел, взятых по модулю, также значимой является корреляция с трендами аномалий зимних температур (−0.62; −0.67).

Отсутствует значимая корреляция между изменениями любых параметров модели и трендами аномалий летних температур. Для трендов аномалий осенних температур значимая отрицательная

Таблица 3. Значение критерия Смирнова для двух независимых выборок для молодых сегментов*

Местоположение, пойма реки	Год	Объем выборки	Период, лет	Max Neg Differnc	Max Pos Differnc	p-value
Шапкина (Коми)	1976	53	41	−0.049	0.121	p > 0.10
	2017	53				
Сэдзьва (Коми)	1976	53	41	−0.074	0.081	p > 0.10
	2017	50				
Хейгияха (Западная Сибирь)	1964	56	53	−0.075	0.102	p > 0.10
	2017	56				
Юган (Западная Сибирь)	1970	51	42	−0.043	0.087	p > 0.10
	2012	52				
Малый Юган (Западная Сибирь)	1970	57	42	−0.021	0.075	p > 0.10
	2012	61				
Буор-Эекит (Средняя Сибирь)	1968	57	40	−0.119	0.056	p > 0.10
	2018	54				
Кондюдей (Средняя Сибирь)	1980	68	37	−0.070	0.053	p > 0.10
	2017	68				
Линде (Средняя Сибирь)	1980	55	37	−0.061	0.112	p > 0.10
	2017	55				
Чондон (Восточная Сибирь)	1965	57	53	−0.014	0.109	p > 0.10
	2018	52				
Уяндина (Восточная Сибирь)	1975	56	43	−0.014	0.109	p > 0.10
	2018	53				
Камчатка (Камчатка)	1975	57	42	−0.230	0.018	p > 0.10
	2017	58				

* Для статистически значимого различия двух выборок значение критерия Смирнова должно быть $p < 0.10$.

корреляция присутствует только с $|\Delta\lambda|$ для молодых стрел (0.63).

ВЫВОДЫ

По итогам исследования можно сделать следующие выводы.

Современное изменение климата, наиболее ярко проявляющееся в положительном тренде аномалий приземной температуры воздуха, отмечается в различных регионах высоких широт, при этом максимальные значения приходятся на переходные сезоны (прежде всего весну, меньше осень), а минимальные на летние месяцы. Максимальные значения трендов аномалий температуры отмечаются для ключевых участков, расположенных в Сибири, особенно Восточной Сибири, тогда как на участках в Коми и, особенно, на Камчатке, тренды аномалий температуры существенно меньше.

Использование математической модели как основы экспериментальных исследований позволяет решить проблему отбора количественных характеристик, выбранных для анализа. В частности, использованная модель показала, что выборки длин стрел пойменных сегментов могут служить индикаторами изменений.

Результаты экспериментального тестирования на ключевых участках криолитозоны показали, что все значимые изменения появляются только при сравнении выборок молодых формирующихся пойменных сегментов. Отсутствие каких-либо значимых изменений морфологической структуры при использовании выборок длин всех стрел сегментов подтверждает, что все выявленные изменения связаны именно с современными процессами.

В случае принципиальных изменений морфологической структуры пойм за период около 40 лет такие выборки, порознь соответствующие экспоненциальному распределению со сдвигом, должны

Таблица 4. Корреляция трендов температурных аномалий с параметрами модели*

Месяц года	$\Delta\lambda$ для всех стрел	$\Delta\lambda$ для молодых стрел	$\bar{\Delta}$ для молодых стрел	$\Delta\lambda$ по модулю для молодых стрел	$\bar{\Delta}$ по модулю для молодых стрел
12	0.26	−0.54	0.55	−0.49	−0.52
1	−0.67	−0.41	0.39	−0.44	−0.35
2	−0.02	−0.24	0.17	−0.20	−0.39
3	−0.15	−0.59	0.53	−0.60	−0.67
4	−0.55	−0.63	0.58	−0.67	−0.63
5	−0.67	−0.67	0.63	−0.71	−0.64
6	0.15	−0.43	0.32	−0.40	−0.47
7	0.19	0.23	−0.18	0.14	0.30
8	0.14	0.05	0.06	−0.03	0.13
9	0.10	−0.08	0.20	−0.16	−0.03
10	0.05	−0.63	0.62	−0.69	−0.71
11	−0.11	−0.31	0.36	−0.42	−0.33
Зима	−0.29	−0.59	0.54	−0.62	−0.67
Весна	−0.42	−0.75	0.70	−0.78	−0.78
Лето	0.44	−0.01	0.03	−0.12	0.01
Осень	−0.02	−0.48	0.54	−0.63	−0.55

* Значения коэффициентов корреляции, значимые на уровне 0.05 выделены жирным шрифтом и курсивом.

определяться как относящиеся к разным генеральным совокупностям согласно критерию Смирнова. Однако анализ показал, что изменения морфологической структуры пойм пока еще не значительны, поскольку выявленные различия не подтверждены по критерию Смирнова как статистически значимые.

Несмотря на то, что на настоящий момент не отмечено формирование новой совокупности стрел под влиянием климатических изменений, современные температурные тренды значимо коррелируют с изменением параметров рассматриваемой модели, в особенности с параметром λ для молодых стрел.

Наиболее тесная корреляция, достигающая 78% (положительная для изменений средней длины стрел формирующихся сегментов и отрицательная для остальных проверяемых параметров), отмечается в весенние месяцы.

Для величины $|\Delta\lambda|$ молодых стрел отмечают значимая тесная отрицательная корреляция с трендами температурных аномалий в осенние месяцы и с изменениями параметров модели, взятых по модулю, для зимних месяцев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеевский Н.И., Магрицкий Д.В., Михайлов В.Н. Антропогенные и естественные изменения гидрологических ограничений для природопользования в дельтах рек Российской Арктики // Вод. хоз-во России. 2015. № 1. С. 14–31.
2. Викторов А.С. Динамическое равновесие в морфологической структуре ландшафтов // Вопросы географии. № 138. Горизонты ландшафтоведения. 2014. С. 123–137.
3. Викторов А.С. Математическая морфология ландшафта. М.: Тратек, 1998. 191 с.
4. Викторов А.С. Модель возрастной дифференциации аллювиальных равнин // Геоэкология. 2007. №4. С. 302–309.
5. Викторов А.С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.
6. Викторов А.С., Капранова В.Н., Орлов Т.В., Трапезникова О.Н. и др. Математическая морфология ландшафтов криолитозоны. М.: РУДН, 2016. 232 с.
7. Георгиевский В.Ю., Грек Е.А., Грек Е.Н. и др. Оценка современных изменений максимального стока рек России // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 46–55.
8. Маккавеев Н.И., Чалов Р.С. Русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1986. 263 с.
9. Панин А., Сидорчук А., Чернов А. Основные этапы формирования пойм равнинных рек Северной Евразии // Геоморфология. 2011. № 3. С. 20–31.
10. Попов И.В. Методологические основы гидроморфологической теории руслового процесса. Избранные труды. СПб.: Нестор-История, 2012. 304 с.
11. Смирнов Н.В. Оценка расхождения между эмпирическими кривыми распределения в двух независимых выборках // Бюллетень МГУ, сер. А. 1939. Т. 2. №2. С. 3–14.
12. Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю. и др. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор

- публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. Т. 49. №3. С. 251–269.
<https://doi.org/10.31857/S032105962203004X>.
13. Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во МГУ, 1979. 232 с.
 14. Boyin Huang, Peter W. Thorne, Viva F. Banzon et al. NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST), Version 5. [indicate subset used]. NOAA National Centers for Environmental Information. 2017. <https://doi.org/10.7289/V5T72FNM>
 15. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report.
 16. Jount R.W. The patterns of some meandering valleys in New South Wales // Austral. Geogr. 1970. 11. No 3. P. 269–277.
 17. Kasvi E., Vaaja M., Kaartinen H., Kukko A. et al. Sub-bend scale flow–sediment interaction of meander bends — A combined approach of field observations, close-range remote sensing and computational modelling // Geomorphology. 2015. V. 238. P.119–134. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.01.039>
 18. Lotsari E., Hackney C., Salmela J., Kasvi E. et al. Sub-arctic river bank dynamics and driving processes during the open-channel flow period // Earth Surface Processes and Landforms. 2019. <https://doi.org/10.1002/esp.4796>. Peschke, 1973
 19. Menne M.J., Williams, C.N., Gleason, B.E. et al. The Global Historical Climatology Network Monthly Temperature Dataset, Ver. 4 // Journal of Climate. 2022. 31(24): 9835–9854. <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/31/24/jcli-d-18-0094.1.xml>
 20. NOAA National Centers for Environmental information. Climate at a Glance: Global Time Series, publ. July 2016. [Electronic resource]. <http://www.ncdc.noaa.gov/cag/time-series/>.
 21. Peschke G. Zur Anwendbarkeit statistischer Modelle für die Untersuchung des Maanderproblems // Acta Hydrophys. 1973. 17. No 2–3. P. 235–247.
 22. Rotnicki K. Retrodiction of palaeodischarges of meandering and sinuous rivers and its palaeoclimatic implications // Temperate Palaeohydrology. Chichester, Wiley. 1991. P. 431–470.
 23. Shiklomanov A.I., Lammers R.B. Changing discharge patterns of high-latitude rivers // Climate Vulnerability: Understanding and Addressing Threats to Essential Resources. Elsevier. 2013. P. 161–175.
 24. Sylvester Z., Durkin P., Covault J.A. High curvatures drive river meandering // Geology. 2019. 47 (3). P. 263–266. <https://doi.org/10.1130/G45608.1>
 25. Sylvester Z., Durkin P.R., Hubbard S.M., Mohrig D. Autogenic translation and counter point bar deposition in meandering rivers // GSA Bulletin. 2021. 133(11–12):2439–2456. <https://doi.org/10.1130/B35829.1>
 26. Victorov A., Archipova M., Trapeznikova O. Dynamic balance of the landscape morphological pattern of alluvial plains: the quantitative aspect // Proc. of the 20th Int. Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM-2020, 18–24 August, 2020. V. 20, book 2.2. P. 207–214. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/2.2/s10.025>

THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON MORPHOLOGICAL PATTERNS OF RIVER FLOODPLAINS IN CRYOLITHOZONE

M. V. Arkhipova^{1, #}, D. Yu. Gushchina^{2, ##}, O. N. Trapeznikova^{1, ###}

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

²Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory 1, Moscow, 119234 Russia

[#]E-mail: masha-a@yandex.ru

^{##}E-mail: dasha155@mail.ru

^{###}E-mail: ontolga@gmail.com

Fluvial processes are highly variable and their dynamics under the influence of modern climate change are of both scientific and practical interest. The present work is an attempt to assess the impact of the modern climate change on the morphological pattern development in cryolithozone flood plains using modelling based on the methods of mathematical morphology of landscapes. The flood plains are territories of free channel meandering with topography formed by fluvial processes at different stages of development; so they represent a complex “patchwork” landscape morphological pattern occurring in the dynamic balance state. Our research involves fragments of the flood plains, for which there were two survey dates with a fairly large interval between them (about 50 years). As a climate change characteristic, the trends of surface air temperature anomalies for the same period (1956–2019) were calculated. An analysis of the calculated trends in surface temperature anomalies showed their heterogeneity both by seasons and by location, with a steady increase in surface temperature in general over the studied period. For all key sites, the mathematical model of the landscape morphological pattern of alluvial plains was tested. The analysis shows the correspondence of empirical data to theoretical ones, which allows us to obtain the model parameters to assess the change in the morphological pattern under the influence of climate change. It was suggested that climate change may lead to a change of the parameters of the corresponding distribution for the model variables due to the violation of dynamic balance. This statement was tested using the Smirnov test for two independent samples. The study of the relationship between distribution parameters and temperature trends includes assessing the correlation between them. Our analysis showed that the influence of modern temperature changes on the development of the morphological pattern of the flood plains over the past 40–50 years is manifested in a change of the distribution parameters for the forming flood plain segments, but it is not significant enough to change greatly the statistical distributions in the mathematical model of the morphological pattern of floodplains in general.

Keywords: mathematical model of morphological pattern, surface temperature anomaly, Smirnov criterion, flood plain segment, segment arrow, highly detailed space images, fluvial processes

REFERENCES

- Alekseevskii, N.I., Magritskii, D.V., Mikhailov, V.N. [Anthropogenic and natural changes in hydrological restrictions for nature management in the river deltas of the Russian Arctic]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii*, 2015, no 1, pp. 14–31. (in Russian)
- Victorov, A.S. [Dynamic balance in the morphological pattern of landscapes]. *Voprosy geografii. Gorizonty landshaftovedeniya*, 2014, no 138, pp.123–137. (in Russian)
- Victorov, A.S. [Mathematical morphology of landscape]. Moscow, Tratek Publ., 1998, 191 p. (in Russian)
- Victorov, A.S. [Age differentiation model of alluvial plains]. *Geoekologiya*, 2007, no. 4, pp. 302–309. (in Russian)
- Victorov, A.S. [General problems of the mathematical morphology of landscapes] Moscow. Nauka Publ., 2006, 252 p. (in Russian)
- Victorov, A.S., Kapralova, V.N., Orlov, T.V., Trapeznikova, O.N., et al. [Mathematical morphology of permafrost landscapes]. Moscow, RUDN Publ., 2016, 232 p. (in Russian)
- Georgievskii, V.Yu., Grek, E.A., Grek, E.N. [Evaluation of modern changes in the maximum runoff of rivers in Russia]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2019, no. 11, pp. 46–55. (in Russian)
- Makkaveev, N.I., Chalov, R.S. [Channel processes]. Moscow, MGU Publ., 1986, 263 p. (in Russian)
- Panin, A., Sidorchuk, A., Chernov, A. [The main stages in the formation of plain river floodplains in the Northern Eurasia]. *Geomorfologiya*, 2011, no. 3, pp. 20–31. (in Russian)
- Popov, I.V. [Methodological foundations of the hydromorphological theory of the channel process. Selected works]. St. Petersburg. Nestor-Istoriya Publ., 2012, 304 p. (in Russian)
- Smirnov, N.V. [Estimation of discrepancy between empirical distribution curves in two independent samples]. *Byulleten' MGU. Seriya A*, 1939, vol. 2, no. 2, pp. 3–14. (in Russian)
- Frolova, N.L., Magritskii, D.V., Kireeva, M.B., Grigor'ev, V.Yu., Gelfan, A.N., Sazonov, A.A., Shevchenko, A.I. [River flow in Russia under ongoing and predicted climate changes: review of publications. 1. Assessment of changes in the water regime of Russian rivers based on observational data]. *Vodnye resursy*, 2022, vol. 49, no. 3, pp. 251–269. <https://doi.org/10.31857/S032105962203004X>. (in Russian)
- Chalov, R.S. [Geographical studies of channel processes]. Moscow, MGU Publ., 1979, 232 p. (in Russian)
- Boyin Huang, Peter W. Thorne, Viva F. Banzon, Tim Boyer, Gennady Chepurin, Jay H. Lawrimore, Matthew J. Menne, Thomas M. Smith, Russell S. Vose, and Huai-Min Zhang NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST), Version 5. [indicate subset used]. 2017, NOAA National Centers for Environmental Information. <https://doi.org/10.7289/V5T72FNM>
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report.
- Joung, R.W. The patterns of some meandering valleys in New South Wales. *Austral. Geogr.*, 1970, vol. 11, no 3, pp. 269–277.
- Kasvi, E., Vaaja, M., Kaartinen, H., Kukko, A., Jaakkola, A., Flener, C., Hyypä, H. Sub-bend scale flow–sediment interaction of meander bends—A combined approach of field observations, close-range remote sensing and computational modelling. *Geomorphology*, 2015, vol. 238, pp.119–134, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.01.039>
- Lotsari, E., Hackney, C., Salmela, J., Kasvi, E., Kemp, J., Alho, P., Darby, S.E. Sub-arctic river bank dynamics and driving processes during the open-channel flow period. *Earth surface processes and landforms*. 2019, 10.1002/esp.4796.Peschke, 1973
- Menne, M.J., Williams, C.N., Gleason, B.E., Rennie, J.J., Lawrimore, J.H. The global historical climatology network monthly temperature dataset, version 4, *Journal of Climate*, 2022, vol. 31(24), pp. 9835–9854. <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/31/24/jcli-d-18-0094.1.xml>
- NOAA National Centers for Environmental information, Climate at a Glance: Global Time Series, published July 2016 [Electronic resource]. <http://www.ncdc.noaa.gov/cag/time-series/>
- Peschke, G. ZurAnwendbarkeitstatistischerModelle fur die Untersuchung des Maanderproblems. *Acta Hydrophys.*, 1973, vol.17, no 2–3, pp. 235–247.
- Rotnicki, K. Retrodiction of palaeodischarges of meandering and sinuous rivers and its palaeoclimatic implications. In: Temperate Palaeohydrology. Chichester, Wiley Publ., 1991, pp. 431–470.
- Shiklomanov, A.I., Lammers, R.B. Changing discharge patterns of high-latitude rivers. In: Climate vulnerability: understanding and addressing threats to essential resources. Elsevier Publ., 2013, p. 161–175.
- Sylvester, Z., Durkin, P., Covault, J.A. High curvatures drive river meandering. *Geology*, 2019, no. 47 (3), pp. 263–266. <https://doi.org/10.1130/G45608.1>
- Sylvester, Z., Durkin, P.R., Hubbard, S.M., Mohrig, D. Autogenic translation and counter point bar deposition in meandering rivers. *GSA Bulletin*, 2021, no. 133 (11-12), pp. 2439–2456. <https://doi.org/10.1130/B35829.1>
- Victorov, A., Archipova, M., Trapeznikova, O. Dynamic balance of the landscape morphological pattern of alluvial plains: the quantitative aspect. In: Proc. the 20th Intern. Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020, 18–24 August, 2020. vol..20, book 2.2, pp 207–214. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/2.2/s10.025>

ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

УДК 624.131.4

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА ДИСПЕРСНЫХ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ – НОВЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

© 2024 г. В. И. Осипов^{1,*}, В. Н. Соколов^{2,**}, Ф. С. Карпенко^{1,***}

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

²МГУ им. М.В. Ломоносова,
Ленинские горы 1, Москва, 119991 Россия

*E-mail: osipov@geoenvironment.ru

**E-mail: sokolov@geol.msu.ru

***E-mail: kafs08@bk.ru

Поступила в редакцию 24.10.2023 г.

После доработки 30.01.2024 г.

Принята к публикации 03.06.2024 г.

Приводятся данные о несоответствии теоретических расчетов и экспериментальных результатов оценки прочности тонкодисперсных образований, к которым относятся глинистые породы. Рассматриваются физико-химические процессы на поверхности дисперсных частиц при взаимодействии воды и образование пленок адсорбированной воды, проявляющих расклинивающее давление. Наличие пленок и их расклинивающее действие обуславливают формирование в ходе литогенеза различных типов контактов между частицами грунта: коагуляционных, переходных, фазовых. Образующиеся контакты являются важнейшими факторами поведения глинистых пород. В работе рассматриваются влияние типов контактов на состояние, деформируемость и устойчивость глинистых пород при внешних воздействиях. Сделан вывод, что оценка поведения глинистых пород должна базироваться на физико-химической механике, закономерностях контактных взаимодействий в дисперсных грунтах и статистическом анализе экспериментальных определений показателей механических свойств глинистых грунтов.

Ключевые слова: адсорбированная вода, структурированные и диффузные пленки воды, расклинивающее давление, изотерма расклинивающего давления, коагуляционный, смешанный и фазовый типы контактов, внешние и внутренние напряжения

DOI: 10.31857/S0869780924040059 EDN: SFSRTK

ВВЕДЕНИЕ

Описание механических свойств грунтов в настоящее время основывается на принципах классической механики, опирающихся на явление упругого деформирования твердых тел. На основе этих представлений широкое применение нашли теории предельного состояния грунтов (теория Мора-Кулона) и эффективных напряжений (теория К. Терцаги). В обоих случаях деформирование и прочность рассматриваются как упругие процессы, происходящие внутри структурных (минеральных) элементов и обусловленные их составом и наличием структурных несовершенств в виде дислокаций, вакансий и других неоднородностей. Происходящие изменения характеризуются показателями прочности и деформации, в качестве которых используются сопротивление сдвигу – угол внутреннего трения и сцепление,

и сжимаемость (модуль сжатия). Обе теории вошли в практику в качестве теоретической основы оценки прочности грунтов, а угол внутреннего трения как основной показатель механических свойств дисперсных грунтов, оцениваемых при изысканиях под строительные проекты.

Основными факторами, влияющими на механическое поведение грунта, согласно теории Мора-Кулона и К. Терцаги, считаются его минеральный состав, а также геометрические особенности слагающих элементов – частиц (размер, форма, окатанность и т.д.). При этом считается, что угол внутреннего трения и сцепление для каждого грунта при оценке его прочности на сдвиг остаются неизменными во всем диапазоне прикладываемых напряжений, а огибающая кривая предельного напряжения представляет собой прямую линию (рис. 1а).

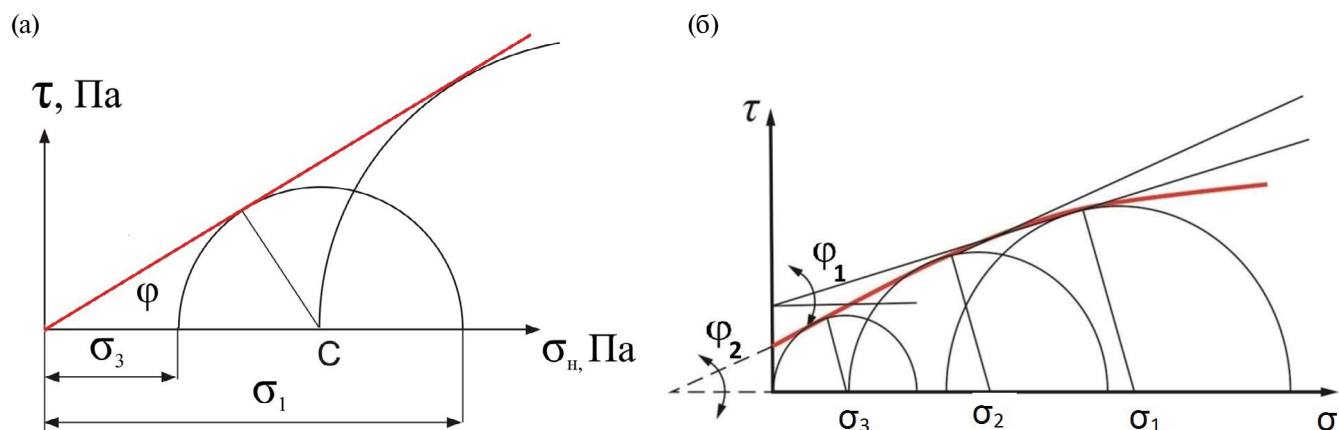


Рис. 1. Диаграмма сдвига, построенная в соответствии с теорией Мора-Кулона, для песчаного грунта (а) и полученная по экспериментальным данным для глин (б, красная линия).

Многочисленные экспериментальные данные показывают, что эти требования выполняются только для грунтов с массивной структурой: крупнообломочных дисперсных образований и песков. В то же время, в случае со связными глинистыми грунтами, огибающая круги напряжений (круги Мора) криволинейна, и лишь отдельные ее отрезки могут быть аппроксимированы линейным уравнением Мора-Кулона (рис. 1б). Особенно заметные отклонения наблюдаются при сдвиге слабо литифицированных грунтов в интервале нормальных нагрузок до 300 кПа. При более высоких напряжениях нелинейность графиков сдвига сглаживается.

Криволинейность огибающей кривой для глинистых грунтов указывает на изменчивость угла внутреннего трения и сцепления в зависимости от напряженного состояния. Это свидетельствует о несоответствии экспериментальных данных теоретическим. Причина несоответствия заключается в том, что теория не отражает в полной мере свойства глинистых систем и природу процессов, происходящих при их деформировании. Это относится, прежде всего, к влажным глинистым грунтам.

Отклонение экспериментальных результатов от теоретических расчетов, основанных на принципах классической механики, послужило причиной формирования принципов другой механики, а именно физико-химической механики, которую можно рассматривать как новый подход к определению механических свойств дисперсных материалов, включая грунты.

Изучение физико-химических процессов, применительно к тонкодисперсным пористым системам, получило развитие в России благодаря исследованиям академиков П.А. Ребиндера [20], Б.В. Дерягина [2, 3, 6], а также их многочисленных учеников, создавших новое междисциплинарное научное направление, — «физико-химическую механику пористых тел» [1, 10, 14, 18, 21, 27, 29]. Это направление объединило современные

достижения в области молекулярной физики, коллоидной химии и классической механики.

Влияние физико-химических факторов, таких как влажность, поверхностные активные вещества, температура и др. на механические свойства дисперсных структур проявляется в тем большей степени, чем более развита межфазная внутренняя поверхность пористого тела. Поэтому глинистые породы, обладающие развитой поверхностью, относятся к типичным объектам, к которым применима физико-химическая механика. Среди внутренних факторов, влияющих на состояние тонкодисперсных пористых тел, наибольшее значение имеют адсорбция воды и развитие контактных взаимодействий.

АДСОРБИРОВАННАЯ ВОДА В ГЛИНАХ

Образование пленок адсорбированной воды

Глинистые минералы активно взаимодействуют с молекулами воды с образованием на поверхности пленки адсорбированной воды (рис. 2). *Адсорбированной считается тонкая пленка воды, образующаяся под действием поверхностных сил минералов или других твердых тел и обладающая специфической структурой и свойствами.*

При адсорбции возникает два вида адсорбированной воды (рис. 3). Первый вид — структурированный слой, образующийся непосредственно на поверхности минерала за счет адсорбции молекул воды из воздуха и удержании их в физически связанном состоянии. Адсорбция воды на поверхности минералов приводит к образованию некоторого количества слоев адсорбируемых молекул, формирующих структурированный слой гидратной пленки.

В основе образования поверхностной структурированной пленки лежит взаимодействие между молекулами воды и силикатной поверхностью

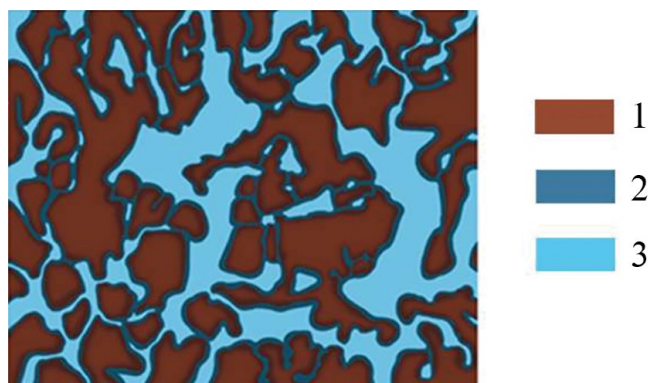


Рис. 2. Пленка адсорбированной воды в глинах: 1 — поверхность минерала, 2 — пленка адсорбированной воды, 3 — поровое пространство, заполненное свободной водой.

минералов, а также молекул воды внутри адсорбционного слоя. В результате донорно-акцепторной связи между одним из протонов молекулы воды и кислородом октаэдрической сетки минерала формируется связующий мостик между силикатной поверхностью и молекулами граничного слоя адсорбированной воды.

На формирование пленки структурированной адсорбированной воды большое влияние оказывает строение поверхностного слоя минерала. Адсорбция молекул воды может рассматриваться с позиции эпитаксиального наращивания слоя структурированной граничной пленки на поверхности минерала путем наложения слоев воды на структурную сетку минерала. Реальные структуры слоистых силикатов имеют дитригональный мотив кислородной ячейки, который несколько меньше размера ячейки свободной воды.

При взаимодействии минерала и воды реализуется эпитаксиальный механизм — постепенное приспособление структуры воды к структуре минерала путем последовательных трансформаций водородных связей. При этом возникающие на границе минерал-вода напряжения распространяются как внутрь кристалла, так и внутрь слоя адсорбированной воды, вызывая изменение ее структуры и оказывая влияние на ее свойства.

Прямое определение толщины пленки структурированной адсорбированной воды осуществлено Б.В. Дерягиным и М.М. Кусаковым [3], Б.В. Дерягиным и Н.В. Чураевым [5], A. Read, J.A. Kitchener [32], M. Fukue, T. Minato, N. Taya, T. Chida [30] при изучении абсорбции водяного пара на плоских поверхностях стекла, кварца и слюды с одновременным эллипсометрическим измерением толщины образующейся полимолекулярной пленки. Полученные данные свидетельствуют, что толщина пленки первой разновидности адсорбированных молекул воды (структурированного слоя) на глинистых минералах в зависимости от их

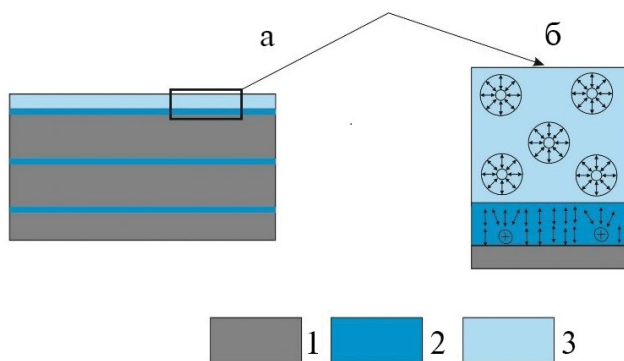


Рис. 3. Строение пленки адсорбированной воды на поверхности частиц глинистых минералов: 1 — поверхность минерала, 2 — структурно ориентированная адсорбированная вода, 3 — диффузная адсорбированная вода.

структуры и химического состава изменяется от 0.3 до 7.2 нм. У различных каолинитов она составляет 3.4–3.7 нм, у монтмориллонитов 0.3–0.5 нм. Несмотря на это общий объем структурированной части адсорбированной воды у монтмориллонитов намного больше, чем у каолинита, за счет подвижности структуры и большой площади адсорбирующих поверхностей.

При повышении влажности выше максимальной гигроскопической в грунтах развивается другой механизм образования адсорбированной воды за счет координационной связи молекул воды гидратных оболочек обменных катионов, приводящий к образованию адсорбированного слоя *воды диффузных гидратных оболочек* (см. рис. 3). Адсорбированная вода диффузных гидратных оболочек не образует какой-либо структурной сетки. Тем не менее, она также, как и вода структурно-ориентированной пленки, находится под влиянием электростатического поля частиц и обладает специфическими свойствами.

Толщина слоя воды диффузных оболочек обменных катионов значительно больше и зависит от валентности катионов и их концентрации. В зависимости от этих факторов толщина пленки молекул воды диффузных оболочек изменяется от 50 до нескольких сот нанометров.

Таким образом, структура гидратной пленки, образующейся в дисперсных системах, включает две разновидности адсорбированной воды: полимолекулярный слой структурированной воды, формирующийся за счет молекулярных сил непосредственно на поверхности минерала, и диффузный слой воды гидратированных катионов, отошедших от его поверхности (см. рис. 3).

Свойства пленок адсорбированной воды

Впервые внимание на существование специфических свойств у пленок адсорбированной воды обратил Б.В. Дерягин с соавторами [3, 4].

В последующие годы изучение свойств нанопленок стало предметом многочисленных исследований отечественных и зарубежных ученых [7, 13, 16, 21, 25, 27, 30–32].

Наличие в таких пленках анизотропного напряжения, обусловленного деформацией водородных связей и образованием диффузных гидратных оболочек катионов, предопределяет их специфические гидродинамические свойства: они не передают порового давления и не обладают взвешивающим эффектом. Кроме того, вода в пленках отличается по растворяющей способности, теплофизическим, диэлектрическим и другим свойствам от аналогичных показателей свободной воды. Было установлено, например, что растворяющая способность воды в нанопленках более чем в 10 раз ниже по сравнению со свободной водой [11].

Интерес представляют структурно-механические свойства нанопленок, прежде всего, их вязкость. Установлено, что вода в тонких пленках обладает повышенной вязкостью по сравнению с обычной водой [6]. Это хорошо подтверждается ее поведением в тонких капиллярах, сечение которых перекрывается адсорбированной водой. Вязкость начинает повышаться в капиллярах радиусом < 100 нм, а в капиллярах радиусом ~ 30 нм она оказывается в 1.5 раза выше вязкости свободной воды (рис. 4). С повышенной вязкостью воды нанопленок связано наличие в тонкодисперсных глинах начального градиента фильтрации.

Следует отметить, что изменения структуры и свойств характерны только для полярных жидкостей, подобных воде; в то время как в неполярных жидкостях, таких как четыреххлористый углерод, подобных изменений не происходит (см. рис. 4).

Структурированная пленка адсорбированной воды проявляет сильную температурную зависимость как в области положительных, так

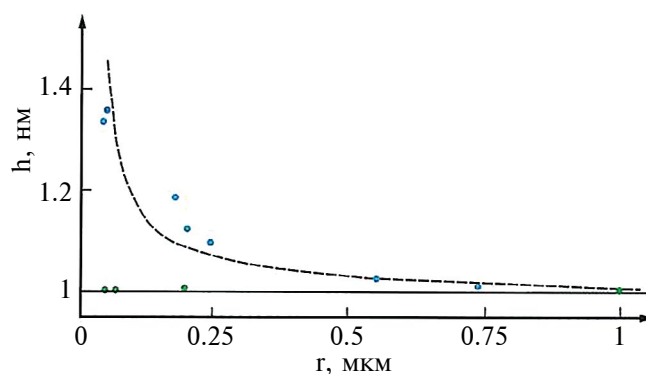


Рис. 4. Зависимость относительной вязкости воды (пунктир) и неполярной жидкости CCl_4 (сплошная линия) от радиуса кварцевых капилляров [7].

и отрицательных температур. Прямые измерения толщины такой пленки при различных температурах свидетельствуют, что она уменьшается при повышении температуры. Структура пленки при достижении 65°C разрушается под влиянием теплового движения молекул, и она полностью исчезает (рис. 5а). Фазовый переход адсорбированной воды в лед происходит при более низких (отрицательных) температурах по сравнению со свободной водой, с уменьшением толщины пленки температура ее замерзания снижается (рис. 5б).

Поровое пространство, занятое пленками адсорбированной воды, обычно относится к общей пористости грунта. В то же время пленки, обладающие специфическими гидродинамическими свойствами, не реагируют на сжимающее напряжение. Поэтому сжимаемость грунтов следует определять с учетом не общей, а активной пористости. Учет этого фактора может привести к изменению коэффициента сжимаемости у легких суглинков до 2%, а тяжелых глин — до 8% [15].

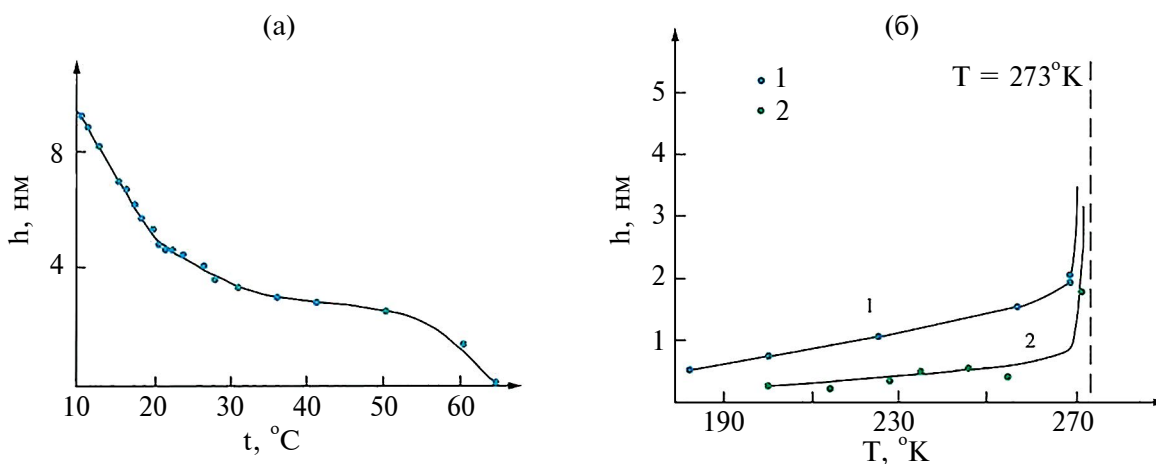


Рис. 5. Зависимость толщины пленки (h) адсорбированной воды: а — на кварце от температуры [6]; б — незамерзшей воды от температуры (T , °K), на поверхности Са-каолинита (1) и Na-монтмориллонита (2) [3].

Расклинивающее действие пленок адсорбированной воды

При сближении частиц происходит перекрытие пленок адсорбированной воды, сопровождающееся изменением свободной энергии Гиббса, между частицами возникают силы отталкивания (рис. 6).

Силы отталкивания, образующиеся между пленками адсорбированной воды при их перекрытии, получили название расклинивающего давления. Благодаря наличию таких сил объясняются существование дисперсных систем в природе и предотвращение в них коагуляции и агрегации (укрупнения) дисперсной фазы (минеральных частиц). Этим же объясняется появление давления в глинах при гидратации и отсутствии возможности изменения их объема, получившее название давление набухания.

Величина расклинивающего давления граничных пленок $\Pi(h)$ определяется вкладом поверхностных сил притяжения и отталкивания различной природы между поверхностью минералов и адсорбированной водой [2–4, 8, 18, 27, 28]. В первом приближении их вклад можно считать аддитивным:

$$\Pi(h) = \Pi_e(h) + \Pi_m(h) + \Pi_s(h), \quad (1)$$

где Π_e – электростатическая составляющая, обусловленная перекрытием диффузных ионных слоев заряженных поверхностей частиц и их отталкиванием; Π_m – молекулярная составляющая, обусловленная дисперсионным взаимодействием твердой подложки через тонкую пленку жидкости и притягиванием частиц; Π_s – структурная составляющая, вызванная перекрытием структурированных слоев адсорбированной воды с измененной структурой, взаимодействующей непосредственно с поверхностью минерала.

Входящие в приведенное выражение молекулярная, электростатическая и структурная компоненты расклинивающего давления действуют одновременно, но изменяются по различным закономерностям. Электростатическая и структурная компоненты – положительные, и препятствуют сближению частиц. Значение электростатической компоненты Π_e определяется величиной заряда минеральной поверхности, она характеризуется наибольшим дальним действием. Поэтому толстые пленки воды в разбавленных электролитах устойчивы. Молекулярная составляющая имеет отрицательное значение и стремится сблизить частицы, проявляясь, как правило, при толщине граничной пленки $\Pi_m < 50$ нм. При толщине пленки < 10 нм ее устойчивость повышается, в основном, за счет структурной компоненты расклинивающего давления Π_s .

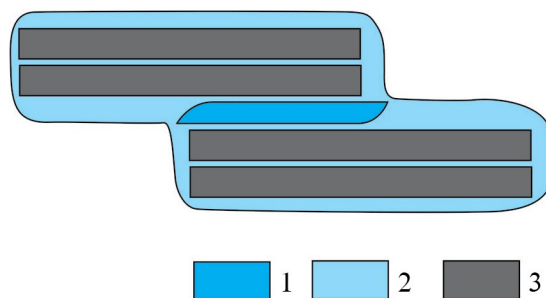


Рис. 6. Образование сил отталкивания между твердыми частицами при перекрытии пленок адсорбированной воды: 1 – зона перекрытия пленок (расклинивающее давление), 2 – адсорбированная вода, 3 – частица.

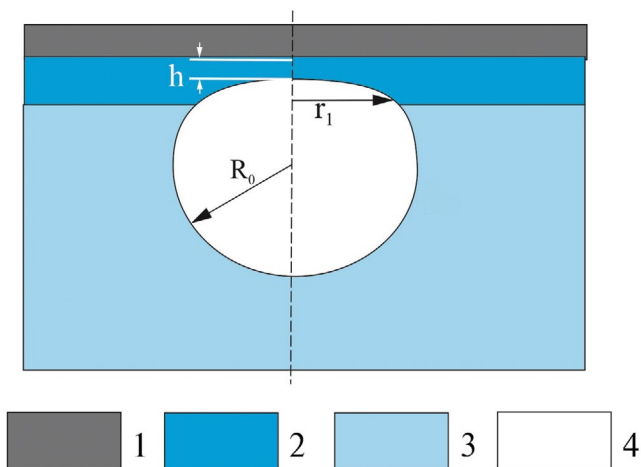


Рис. 7. Пузырьковый метод получения изотермы расклинивающего давления гидратной пленки связанной воды: 1 – твердое тело, 2 – адсорбированная вода, 3 – свободная вода, 4 – пузырек воздуха.

Изотермы расклинивающего давления

Первые данные по определению расклинивающего давления [3] были получены в ходе уникального эксперимента по измерению давления в тонкой гидратной пленке на контакте твердой поверхности с пузырьком воздуха (рис. 7). В эксперименте создавались условия, когда пузырьки воздуха различного радиуса R_0 , всплывая, приближались к твердой поверхности. Всплывший пузырек образовывал с твердой поверхностью контактную площадку радиусом r_1 с толщиной граничной пленки на контакте, равной h . Путем измерения радиуса пузырька и толщины граничной пленки оценивалось граничное давление пленки по капиллярному давлению пузырька $\Delta P_k = 2\sigma_w/R_0$, где σ_w – поверхностное натяжение воды, а ΔP_k – капиллярное давление пузырька, R_0 – радиус пузырька.

Зависимость суммарного действия расклинивающего давления граничной гидратной нанопленки в зазоре между твердыми телами от толщины пленки h получила название *изотермы*

расклинивающего давления [5]. Качественная картина такой зависимости показана на рис. 8. На диаграмме выделяются две ветви величины расклинивающего давления $\Pi(h)$, соответствующие устойчивости α - и β -пленок.

Первая β -ветвь обусловлена расклинивающим действием электростатической составляющей за счет перекрытия диффузных ионных слоев. Вторая (α -ветвь) обусловлена структурной составляющей расклинивающего давления. Максимальные толщины нанопленок h_1 и h_2 , отвечающие α - и β -ветвям изотерм адсорбции, характеризуют термодинамически равновесные состояния, на которых могут фиксироваться взаимодействующие частицы и образовываться объемные структуры.

Иногда β -пленка может самопроизвольно или под влиянием физико-химических факторов переходить в более устойчивое состояние α -пленки. Этот процесс сопровождается преодолением потенциального барьера $\Pi_{\max}$, отвечающего максимуму избыточной свободной энергии пленки при ее толщине h_0 .

Результаты обобщения экспериментальных данных по изучению расклинивающего давления β -пленок в зависимости от их толщины, полученные различными исследователями, дали значения от 0.1×10^4 до 1.4×10^4 дин/см². При благоприятных физико-химических условиях максимальное расклинивающее давление β -пленки при ее максимальной толщине может достигать 3×10^6 дин/см² [5]. При толщине 40–70 нм β -пленка может разрушаться. Уменьшение толщины β -пленки и ее разрушение зависят от концентрации электролита в растворе и ряда других физико-химических факторов (например, понижение pH растворов до изоэлектрического состояния поверхности минерала).

После разрушения β -пленки и приближении ее толщины к 10 нм в результате дальнейшего сближения частиц под влиянием межмолекулярных сил начинают действовать расклинивающие силы молекул воды, адсорбированных на поверхности минерала и образующих α -ветвь расклинивающего давления. Это приводит к новому росту расклинивающего давления и устойчивости пленки (см. рис. 8).

КОНТАКТЫ В ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ

Типы контактов

Передача напряжений и расклинивающее действие пленок в пористых дисперсных системах идут не по всей межфазной поверхности частиц, а только в местах их наибольшего сближения — контактах. Количество и характер индивидуальных контактов — важнейшие характеристики

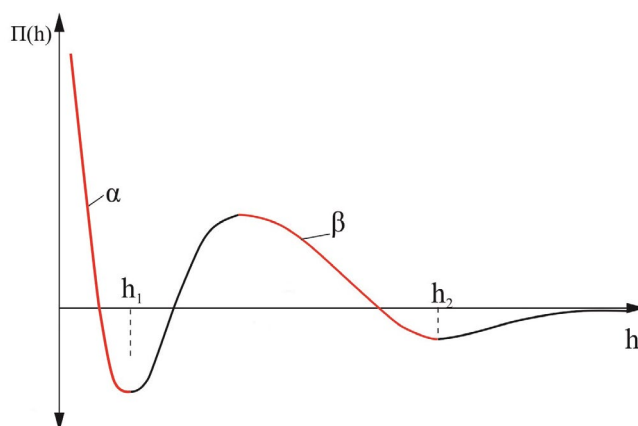


Рис. 8. Интегральная изотерма расклинивающего давления пленки [3].

дисперсных структур, определяющие их деформационные, прочностные и другие свойства.

В зависимости от формы взаимодействующих частиц возможны различные геометрические типы контактов между сферическими, сферическими и плоскими частицами, плоскими частицами. Последние подразделяются на контакты: скол-скол, базис-скол и базис-базис [17].

В энергетическом отношении контакты можно подразделить на три типа: коагуляционные, смешанные (переходные) и фазовые [16, 19, 20, 23, 28] (рис. 9). Образование в породах различных типов контактов идет в процессе литогенеза и определяется величиной напряжения (гравитационного давления), которое испытывают породы в процессе их формирования. Каждый из выделенных типов контактов характеризуется определенным механизмом образования и природой сил, действующих в зоне контактов.

Коагуляционные контакты (рис. 9а) образуются между частицами при сохранении термодинамически устойчивой прослойки адсорбированной воды на контакте [16, 29]. В природных условиях коагуляционные контакты встречаются в водонасыщенных тонкодисперсных отложениях на стадии начального литогенеза, не перенесших заметного уплотнения (илы, слаболитифицированные глинистые осадки, глины пластичной или текучей консистенции и другие дисперсные системы). Важную роль в их образовании играют пленки адсорбированной воды. Термодинамически устойчивое состояние коагуляционных контактов создается при определенных толщинах граничной пленки, отвечающих α - и β -ветвям изотермы адсорбции, когда расклинивающие силы пленок уравнивают силы притяжения частиц.

Коагуляционные контакты принято подразделять на две разновидности: дальние и ближние. Первые возникают при обеспечении устойчивости контакта за счет β -ветви изотермы адсорбции,

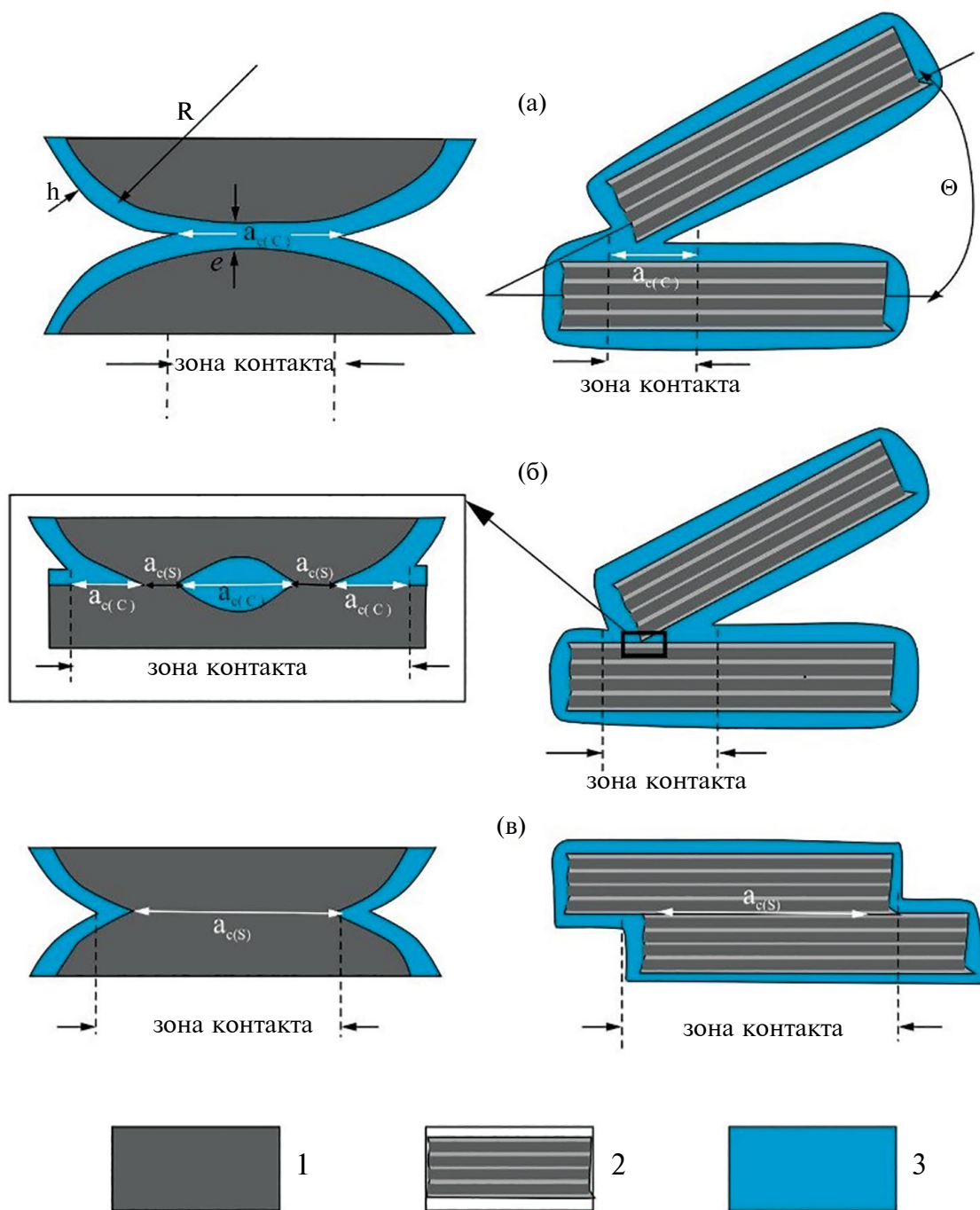


Рис. 9. Типы контактов: коагуляционные (а), смешанные (б) и фазовые (в). 1, 2 – частицы, 3 – пленка адсорбированной воды. Участки контактов: $a_{c(C)}$ – коагуляционных, $a_{c(S)}$ – фазовых.

а вторые за счет α -ветви изотермы. Прочность дальних контактов достигает 10^{-10} Н, а ближних – 10^{-9} – 10^{-8} Н [24].

Второй тип контактов (рис. 9б) формируется по мере уплотнения глинистых пород в водонасыщенном состоянии или их частичного обезвоживания при высушивании. Под влиянием внешних и внутренних факторов на отдельных неровностях (выступах) контактирующих поверхностей происходит продавливание (разрушение)

гидратных граничных пленок. В результате на небольших площадках непосредственного соприкосновения частиц образуются точечные контакты (по терминологии П.А. Ребиндера), за счет “холодной спайки” частиц или образования ионно-электростатических связей, подобно тем, какие существуют между слоями в структурах глинистых минералов. Поскольку поведение таких контактов определяется как расклинивающим действием гидратных пленок (на коагуляционных

участках контакта), так и более прочными силами химической и ионно-электростатической природы (на участках непосредственного соприкосновения частиц), то они были названы смешанными (или переходными) [18]. Образованию переходных контактов способствует неоднородность микрорельефа поверхности дисперсных минеральных частиц: на выступах водные пленки могут прорываться с образованием участков с фазовыми контактами, а в углублениях, наоборот, сохраняются коагуляционные участки. Расчеты показывают, что прочность единичного переходного контакта может изменяться от 5×10^{-8} до 3×10^{-7} Н [24].

При цементации отложений или росте геостатического давления и температуры происходит образование наиболее прочных фазовых контактов (рис. 9в). В основе этого вида контактов лежат силы ионно-электростатической и химической природы, под влиянием которых глинистые частицы трансформируются в более крупные глинистые ультра- и микроагрегаты – кристаллиты. Образующиеся контакты по своей природе подобны границам зерен в поликристаллическом теле. Фазовые контакты распространены в сцементированных глинистых породах, аргиллитах, алевролитах, глинистых сланцах, являющихся типичными твердыми телами, упруго деформируемыми при приложении внешних нагрузок и хрупко разрушающимися при достижении предельной прочности. Фазовые контакты практически не гидратируются, что обуславливает их водостойкость и полную потерю способности пород к набуханию. Прочность фазовых контактов $>3 \times 10^{-7}$ Н [24].

Рассмотренные выше типы контактов формируются в ходе длительной геологической истории. Образование их определяется внешними факторами, прежде всего, гравитационным давлением вышележащих пород, от которого зависит степень литификации. Образование коагуляционных контактов идет до 20–30 МПа нагрузки. При дальнейшем повышении нагрузки идет постепенный переход к глинам полутвердой консистенции со смешанными контактами. При напряжениях, приближающихся к 60–80 МПа, формируются фазовые контакты, характерные для сцементированных глинистых пород, аргиллитов и алевролитов [16].

Таким образом, рассмотрение типов контактов показывает, что роль расклинивающего действия гидратных пленок зависит от степени литификации пород и постепенно снижается при переходе от пород с коагуляционными контактами к породам, в которых преобладают фазовые контакты. У последних расклинивающее давление гидратных пленок отсутствует или имеет минимальное значение.

Влияние типов контактов на механические свойства глинистых грунтов

В процессе литогенеза и формирования различных типов контактов существенные изменения претерпевают консистенция, деформируемость, прочность и другие свойства глинистых образований.

Деформирование грунтов с дальними коагуляционными контактами носит нелинейный вязко-текучий характер. Даже при малых напряжениях их прочность медленно возрастает, а при преодолении условного статического предела становится практически неизменной. Важной особенностью таких структур являются их тиксотропные свойства, т.е. разрушение при преодолении величины прочности и разжижение с последующим восстановлением при прекращении внешнего воздействия.

Грунты с ближними коагуляционными контактами при деформировании проявляют также нелинейный характер, но обладают ясно выраженными свойствами пластичности. При неизменном напряжении пластическое деформирование может достигать значительной величины без разрыва сплошности и незначительном изменении прочности. Это объясняется тем, что в процессе деформирования часть контактов разрушается, но вместо них возникают контакты с другими частицами. В результате происходит пластическое деформирование, а прочность остается практически неизменной, поскольку количество контактов не изменяется. Некоторое снижение прочности может наблюдаться в связи с переориентацией частиц в зоне сдвига.

При дальнейшем повышении напряжений на отдельных участках контакта происходит отжатие молекул адсорбированной воды и образование “сухих” (фазовых) контактов. Появление фазовых контактов наряду с коагуляционными сопровождается переходом грунта в структуру с переходными контактами. Поэтому грунты с переходными контактами проявляют особенности смешанного (упругого и пластического) деформирования, при котором идет непрерывное нарастание деформации и прочности, переходящее после разрушения фазовых контактов в остаточную (пластичную) деформацию с более низкой прочностью.

Глинистые породы с фазовыми контактами ведут себя как упругодеформируемые системы с хрупким разрушением.

В соответствии с поведением глинистых пород в зависимости от типа контактов идет изменение их важнейших свойств и показателей, знание которых важно при решении различных научных и практических вопросов их использования, как объектов окружающей среды. Наиболее распространенные показатели свойств грунтов, полученные авторами, применительно к структурам с различным типом контактов показаны в табл. 1 [8, 9].

Таблица 1. Взаимосвязь показателей свойств глинистых пород с типами контактов

Тип контакта	Характерные свойства
Дальний коагуляционный ($p_i = 10^{-10}$ Н)	Плотность $\rho = 0.3\text{--}1.20$ г/см ³ Прочность на раздавливание $\sigma_p = 0.02\text{--}0.05$ МПа Общий модуль деформации $E_o = 0.5\text{--}1.0$ МПа Вязкость ненарушенной структуры $10^7\text{--}10^8$ Па×с Сцепление <0.01 МПа Угол внутреннего трения $0^\circ\text{--}7^\circ$
Ближний коагуляционный ($p_i = 10^{-9}\text{--}5 \times 10^{-8}$ Н)	Плотность $\rho = 0.9\text{--}1.65$ г/см ³ Прочность на раздавливание $\sigma_p = 0.03\text{--}0.5$ МПа Пластическая прочность $p_m = 0.03\text{--}0.5$ МПа Модуль деформации: – упругой $E = 1.0\text{--}30$ МПа – общей $E_o = 0.1\text{--}10$ МПа Вязкость ненарушенной структуры $10^8\text{--}10^{12}$ Па×с Сцепление $0.01\text{--}0.05$ МПа Угол внутреннего трения $5^\circ\text{--}22^\circ$
Смешанный (переходный) ($p_i = 5 \times 10^{-8}\text{--}3 \times 10^{-7}$ Н)	Плотность $\rho = 1.66\text{--}2.20$ г/см ³ Прочность на раздавливание $\sigma_p = 1.3\text{--}5.0$ МПа Пластическая прочность $p_m = 0.03\text{--}0.5$ МПа Взаимодействие с водой: набухание Модуль деформации: – упругой $E = 200\text{--}800$ МПа – общей $E_o = 1500\text{--}500$ МПа Вязкость ненарушенной структуры $10^{13}\text{--}10^{14}$ Па×с Сцепление $0.1\text{--}0.4$ МПа Угол внутреннего трения $18^\circ\text{--}32^\circ$
Фазовый ($p_i > 3 \times 10^{-7}$ Н)	Прочность на раздавливание $\sigma_p = 2\text{--}6$ МПа Взаимодействие с водой: набухание в ненарушенном сложении отсутствует; в нарушенном проявляют набухание Модуль деформации: – упругой $E = 300\text{--}1000$ МПа – общей $E_o = 250\text{--}800$ МПа Вязкость ненарушенной структуры $10^{14}\text{--}10^{16}$ Па×с Сцепление $0.12\text{--}0.8$ МПа Угол внутреннего трения $22^\circ\text{--}38^\circ$

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

Классическая механика грунтов, как говорилось выше, исходит из того, что в основе прочности твердых тел лежит петрографический состав слагающих элементов и их упругие свойства. При этом установлено, что процесс деформирования под влиянием внешнего напряжения сопровождается изменением дисперсного состава грунтов в зоне разрушения. Такое представление механизма деформирования и разрушения можно считать приемлемым для массивных скальных грунтов, а также крупнообломочных и песчаных грунтов. Вместе с тем, оно не отвечает природе поведения глин. Это обусловлено двумя факторами. Во-первых, в глинах, в отличие от твердых массивных тел, действуют не только внешние силы, но и внутренние, обусловленные наличием

адсорбционных пленок вокруг частиц с их расклинивающим действием. Во-вторых, как было показано в работах М.М. Филатова [26], Е.М. Сергеева [22], В.Д. Ломтадзе [12], частицы глинистых минералов не разрушаются даже при высоких внешних напряжениях. Это позволяет считать, что механические свойства глинистых грунтов определяются не столько прочностью и упругостью самих слагающих элементов, сколько их взаимными структурными связями, реализуемыми через контакты.

С учетом сказанного, можно заключить, что теория эффективных напряжений К. Терцаги и теория предельного состояния грунтов Мора-Кулона неприменимы к глинистым грунтам для интерпретации их прочностных и деформационных свойств. Поэтому целью настоящих исследований является модификация этих теорий с позиции физико-химической механики.

Модификация теории К. Терцаги

Согласно теории К. Терцаги, прочность грунтов определяется из выражения

$$\tau = \operatorname{tg} \varphi (\sigma - u) + c, \quad (2)$$

где φ – угол внутреннего трения, c – структурное сцепление, σ – общее внешнее напряжение, u – поровое давление. При этом предусматривается действие в грунтах только внешнего напряжения (σ).

Таким образом, теория К. Терцаги не учитывает физико-химические процессы на границе минерал-вода, приводящие к образованию на поверхности частиц тонкой пленки адсорбционной воды и появлению на контактах внутреннего расклинивающего давления. Это давление создает внутреннее напряжение, которое также, как и внешнее, передается на скелет грунта и влияет на его прочность. Поэтому напряженное состояние глинистых грунтов является функцией нескольких факторов:

- а) общего внешнего напряжения, прилагаемого к грунту;
- б) порового давления воды в порах грунта;
- в) расклинивающего давления (напряжения) гидратных пленок на контактах частиц.

Получаемую при учете всех трех факторов величину давления следует назвать *суммарным (истинным) эффективным напряжением*.

Исходя из этого, следует модифицировать теорию эффективных напряжений К. Терцаги применительно к глинистым грунтам. Для этого необходимо оценить истинное эффективное напряжение, которое определяется из следующего выражения [14]:

$$\sigma'' = (\sigma - \sigma_p) - u', \quad (3)$$

где σ'' – суммарное (истинное) эффективное давление, σ – внешнее давление, u' – активное поровое давление, σ_p – расклинивающее давление тонких пленок адсорбированной воды, определяемое по формуле:

$$\sigma_p = \chi \Pi(h) a_c, \quad (4)$$

где χ – число контактов в единице площади поверхности, на которых происходит перекрытие пленок связанной воды, $\Pi(h)$ – расклинивающее давление гидратной пленки, a_c – площадь коагуляционного контакта.

Тогда прочность дисперсных систем будет определяться из следующего выражения:

$$\tau = \operatorname{tg} \varphi (\sigma - \sigma_p - u') + c. \quad (5)$$

В формулу (5) входят два новых параметра, которые отсутствуют в формуле К. Терцаги. Первый – σ_p , характеризует внутреннее давление, возникающее в результате расклинивающего действия пленок. В наибольшей степени значение

этого параметра проявляется во влажных глинах с коагуляционными контактами, в которых они существенно влияют на внутреннее напряжение системы. При переходе к уплотненным и высоко литифицированным глинистым образованиям влияние гидратных пленок снижается и полностью исчезает.

Второй параметр – u' , характеризует активное поровое давление, возникающее в порах, занятых свободной водой. Для нахождения u' необходимо из общего объема пор вычесть объем пор, занимаемых адсорбированной водой.

Модификация формулы К. Терцаги позволяет использовать теорию реальных эффективных напряжений для оценки прочности, а также оценить ряд важнейших свойств грунтов, к числу которых относится способность тонких минеральных частиц находиться в устойчивом состоянии в водной среде. Поверхностные пленки осуществляют расклинивающее действие на контактах частиц и противостоят молекулярным силам притяжения, стремящимся вызвать коагуляцию и укрупнение структурных элементов. Другой специфической особенностью глин является их пластичность, также обусловленная наличием на контактах тонких пленок адсорбированной воды, обладающей вязким трением. При отсутствии таких пленок свободная вода легко отжимается из контактной зоны и не препятствует образованию “сухого” контакта между взаимодействующими частицами, т.е. исчезает эффект вязкого трения, а вместе с ним и пластичность всей системы. Выше уже упоминалось о такой специфической особенности глинистых образований, как давление набухания при увлажнении, являющееся непосредственным результатом расклинивающего действия гидратных пленок. Указанные процессы развиваются при взаимодействии минералов с водой даже при неизменности внешнего напряжения.

Таким образом, использование теории реальных эффективных напряжений с учетом как внешних, так и внутренних источников энергии, с применением физико-химической механики позволит повысить точность расчетов и расширить возможность оценки прочности и других свойств дисперсных систем.

Оценка предельной прочности глинистых грунтов с учетом наличия в них различных типов контактов

Предельная прочность глинистых грунтов и их состояние определяются суммарной прочностью контактов и ее соотношением с внешним напряжением. Общее уравнение прочности контактов выглядит следующим образом:

$$\sigma_n = \chi_1 \Pi(h)_1 a_{c1} + \chi_2 \Pi(h)_2 a_{c2} + \chi_3 \Pi(h)_3 a_{c3}, \quad (6)$$

где χ — количество контактов различных типов, $P(h)$ — их прочность, a_c — площадь единичного контакта на единицу поверхности; цифры в нижнем индексе 1, 2, 3 указывают на принадлежность контактов к коагуляционному, смешанному и фазовому типу соответственно.

Первое слагаемое уравнения (6) отражает прочность коагуляционных контактов, второе — прочность смешанных контактов, третье — прочность фазовых контактов. Устойчивость структур сохраняется, когда суммарная прочность контактов равна внешнему давлению. В случае, когда внутреннее расклинивающее давление больше внешнего, происходит набухание грунта, а при преобладании внешнего напряжения над внутренним идет доуплотнение грунта.

В зависимости от степени литификации и содержания различных типов контактов устойчивость глин и характер их прочностных свойств существенно изменяется. Это связано с изменением типа контактов и их относительного содержания в грунте. Преобладание коагуляционных контактов способствует образованию отрицательных расклинивающих сил на контактах, а формирование фазовых контактов приводит к преобладанию положительных сил притяжения.

Наименее прочными и сильно деформируемыми являются глинистые грунты с дальними коагуляционными структурами. Для таких структур характерна небольшая прочность, легкая разжижаемость, тиксотропное поведение при динамических воздействиях. Это, как правило, слабые грунты, теряющие свою устойчивость даже при очень небольших внешних напряжениях.

Структуры с ближними коагуляционными контактами имеют более высокую прочность, проявляют характерные особенности — пластичность, значительную деформируемость без разрыва сплошности.

Наиболее широкий диапазон устойчивости и разнообразия свойств имеют структуры со смешанным типом контактов. Количество коагуляционных участков у таких структур сокращается, в то же время у них появляются точечные участки с фазовыми контактами. Благодаря появлению прямых химических взаимодействий частиц на таких участках прочность структур со смешанным типом контактов становится значительно выше по сравнению с коагуляционными структурами, проявляется их упругое деформирование и полухрупкое разрушение.

При дальнейшем уплотнении и литификации в глинистых грунтах преобладающими становятся фазовые контакты, происходит их переход в глинистые сцементированные грунты (аргиллиты и алевролиты). Расклинивающее действие на контактах исчезает, происходит

преобразование грунтов с их упрочнением и уменьшением деформируемости.

Таким образом, на примере глинистых грунтов хорошо прослеживается как меняются их свойства и устойчивость при изменении контактных взаимодействий. Исходя из этого, при изучении глинистых грунтов следует отказаться от методов классической механики по оценке устойчивости дисперсных систем (теории предельного равновесия Мора-Кулона и теории эффективных напряжений К. Терцаги) и перейти на применение теории физико-химической механики.

Изложенное выше может быть взято за основу для разработки новых нормативных документов для проектирования и строительства сооружений на глинистых грунтах и предотвращения аварий на этих сложных природных образованиях. Основой для разработки таких документов могут служить представления физико-химической механики и статистический анализ экспериментальных определений показателей механических свойств глинистых грунтов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Многочисленные экспериментальные данные свидетельствуют об отсутствии линейной зависимости между внешним напряжением и прочностью для дисперсных систем, к которым относятся глинистые грунты. Это объясняется тем, что теоретические расчеты устойчивости глинистых систем, их эффективных напряжений, вытекающие из теории предельного состояния Мора-Кулона и теории К. Терцаги, являются неверными и не отражают в должной мере физико-химические процессы, происходящие в глинах при их взаимодействии с водой.

2. Механизм деформирования в глинах отличается от других грунтов из-за формирования на поверхности глинистых частиц адсорбированной воды, обладающей расклинивающим действием. Это обуславливает появление на контактах, наряду с внешними, и внутренних напряжений.

3. При взаимном перекрытии на контактах пленок адсорбированной воды, в зависимости от степени литификации глин, происходит образование различных типов контактов между частицами: коагуляционных, смешанных и фазовых. Равновесие систем достигается, когда внешние напряжения компенсируются внутренними на контактах. Если внешние напряжения превосходят внутренние, то идет дополнительное уплотнение системы, а при $\sigma_p > \sigma$ происходит набухание глин.

4. Модернизация теории Мора-Кулона и К. Терцаги позволяет раскрыть истинный механизм поведения глинистых грунтов с учетом внешних и внутренних напряжений. Это открывает возможность для разработки методов

прогнозирования поведения глинистых систем в зависимости от характера изменения контактных взаимодействий и связанных с ними свойств, исходя из физико-химической механики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вода в дисперсных системах / Под ред. Б.В. Дерягина, Н.В. Чураева, Ф.Д. Овчаренко и др. М.: Химия, 1989. 288 с.
2. *Дерягин Б.В.* Теория устойчивости коллоидов и тонких плёнок. М.: Наука, 1986. 205 с.
3. *Дерягин Б.В., Кусаков М.М.* Свойства тонких слоев жидкости // Изв. АН СССР, сер. хим., 1936. № 5. С. 741–753.
4. *Дерягин Б.В., Обухов Е.В.* Аномальные свойства тонких слоев жидкости. Ультрамикроскопические исследования лиосфер (сольватных оболочек) и элементарного акта набухания // Коллоидный журнал. 1935. Т. 1. Вып. 5. С. 385–398.
5. *Дерягин Б.В., Чураев Н.В.* Изотерма расклинивающего давления пленок воды на поверхности кварца // Докл. АН СССР. 1972. Т. 207. № 3. С. 572–575.
6. *Дерягин Б.В., Чураев Н.В.* Смачивающие пленки. М.: Наука, 1984. 137 с.
7. *Зорин З.М., Соболев В.Д., Чураев Н.В.* Изменение капиллярного давления поверхностного натяжения и вязкости жидкости в кварцевых микрокапиллярах // Поверхностные силы в тонких пленках и дисперсных системах. М.: Наука, 1972. С. 214–221.
8. *Карпенко Ф.С.* Физико-химическая природа прочности глинистых грунтов // Геоэкология. 2019. № 5. С. 48–60.
9. *Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Кальберген Р.Г.* Влияние расклинивающего действия гидратных пленок на прочностные свойства глинистых грунтов // Геоэкология. 2018. № 4. С. 68–74.
10. *Квилдизе В.И., Краснушкин А.В., Злочевская Р.И.* Свойства поверхностных пленок и слоев воды // Поверхностные пленки воды в дисперсных структурах. М.: Изд-во МГУ, 1988. С. 48–67.
11. *Краснушкин А.В., Квилдизе В.И., Ядынина И.В.* К вопросу о растворяющей способности связанной воды // Связанная вода в дисперсных системах. М.: Изд-во МГУ, 1980. № 5. С. 99–104.
12. *Ломтадзе В.Д.* Изменение состава, структуры, плотности и связности глин при уплотнении их большими нагрузками // Тр. Лаборатории гидрогеологических проблем АН СССР. 1955. Т. 12.
13. *Осипов В.И.* Нанопленки адсорбированной воды в глинах, механизм их образования и свойства // Геоэкология. 2011. № 4. С. 291–305.
14. *Осипов В.И.* Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах. М.: ИФЗ РАН, 2012. 72 с.
15. *Осипов В.И., Карпенко Ф.С., Румянцева Н.А.* Активная пористость и ее влияние на физико-химические свойства глинистых грунтов // Геоэкология. 2014. № 3. С. 262–269.
16. *Осипов В.И., Соколов В.Н.* Глины и их свойства. М.: ГЕОС, 2013. 575 с.
17. *Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А.* Микроструктура глинистых пород. М.: Недра, 1979. 211 с.
18. Поверхностные пленки воды в дисперсных структурах / Под ред. Е.Д. Шукина. М.: МГУ, 1988. 279 с.
19. *Рибиндер П.А.* Физико-химическая механика. М.: Знание, 1958. 64 с.
20. *Рибиндер П.А.* Физико-химическая механика дисперсных структур // Сб. статей “Физико-химическая механика дисперсных структур”. М.: Наука, 1966. С. 3–16.
21. Связанная вода в дисперсных системах. М.: МГУ, Вып. 4. 1977.
22. *Сергеев Е.М.* К вопросу о механической прочности дисперсных грунтов // Учен. зап. МГУ. 1949. № 10.
23. *Соколов В.Н.* Физико-химические аспекты механического поведения глинистых грунтов // Инженерная геология. 1985. № 4. С. 28–41.
24. *Соколов В.Н.* Модели микроструктур глинистых грунтов // Инженерная геология. 1991. № 6. С. 32–40.
25. *Соколов В.Н., Осипов В.И.* Влияние различных категорий связанной воды на прочность глин // Связанная вода в дисперсных системах. М.: МГУ, 1977. Вып. 4. С. 4–15.
26. *Филатов М.М.* Основы дорожного строительства. М-Л.: Госстройиздат. 1936. 538 с.
27. Физико-химическая механика природных дисперсных систем / Под ред. Е.Д. Шукина, Н.В. Перцева, В.И. Осипова, Р.И. Злочевской. М.: МГУ, 1985. 263 с.
28. *Шукин Е.Д., Перцев А.В., Амелина Е.А.* Коллоидная химия. М.: МГУ, 1982. 352
29. *Яминский В.В., Пчелин В.А., Амелина Е.А., Шукин Е.Д.* Коагуляционные контакты в дисперсных системах. М.: Химия, 1982. 185 с.
30. *Fukue M., Minato T., Taya N., Chida T.* Thickness of adsorbed water layers for clay particles. Clay science for Engineering, Adachi&Fukue (eds), 2001, Balkama. Rotterdam. ISBN905809175g.
31. *Ravina J., Low P.F.* Relation between swelling, water properties and b-dimension in montmorillonite – water systems // Clays and clay minerals. 1972. V. 20. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1972.0200302>
32. *Read A.D., Kitchiner J.A.* Wetting films of silica // J. Colloid and Interface Sci. 1969. V. 30. № 3. P. 391–398.

PHYSICOCHEMICAL MECHANICS OF DISPERSE POROUS MATERIALS AS A NEW APPROACH TO ASSESSING MECHANICAL STABILITY OF CLAY SOILS

V. I. Osipov^{a,#}, V. N. Sokolov^{b,##}, F. S. Karpenko^{a,###}

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

^b*Geological Faculty, Lomonosov Moscow State University,
Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia*

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

^{##}*E-mail: sokolov@geol.msu.ru*

^{###}*E-mail: kafs08@bk.ru*

Data are presented on the discrepancy between theoretical calculations and experimental results on assessing the strength of fine dispersed bodies including clay soils. Physicochemical processes operating on the surface of dispersed particles are considered upon interaction of latter with water and the formation of adsorbed water films producing disjoining pressure. The presence of films exerting the disjoining effect controls the development of various types of contacts between soil particles in the course of lithogenesis, i.e., coagulation, transitional, and phase contacts. These contacts are the most important factors influencing the behavior of clay soils. The study dwells on the effect of contact types on the state, deformability and stability of clay soils under external impact. It is concluded that the assessment of clay behavior should be based on physicochemical mechanics, patterns of contact interactions in fine-grained soils, and statistical analysis of experimentally obtained parameters of the mechanical properties of clays.

Keywords: *adsorbed water, structured and diffuse water films, disjoining pressure, disjoining pressure isotherm, coagulation, mixed and phase types of contacts, external and internal stresses*

REFERENCES

- [Water in dispersed systems]. Deryagin, B.V., Churaev, N.V., Ovcharenko, N.V. et al., Eds. Moscow, Khimiya Publ., 1989, 288 p. (in Russian)
- Deryagin, B.V. [Theory of stability of colloids and thin films]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 205 p. (in Russian)
- Deryagin, B.V., Kusakov, M.M. [Properties of thin liquid layers]. *Izv. AN SSSR, ser. khim.*, 1936, no. 5, pp. 741–753. (in Russian)
- Deryagin, B.V., Obukhov, E.V. [Anomalous properties of thin layers of liquid. Ultramicroscopic studies of lyospheres (solvation envelopes) and the elementary act of swelling]. *Kolloidnyi zhurnal*, 1935, vol. 1, issue 5, pp. 385–398. (in Russian)
- Deryagin, B.V., Churaev, N.V. [Disjoining pressure isotherm of water films on the quartz surface]. *Dokl. AN SSSR*, 1972, vol. 207, no. 3, pp. 572–575. (in Russian)
- Deryagin, B.V., Churaev, N.V. [Wetting films]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 137 p. (in Russian)
- Zorin, Z.M., Sobolev, V.D., Churaev, N.V. [Changes in capillary pressure, surface tension and liquid viscosity in quartz microcapillaries]. In: [Surface forces in thin films and dispersed systems]. Moscow, Nauka Publ., 1972, pp. 214–221. (in Russian)
- Karpenko, F.S. [Physicochemical nature of the clay soil strength]. *Geokologiya*, 2019, no. 5, pp. 48–60. (in Russian)
- Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Kal'bergenov, R.G. [Disjoining effect of hydrate films on the strength properties of clay soils]. *Geokologiya*, 2018, no. 4, pp. 68–74. (in Russian)
- Kvilidze, V.I., Krasnushkin, A.V., Zlochevskaya, R.I. [Properties of surface films and layers of water]. In: [Surface films of water in dispersed structures]. Moscow, MGU Publ., 1988, pp. 48–67. (in Russian)
- Krasnushkin, A.V., Kvilidze, V.I., Yadygina, I.V. [On the issue of bound water dissolvability]. In: [Bound water in dispersed systems]. Moscow, MGU Publ., 1980, no. 5, pp. 99–104. (in Russian)
- Lomtadze, V.D. [Changes in the composition, structure, density and cohesion of clays during their compaction with heavy loads]. In: [Proc. Laboratory for Hydrogeological Problems, the USSR Academy of Sciences]. 1955, vol. 12. (in Russian)
- Osipov, V.I. [Nanofilms of adsorbed water in clays, mechanism of their formation and properties]. *Geokologiya*, 2011, no. 4, pp. 291–305. (in Russian)
- Osipov, V.I. [Physicochemical theory of effective stresses in soils]. Moscow, IFZ RAN Publ., 2012, 72 p. (in Russian)
- Osipov, V.I., Karpenko, F.S., Rummyantseva, N.A. [Active porosity and its influence on the physicochemical properties of clay soils]. *Geokologiya*, 2014, no. 3, pp. 262–269. (in Russian)
- Osipov, V.I., Sokolov, V.N. [Clays and their properties]. Moscow, GEOS Publ., 2013, 575 p. (in Russian)
- Osipov, V.I., Sokolov, V.N., Rummyantseva, N.A. [Microstructure of clay soils]. Moscow, Nedra Publ., 1979, 211 p. (in Russian)
- [Surface films of water in dispersed structures]. Shchukin, E.D., Ed., Moscow, MGU Publ., 1988, 279 p. (in Russian)
- Rebinder, P.A. [Physicochemical mechanics]. Moscow, Znaniye Publ., 1958, 64 p. (in Russian)
- Rebinder, P.A. [Physicochemical mechanics of dispersed structures]. In: [Collection of articles "Physicochemical mechanics of dispersed structures"]. Moscow, Nauka Publ., 1966, pp. 3–16. (in Russian)
- [Bound water in dispersed systems]. Moscow, MGU Publ., 1977, vol. 4. (in Russian)
- Sergeev, E.M. [On the issue of mechanical strength of dispersed soils]. *Uchenye zapiski MGU*, 1949, no. 10. (in Russian)

23. Sokolov, V.N. [Physicochemical aspects of mechanical behavior of clay soils]. *Inzhenernaya geologiya*, 1985, no. 4, pp. 28–41. (in Russian)
24. Sokolov, V.N. [Models of microstructures of clay soils]. *Inzhenernaya geologiya*, 1991, no. 6, pp. 32–40. (in Russian)
25. Sokolov, V.N., Osipov, V.I. [The influence of various categories of bound water on the strength of clays]. In: [Bound water in dispersed systems]. Moscow, MGU Publ., 1977, issue 4, pp. 4–15. (in Russian)
26. Filatov, M.M. [Fundamentals of road construction]. Moscow-Leningrad, Gosstroyizdat Publ., 1936, 538 p. (in Russian)
27. [Physicochemical mechanics of natural dispersed systems]. Shchukin, E.D., Pertsev N.V., Osipov, V.I., Zlochevskaya, R.I., Eds. Moscow, MGU Publ., 1985, 263 p. (in Russian)
28. Shchukin, E.D., Pertsev, A.V., Amelina, E.A. [Colloidal chemistry]. Moscow, MGU Publ., 1982, 352 p. (in Russian)
29. Yaminskii, V.V., Pchelin, V.A., Amelina, E.A., Shchukin, E.D. [Coagulation contacts in dispersed systems]. Moscow, Khimiya Publ., 1982, 185 p. (in Russian)
30. Fukue, M., Minato, T., Taya, N., Chida, T. Thickness of adsorbed water layers for clay particles. Clay science for Engineering, Adachi, Fukue, Eds., 2001, Rotterdam, Balkama Publ.
31. Ravina, J., Low, P.F. Relation between swelling, water properties and b-dimension in montmorillonite – water systems. *Clays and clay minerals*, 1972, vol. 20. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1972.0200302>
32. Read, A.D., Kitchiner, J.A. Wetting films of silica. *J. Colloid and Interface Sci.*, 1969, vol. 30, no. 3, pp. 391–398.

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 556.531.4

ОЦЕНКА РЕГИОНАЛЬНЫХ ФОНОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ КАК ОСНОВА ИХ МОНИТОРИНГА

© 2024 г. Г. Ю. Толкачев¹, Н. В. Коломийцев^{1,*}, Б. И. Корженевский¹

¹Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова
(ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова),

ул. Большая Академическая 44, к. 2, Москва, 127434 Россия

*E-mail: kolomiytsev@vniigim.ru

Поступила в редакцию 08.11.2023 г.

После доработки 03.04.2024 г.

Принята к публикации 03.06.2024 г.

Для водных объектов наиболее опасными загрязняющими веществами являются микроэлементы Hg, Cd, Zn, Pb, Cu, Cr, Co, Ni, Fe, Mn, As. Исследования донных отложений водоемов позволяют установить неблагополучные участки и определить источники загрязнения. В статье приведена оценка загрязнения донных отложений вышеперечисленными микроэлементами ряда районов Верхней Волги – от Верхневолжских озер до Ивановского водохранилища, на основе сравнения с их фоновыми значениями в отложениях Верхневолжских озер. Результаты исследований загрязненности донных отложений оценены по игео-классам – по загрязненности сорбирующей фракции (<0.020 мм). Приведен сравнительный анализ фоновых значений микроэлементов в отложениях водных объектов Верхней Волги с принятыми значениями в Европе. Дана оценка изменения этих фоновых значений за последние 20 лет. В результате установлено, что для каждой крупной водной системы и каждого географического района необходимо определять собственные региональные фоновые значения и периодически обновлять данные по единой методике. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что, несмотря на значительное количество источников загрязнения, в настоящее время говорить об опасной нагрузке на изученных объектах не приходится.

Ключевые слова: донные отложения, тяжелые металлы, загрязнение, фоновые значения, игео-класс, сорбирующая фракция

DOI: 10.31857/S0869780924040061 EDN: SFQWEY

ВВЕДЕНИЕ

Тяжелые металлы (ТМ) являются частью горных пород и гидросферы. Их количество составляет для Mn, Zn и Cu от десятых до тысячных долей процента в горных породах, в гидросфере это значение обычно на 2–3 порядка ниже [1, 2]. Перераспределение ТМ в водных системах определяется активностью взаимодействия донных отложений (ДО), водной массы и биомасс. ТМ: Hg, Cu, Pb, Cd, Zn, Cr, Ni, Co, при определенных обстоятельствах могут представлять опасность для комфортного существования биоты. При оценке экологического состояния водных объектов из-за сильных флуктуаций расходов воды и концентраций взвешенных и растворенных веществ наиболее целесообразна оценка загрязненности их донных отложений (ДО). Среди важных факторов, определяющих распределение и содержание ТМ в верхнем слое ДО, выделяют генетический состав, размерность частиц ДО и наличие в них

органики [3, 4]. Комплексная оценка эколого-геохимического состояния территории или водотока состоит из нескольких взаимосвязанных блоков, один из которых – оценка природного геохимического фона территории. Она необходима для оценки контрастности техногенных геохимических аномалий, в особенности для сред, для которых не разработаны санитарно-гигиенические нормы (ДО поверхностных водоемов в их числе). Химический состав глобальной экосистемы в различных местах земной поверхности различен и тесно связан с геологическим строением территории, ее литологическим составом [12].

Геохимический фон – понятие региональное. По различным данным при выработке экологических нормативов микроэлементного состава почв следует опираться на природные инварианты содержания микроэлементов в почвах. В прикладной геохимии в качестве минимальных показателей содержания используются значения глобального

распространения элементов, например кларков земной коры и гидросферы [13]. Эти значения используются при подсчете коэффициентов концентрации, по которым можно судить о степени накопления элемента-загрязнителя в какой-либо геохимической системе или ее таксономической части, они называются кларками концентрации. За уровень предельно допустимой концентрации микроэлементов в горных породах следует принять превышение среднего регионального фонового содержания на три средних квадратичных отклонения, при уровне вероятности $p = 0.99$. При этом истинная количественная оценка любого природного или геохимического фона по-прежнему требует тщательного исследования и невозможна без экспертных знаний [13].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Несмотря на многообразие факторов, определяющих состав речных отложений (например, литологический состав грунтов, тип почвы, сельская местность или высокоразвитая промышленность и населенность, а также лесные массивы, концентрация карбонатов и органического вещества), линейные регрессии между 9-ю металлами, определенными во фракциях <2 мкм и <20 мкм, имеют высокие коэффициенты (R^2 тер Pearson) для Cr и Cu (0.94), за которыми следуют Pb (0.90), Cd (0.82), Zn (0.81), Ni (0.76) и Mn (0.72). Низкие и очень низкие коэффициенты найдены для Hg (0.51) и Fe (0.22). Кроме того, гистограммы соотношений металлов <2 мкм и <20 мкм (т.е. наклон линейной регрессии) показывают, что за исключением Cd (1.47) все медианные соотношения других металлов находятся в узком диапазоне (1.24–1.35) [13]. Изучение “мелких” фракции (<2 мкм и <20 мкм) удовлетворяет требованиям мониторинга, инвентаризации и оценки содержания микроэлементов в донных

отложениях. Предпочтение следует отдавать быстрому, простому и экономичному отделению фракции <20 мкм путем просеивания; эта фракция довольно близко соответствует взвешенному веществу в толще водного объекта [6, 14].

В настоящей работе приведен анализ техногенного загрязнения ДО такими ТМ, как Cd, Cu, Pb, Zn, Cr, Co, Ni, Fe, Mn и As. Исследовался участок Верхней Волги, расположенный между озерами Пено и Волго и Иваньковским водохранилищем в районе дер. Городня, а также ряд притоков. Обследования проводились авторами в рамках совместных работ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова и сотрудниками Хайдельбергского ун-та. Участки, выбранные в качестве эталонных, находились вблизи озер Волго и Пено. На водосборной территории произрастают смешанные леса, площадь сельхозугодий не превышает 8–9% [8]. При отборе проб песчаные ДО отбраковывались, преимущество было отдано пробам с повышенным содержанием глинистой фракции. Выделение фракции <0.020 мм проводилось посредством мокрого просеивания. Полученный материал высушивался до воздушно-сухого состояния при температуре не выше 60°C во избежание испарения Hg.

Определение концентраций ТМ в полученном материале проводилось методом атомно-адсорбционной спектроскопии. Использовался пламенный атомно-адсорбционный спектрометр PERKIN ELMER4100. Содержание Hg в пробах определялось на специальных приборах MERCURY ANALYZER с приготовлением отдельного стандарта и реагента. Количество ТМ в образцах ДО эталонных участков – озер Волго и Пено – приведено в табл. 1, в которой также указаны фоновые содержания ТМ, принятые по материалам работ в 1983 г. институтами ИМГРЭ и ИВП РАН [8], и приведены фоновые значения для фракции <0.020 мм, используемые в ФРГ для р. Эльба [15].

Таблица 1. Фоновые значения ТМ в ДО Верхневолжских озер – средние значения из озер Пено и Волго (мг/кг)

ТМ	Для фракции <0.020 мм по [8]	По материалам ИМГРЭ, 1983 г. [8]	Для фракции <0.020 мм по [15]
Cd	0.37	0.3	0.3
Zn	125.6	37.0	95.0
Pb	14.47	19.0	20.0
Cu	18.15	35.0	45.0
Ni	20.57	11.0	68.0
Co	10.67	6.3	19.0
Cr	32.17	29.0	90.0
Hg	0.12	—	0.4
As	3.83	—	13.0
Mn	1162.5	680.0	850.0

Значения, приведенные в качестве фоновых в ФРГ, по умолчанию используются как универсальные практически для всех пресных водоемов, в особенности на которых затруднительно или невозможно определение локальных либо региональных фоновых значений.

В качестве базовой методики оценки степени загрязнения ДО ТМ использовалась система классификации ДО по “индексу геоаккумуляции” [14]. Индекс геоаккумуляции (*I-geo*) характеризует кратность загрязнения ДО относительно природного фона во фракциях грунта <0.020 мм:

$$I\text{-}geo, n = \log_2 (Cn/1.5Bn), \quad (1)$$

где Cn – измеренная концентрация элемента n в донных отложениях (фракция <0.020 мм); Bn – геохимическая фоновая концентрация элемента n по [16] или [1].

Представленная система оценки сходна с оценочной шкалой, приведенной в [9]. Выражение $Cn/1.5Bn$, по сути, представляет собой коэффициент накопления, где фоновое значение дается с определенным запасом [7]. На основании уравнения (1) ДО подразделяются на классы качества по каждому ТМ и мышьяку. Индекс геоаккумуляции также успешно используется для оценки степени загрязненности почв ТМ.

Кроме того, была разработана и применена методика оценки техногенной нагрузки на водные экосистемы [5, 11], что позволяет оценить уровень потенциальной и реальной опасности загрязнения водоемов (табл. 2). По мнению авторов [12], оптимальной на современном этапе является 4-ранговая оценочная структура, разработанная для экосистем. Многолетние исследования экологического состояния водных объектов в бассейнах рек Европы и России показывают хорошую корреляцию техногенной нагрузки, оцененной

по составу ДО, с биологическим состоянием водных экосистем [6].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По результатам исследований были определены фоновые значения микроэлементов для отложений Верхней Волги (см. табл. 1). При сравнении полученных фоновых значений Верхней Волги с фоновыми значениями [15] установлено следующее: значения Mn и Zn превышают глобальные значения по [15] почти в 1.5 раза; значения Cd и Pb достаточно близки; значения остальных элементов значительно ниже, чем у Г. Мюллера (в 2–3 раза) в [15]. Фоновый уровень большинства микроэлементов донных отложений Верхней Волги значительно выше такового в европейских реках, что связано с географическими особенностями, составом почв и характером водосбора. Повышенное относительно европейского фоновое значение Mn в донных отложениях озер Волго и Пено может объясняться болотистыми почвами водосбора с высоким содержанием Fe и Mn в самих почвах, в воде, и, как следствие, в поверхностном стоке в озера с дальнейшей их аккумуляцией.

Понятие “глобальный литературный” геохимический фон по К.К. Turekian К.Н. Wedepohl [16] определяется как среднее для всех типов горных пород: магматических, метаморфических и осадочных. Если один или два типа пород (магматические или метаморфические) отсутствуют на изучаемой территории, что имеет место в бассейнах рек Верхней Волги, а также Оки [7], то региональные фоновые концентрации могут быть существенно ниже, чем их геохимический фон. Для точной оценки техногенного привноса вещества в речные экосистемы необходима постановка специальных исследований, что, в частности,

Таблица 2. Оценка уровня загрязнения донных отложений по игео-классам и техногенной нагрузки на водные экосистемы

Игео-класс	Уровень загрязнения тяжелыми металлами по [14]	Техногенная нагрузка на водные экосистемы по [11]	
0	Незагрязненный	I	Слабая (малоопасная)
1	Незагрязненный до умеренно загрязненного		
2	Умеренно загрязненный	II	Умеренная (умеренно опасная)
3	Средне загрязненный		
4	Сильно загрязненный	III	Сильная (опасная)
5	Сильно загрязненный до чрезмерно загрязненного		
6	Чрезмерно загрязненный	IV	Чрезмерная (чрезвычайно опасная)

Таблица 3. Значения предельных концентраций основных ТМ в ДО по игео-классам, рассчитанные по отношению к их фоновым содержаниям в озерах Пено и Волго по материалам 2000 г.

Элементы	Фон (мг/кг)	Классы геоаккумуляции (игео-классы)						
		0	1	2	3	4	5	6
Hg	0.12	0.18	0.36	0.72	1.44	2.88	5.76	>5.76
Cu	18.15	27.75	55.5	111.0	222.0	444.0	888.0	>888.0
Zn	125.6	188.4	376.8	753.6	1507.2	3014.4	6028.8	>6028.8
Ni	20.57	30.85	61.7	123.4	246.8	493.6	987.2	>987.2
Co	10.67	16	32.0	64.0	128.0	256.0	512.0	>512.0
Pb	14.47	21.7	43.4	86.8	173.6	347.2	694.4	>694.4
Cr	32.17	48.25	96.5	193.0	386	772.0	1544.0	>1544.0
Mn	1162.5	174.37	3487.4	6974.8	13949.6	27899	55798	>55798.4
As	3.83	5.74	11.48	22.96	45.92	91.84	183.68	>183.68
Cd	0.37	0.55	1.1	2.2	4.4	8.8	17.6	>17.6

доказали исследования загрязнения ТМ в бассейне р. Ока, где концентрации ряда элементов (Cr, Ni, Co и Hg) в ДО меньше, чем их глобальный геохимический фон.

Применение формулы расчета игео-классов на основании имеющихся региональных фоновых значений позволяет рассчитать загрязнения элементами отложений по игео-классам, как для изучаемого региона Верхней Волги с ее притоками, так и в целом для р. Волга от оз. Волго до ее устья (табл. 3). Приведенные значения можно использовать также при оценке загрязнения водоемов и водотоков, расположенных в пределах водосборной территории Верхней Волги.

В табл. 4 представлены уровни загрязнения ДО в водоемах Верхней Волги в игео-классах как на основе данных в табл. 3, так и на основе игео-классов по данным G. Mueller [13]. Для обоснования необходимости определения фоновых значений для каждой водной системы проведен сравнительный анализ уровней загрязнения ДО с различными исходными фоновыми значениями.

На основании данных, приведенных в табл. 4, можно отметить, что максимальные уровни загрязнения ДО приурочены преимущественно к устьям рек Вазуза и Тверца. Ниже Твери загрязнение ДО в р. Волга определяется не выше первого игео-класса. Содержания Cu, Zn, Ni, Co, Pb, Cr, As, Cd, Hg в ДО превышают фоновые значения, хотя коэффициенты их концентраций незначительные. Наиболее значительными загрязняющими элементами являются: Pb в устье р. Вазуза и в г. Ржев; Cd и Mn в устье р. Тверца; Zn ниже г. Тверь. При этом их максимальные значения не превышают 2–3 игео-классов по обеим системам и находятся в пределах

умеренно и средне загрязненных уровней, а также умеренной техногенной нагрузки. Сравнение двух расчетных систем загрязнения на основе фоновых значений ТМ в ДО не выявило существенных различий в оценке уровня загрязнения, что объясняется в основном их низким содержанием. Однако при высоких уровнях загрязнения, начиная со средне загрязненного, различия в оценках данных систем будут нарастать и становиться значительными.

Целесообразно оценивать фоновые значения микроэлементов в ДО водных объектов периодически, через определенные промежутки времени. Сравнение фоновых значений двух периодов выявило различие по ряду элементов (см. табл. 1). В 2000 г. существенно выше значения Mn, Zn, Co, Ni, Ag; в то же время значения Pb и Cu существенно ниже; значения Cd и Cr практически одинаковы. При этом техногенная нагрузка на изучаемый участок за этот период осталась практически неизменной либо незначительно снизилась. Данные расхождения могут быть объяснены разницей в методическом подходе к отбору проб ДО. Оба подхода предусматривают получение интегральных значений из значительного количества проб ДО. Вместе с тем методика ИМГРЭ [2] подразумевает отбор проб по площади дна независимо от фракционного и гранулометрического состава ДО, в то время как методики G. Mueller [13] и ВНИИГиМ [11] оперируют исключительно с фракцией <20 мкм, что в свою очередь может приводить к разнице в интегральных оценках загрязнения.

Анализ данных по работам 1983 г. показал слабое загрязнение ДО р. Волга выше г. Тверь. В черте города и ниже по течению реки загрязнение ДО выше. Тот же характер носит загрязнение ДО р. Тверца. Преобладающими загрязняющими

ТМ были Zn и Pb. Отмечено загрязнение устьевых участков рек Тверца и Тьмака. Несмотря на расхождения в фоновых значениях, общий уровень загрязнения ДО Верхней Волги в 2000 г. значительно снизился, что свидетельствует о снижении за прошедший с 1983 г. период техногенной нагрузки на данный участок [8].

В процессе исследования любой крупной водной системы следует измерять фоновые значения ТМ в ДО периодически. Для более корректного сравнения и оценки изменений необходимо использовать единую методику отбора, обработки и анализа проб. В процессе периодических измерений повышение концентраций микроэлементов на фоновых участках свидетельствует об увеличении техногенной нагрузки, что в свою очередь дает основание для выведения этих участков из разряда фоновых и определения более подходящих.

По данным о загрязнении тяжелыми металлами ДО Иваньковского водохранилища также проведен сравнительный анализ расчета и гео-классов по европейскому и региональному фоновым значениям. В отложениях водоемов в черте г. Конаково, в частности в ДО рек Сучок и Донховка, для всех элементов кроме Сг европейские и региональные игео-классы практически повсеместно совпадают, ввиду относительно малых концентраций ТМ. Значения региональных игео-классов Сг на 1–2 пункта выше европейских из-за более низких фоновых значений, и как следствие — более значительного превышения над ним. Максимальный уровень загрязнения

ДО р. Сучок соответствует третьему уровню (т.е. среднему уровню загрязнения), что свидетельствует об умеренной техногенной нагрузке, потенциальной опасности дальнейшего возрастания уровня загрязнения и необходимости в разработке рекомендаций по снижению нагрузки. По европейской системе уровни загрязнения ДО по Сг не превышают 1-й — незагрязненный до умеренно загрязненного, что не совсем соответствует действительному положению и может давать иллюзию отсутствия опасности вторичного загрязнения.

ДО Мошковского залива испытывают серьезную антропогенную нагрузку в результате застройки берегов дачными поселками, активного использования малого водного транспорта, а также сброса сточных вод с Конаковской ГРЭС. Сравнение игео-классов показало их совпадение практически для всех изученных элементов, кроме Сг и Zn. В ряде точек отбора игео-класс Zn соответствует первому региональному и второму европейскому уровню, т.е. меньшей техногенной нагрузке. Игео-классы Сг наоборот, увеличиваются на 1–2 уровня относительно европейских, что составляет довольно существенную разницу.

По региональной шкале загрязнений основной загрязняющий металл в ДО представленных районов Иваньковского водохранилища — хром. Максимальный уровень игео-класса по Сг равен третьему — средне загрязненному, и соответствует умеренно опасной техногенной нагрузке, что свидетельствует о потенциальной опасности вторичного загрязнения и, как

Таблица 4. Уровни загрязнения ДО в водоемах Верхней Волги в игео-классах. Числитель — значения по материалам 2000 г., знаменатель — значения по [8]; Ф — фоновое значение

Пункт отбора проб	Hg	Cu	Zn	Ni	Co	Pb	Cr	Mn	As	Cd	Ag
р. Малая Коша	Ф/Ф	1/Ф	0/1	1/Ф	1/1	1/1	0/Ф	1/2	1/Ф	Ф/Ф	Ф/—
4 км выше г. Ржев	Ф/Ф	0/Ф	0/1	0/Ф	0/0	0/0	0/Ф	2/3	1/Ф	0/0	0/—
г. Ржев, мост	1/0	1/0	0/1	0/Ф	0/0	2/2	0/Ф	0/1	0/Ф	0/0	0/—
5 км ниже г. Зубцов	0/Ф	0/Ф	Ф/0	0/Ф	0/Ф	0/0	0/Ф	0/1	0/Ф	0/0	0/—
Устье р. Вазуза	0/Ф	0/Ф	0/1	0/Ф	0/0	3/2	0/Ф	1/2	1/Ф	0/0	Ф/—
г. Старица, мост	0/Ф	0/Ф	1/2	0/Ф	0/0	1/1	0/Ф	1/2	0/Ф	0/0	Ф/—
6 км ниже г. Старица	Ф/Ф	0/Ф	0/1	0/Ф	0/Ф	0/0	0/Ф	1/2	0/Ф	0/0	Ф/—
пос. Мигалово, выше г. Тверь	Ф/Ф	0/Ф	Ф/0	0/Ф	0/0	Ф/Ф	0/Ф	Ф/0	0/Ф	0/0	Ф/—
Ниже г. Тверь	1/0	2/0	2/3	1/Ф	0/0	1/1	1/Ф	Ф/0	1/Ф	Ф/Ф	2/—
Устье р. Тверца	Ф/Ф	1/0	1/2	0/Ф	0/0	1/1	1/Ф	2/3	1/Ф	2/2	Ф/—
д. Городня	1/0	1/0	1/2	0/Ф	0/0	0/0	0/Ф	Ф/0	0/Ф	Ф/Ф	Ф/—

следствие, о необходимости наблюдения и недопущении возрастания техногенной нагрузки. В то же время по европейской шкале содержание Сг в ДО не вызывает опасений. Таким образом, региональные либо локальные фоновые значения и основанная на них шкала загрязнений ТМ являются приоритетными для каждой крупной водной системы.

ВЫВОДЫ

1. Полученные региональные фоновые значения Hg, Cd, Zn, Pb, Cu, Cr, Co, Ni, Fe, Mn, As позволяют рассчитать загрязнение ими ДО по игео-классам, как для изучаемого региона Верхней Волги с ее притоками, так и для всей р. Волга. Приведенные значения можно использовать также при оценке загрязнения водоемов и водотоков, расположенных в пределах водосборной территории Верхней Волги. Таким образом, региональные либо локальные фоновые значения и основанная на них шкала загрязнений ТМ являются приоритетными для каждой крупной водной системы.

2. Сравнение региональной и глобальной (или европейской) систем на данном этапе не выявило существенных различий по оценке уровня загрязнения. Это объясняется низким уровнем содержания ТМ. По региональной шкале загрязнений основным загрязняющим ТМ в ДО приведенных районов Ивановского водохранилища является Сг — средне загрязненный уровень, что соответствует умеренно опасной техногенной нагрузке, в то время как, согласно европейской шкале, загрязнение незначительно. Однако при высоких уровнях загрязнения, начиная со средне загрязненного, различия в их оценках будут возрастать.

3. Целесообразно оценивать фоновые содержания ТМ в ДО водных систем периодически, через определенные промежутки времени. Для более корректного сравнения и оценки изменений концентрации ТМ в ДО любых водных систем следует использовать единую методику отбора, обработки и анализа проб.

4. При исследовании крупных водных систем значительное повышение концентраций микроэлементов на фоновых участках изучаемых систем свидетельствует о возрастании техногенной нагрузки. Такое повышение концентраций является

основанием для выведения данных участков из разряда фоновых и поиска более подходящих.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградов А.П.* Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 235 с.
2. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Саэт, Б.А. Ревич, Е.П. Янин и др. М.: Недра, 1990. 335 с.
3. *Денисова А.И.* Формирование гидрохимического режима водохранилищ Днепра и методы его прогнозирования. Киев: Наукова думка, 1979. 292 с.
4. *Добровольский В.В.* География микроэлементов. Глобальное рассеяние. М.: Мысль, 1983. 272 с.
5. *Коломийцев Н.В., Корженевский Б.И., Ильина Т.А., Гетьман Е.Н.* Оценка техногенной нагрузки на водные объекты по загрязненности донных отложений // Мелиорация и водное хозяйство. 2015. № 6. С. 15–19.
6. *Коломийцев Н.В., Корженевский Б.И., Толкачев Г.Ю.* Проблемы оценки загрязнения тяжелыми металлами донных отложений речных бассейнов // Экологические системы и приборы. 2018. № 4. С. 9–18.
7. *Коломийцев Н.В., Райнин В.Е., Ильина Т.А. и др.* Исследования загрязненности донных отложений как основа мониторинга состояния водотоков // Мелиорация и водное хозяйство. 2001. № 3. С. 11–15.
8. *Кочарян А.Г., Толкачев Г.Ю., Коломийцев Н.В.* Содержание микроэлементов в донных отложениях Верхней Волги (от Верхневолжских озер до Ивановского водохранилища) // Мелиорация и водное хозяйство. 2006. № 5. С. 25–27.
9. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения поверхностных водотоков химическими элементами / Сост.: Ю.Е. Саэт, Л.Н. Алексинская, Е.П. Янин. М.: ИМГРЭ, 1982. 73 с.
10. *Савич В.И., Парахин Н.В., Сычев В.Г. и др.* Экология почв. Орел: Изд-во Орловского государственного аграрного университета, 2002. 546 с.
11. Техногенное загрязнение речных экосистем / Под ред. В.Е. Райнина и Г.Н. Виноградовой. М.: Научный мир, 2002. 140 с.
12. Экологические функции литосферы / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 2000. 432 с.
13. *Mueller G.* Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins-Veraenderungen seit 1971 // Umschau 79. 1979. H. 24. P. 778–783.
14. *Mueller G., Furrer R.* Pollution of the River Elbe – Past, Present and Future // Water Quality International. 1998. V. 1. P. 15–18.
15. *Mueller G., Ottenstein R., Yahya A.* Standardized particle size for monitoring, inventory, and assessment of metals and other trace elements in sediments: <20 µM or <2 µM? // Fresenius' Journal of Analytical Chemistry. 2001. V. 371. N5. P. 637–642.
16. *Turekian K.K., Wedepohl K.H.* Distribution of the Elements in Some Major Units of the Earth's Crust // Geological Society of America, Bulletin. 1961. V. 72. P. 175–192.

ASSESSMENT OF REGIONAL BACKGROUND VALUES OF BOTTOM DEPOSITS AT WATER BODIES AS THEIR MONITORING BASIS

G. Yu. Tolkachev^a, N. V. Kolomiytsev^{a, #}, B. I. Korzhenevskiy^a

^aKostyakov Federal Research Center for Hydraulic Engineering and Amelioration,
ul. B. Akademicheskaya 44, bld.2, Moscow, 127434 Russia

[#]E-mail: kolomiytsev@vniigim.ru

Microelements Hg, Cd, Zn, Pb, Cu, Cr, Co, Ni, Fe, Mn, As are the most hazardous contaminants for water bodies. The study of bottom deposits in water reservoirs permits the authors us to reveal the endangered sites and determine the contamination sources. The estimation of the bottom sediment contamination by the above-listed microelements is given for a number of the Upper Volga regions, from the Upper Volga lakes to the Ivan'kovskoe water reservoir on the basis of comparing them with the background values for the deposits in the Upper Volga lakes. The results of bottom deposit contamination study have been assessed according to igeo-classes, i.e., the sorbing fraction (<0.020 mm) contamination. The comparative analysis of the background microelement values is performed for the Upper Volga water bodies and the values adopted in Europe. The changes of these background values for the latest 20 years are assessed. As a result, it has been found out that for each major water system and for each geographical region, it is necessary to determine the regional background values of their own and to update data recurrently according to a common procedure. The results obtained permit the authors to conclude that despite numerous contamination sources, the technogenic load at the studied objects cannot be considered hazardous.

Keywords: bottom deposits, heavy metals, contamination, background values, igeo-class, sorbing fraction

REFERENCES

1. Vinogradov, A.P. [Geochemistry of rare and scattered elements in soils]. Moscow, AN SSSR Publ., 1957, 235 p. (in Russian)
2. [Geochemistry of the environment]. Yu. E. Saet, B. A. Revich, E. P. Yanin, et al. Moscow, Nedra Publ., 1990, 335 p. (in Russian)
3. Denisova, A.I. [Formation of the hydrochemical regime of the Dnieper reservoirs and methods of its forecasting]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1979, 292 p. (in Russian)
4. Dobrovol'skii, V.V. [Geography of trace elements. Global scattering]. Moscow, Mysl' Publ., 1983, 272 p. (in Russian)
5. Kolomiytsev, N.V., Korzhenevskiy, B.I., Il'ina, T.A., Get'man, E.N. [Assessment of technogenic pressure on water bodies by pollution of sediments]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaistvo*, 2015, no. 6, pp. 15–19. (in Russian)
6. Kolomiytsev, N.V., Korzhenevskiy, B.I., Tolkachev, G. Yu. [Problems in assessing contamination with heavy metals of bottom deposits of river basins]. *Ekologicheskie sistemy i pribory*, 2018, no 4, pp. 9–18. (in Russian)
7. Kolomiytsev, N.V., Raynin, V.E., Il'ina, T.A., et al. [Studies of sediment contamination as a basis for monitoring the condition of watercourses]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaistvo*, 2001, no. 3, pp. 11–15. (in Russian)
8. Kocharyan, A.G., Tolkachev, G. Yu., Kolomiytsev, N.V. [The content of trace elements in the sediments of the Upper Volga (from the Upper Volga lakes to the Ivan'kovo reservoir)]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaistvo*, 2006, no. 5, pp. 25–27. (in Russian)
9. [Methodological recommendations on geochemical assessment of contamination of surface watercourses by chemical elements]. Yu.E. Saet, L.N. Aleksinskaya, E.P. Yanin. Moscow, IMGRE Publ., 1982, 73 p. (in Russian)
10. Savich, V.I., Parakhin, N.V., Sychev, V.G., et al. [Soil ecology]. Orel: Orel State Agrarian University Publ., 2002, 546 p. (in Russian)
11. [Technogenic pollution of river ecosystems]. V. E. Raynin and G. N. Vinogradova, Eds., Moscow, Nauchnyi Mir Publ., 2002, 140 p. (in Russian)
12. [Ecological functions of the lithosphere]. V. T. Trofimov, Ed., Moscow, MGU Publ., 2000, 432 p. (in Russian)
13. Mueller, G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins-Veraenderungen seit 1971. *Umschau* 79, 1979, vol. 24, pp. 778–783. (in German)
14. Mueller, G., Furrer, R. Pollution of the River Elbe – Past, Present and Future. *Water Quality International*, 1998, vol. 1, pp. 15–18.
15. Mueller, G., Ottenstein, R., Yahya, A. Standardized particle size for monitoring, inventory, and assessment of metals and other trace elements in sediments: <20 µm or <2 µm? *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 2001, vol. 371, no. 5, pp. 637–642.
16. Turekian, K.K., Wedepohl, K. H. Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust. *Geological Society of America Bulletin*, 1961, vol. 72, p. 175–192.

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 556.314

ГЕОХИМИЯ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВА
ПРИРОДНЫХ ВОД СЕВЕРНОЙ ОКРАИНЫ г. КАЗАНЬ© 2024 г. Р. Х. Мусин^{1,*}, А. Р. Идиятуллина^{1,**}, А. Д. Хамитов^{1,***}, К. Р. Миннебаев^{1,****}¹Казанский федеральный университет (КФУ), ул. Кремлевская 18, Казань, 420008 Россия

*E-mail: Rustam.Musin@kpfu.ru

**E-mail: idiyatullina.2001@mail.ru

***E-mail: AyDKhamitov@kpfu.ru

****E-mail: minnebayev17@gmail.com

Поступила в редакцию 13.03.2024 г.

После доработки 21.05.2024 г.

Принята к публикации 03.06.2024 г.

Своеобразной жемчужиной на северной окраине г. Казань являются Голубые озера, представляющие собой уникальные солоноватоводные карстовые озера Среднего Поволжья. На основе полевых и аналитических данных 2023 г. рассматривается геохимия природных вод Голубых озер, рек Солонка и Казанка, восходящих родников. Существенные вариации гидрохимического поля определяются влиянием разгрузки относительно глубинных сульфатных кальциевых вод нижнепермских карбонатно-сульфатных отложений, обладающих минерализацией около 2.5 г/л. Определены доли этих артезианских вод в расходах рек. Они составляют порядка 80% для приустевой части р. Солонка в начальный период летней межени и около 42–60% для нижнего течения р. Казанка в начальный период зимней межени. Максимальные значения глубинных водопритоков отмечаются в речных долинах вдоль зон трещиноватости субмеридиональной и северо-восточной ориентировки. Показана стабильность гидрохимических показателей изученных водных объектов во времени, что определяется высокой скоростью водообмена и невысокой степенью антропогенного воздействия на окружающую среду. Выявлены комплексы микрокомпонентов, концентрирующихся в артезианских и приповерхностных водах. Отмечена необходимость учета условий формирования химического состава природных вод при определении степени их загрязнения по действующим нормативным документам и отделения превышений предельно допустимых концентраций ингредиентов, определяемых природными и антропогенными факторами.

Ключевые слова: р. Солонка, р. Казанка, оз. Голубое, гидрометрия, поверхностные и подземные воды, восходящие источники, микрокомпонентный состав природных вод

DOI: 10.31857/S0869780924040073 EDN: SFPIUY

ВВЕДЕНИЕ

Казань расположена на левобережье Куйбышевского водохранилища, в восточной части Русской равнины. Площадь города составляет около 600 км², население — 1.3 млн человек. Расположение города у крупнейшего в Европе водохранилища и в области достаточного увлажнения определяет значительные ресурсы поверхностных и пресных подземных вод. Площадь города делится примерно на две равные части долиной р. Казанка, впадающей в водохранилище. В городской черте находятся и некоторые притоки Казанки — реки Нокса, Киндерка, Сухая, Солонка, а также около 280 озерных водоемов [16]. Наиболее крупными, широко известными и используемыми в первую очередь в рекреационных целях, являются озера Кабан, Лебяжье, Глубокое, Изумрудное и др.

Водной жемчужиной на северной окраине города является группа озер под общим названием “Голубое”. Они находятся в районе пос. Щербаково (14 км выше устья р. Казанка), где в виде цепочки отдельных водоемов располагаются на I надпойменной террасе правобережной части долины р. Казанка, вытягиваясь вдоль ее русла на 2.5 км в северо-восточном направлении, при удалении от него на 20–100 м. Вода в Голубых озерах солоноватая, и она отличается рядом весьма интересных и специфических особенностей состава. В настоящее время Голубые озера считаются уникальными солоноватоводными карстовыми озерами Среднего Поволжья [26]. Они широко известны, довольно популярны и используются в рекреационных и лечебных целях. Озера возникли на месте мощных восходящих выходов подземных вод (ПВ) нижнепермских отложений.

Эти выходы когда-то именовались Щербаковскими ключами. Их суммарный дебит оценивался в 1.5 м³/с. На одном из них даже функционировала мельница [13, 20]. В 1994 г. с целью сохранения уникальных озерных комплексов был создан государственный природный заказник “Голубые озера” общей площадью около 2000 га.

Наиболее крупное — Большое Голубое озеро, расположено в 0.43 км южнее пос. Щербаково, является юго-западным окончанием цепочки Голубых озер и обладает среди них наибольшими размерами, в связи с чем и получило свое название. Это озеро вытянуто в меридиональном направлении. По данным разных лет [7, 10]: его протяженность — 555–800 м, ширина — до 100 м, площадь водного зеркала 2.73–4.6 га, объем — 20.4–60 тыс. м³, преобладающая глубина — менее 1.5–2.0 м (меньшие значения длины, площади и объема отмечаются в более поздней публикации). Вода поступает из двух карстовых провалов, расположенных в северной части озера и именуемых Большой и Малой пучинами. Первая представляет собой концентрический провал сложной формы в виде трех воронок с крутыми стенками, вложенных одна в другую. Стенки воронок сложены карбонатными породами казанского яруса. Глубина Большой пучины по данным замеров разных лет 13.0–18.3 м, диаметр до 50 м. В центральной части дна имеется узкая труба-понора глубиной до 4 м, возможно и более. Общий расход восходящих струй ПВ — до 680 л/с [7, 13, 26]. Малая пучина находится в 70 м восточнее Большой пучины. Ее глубина — 3.0–6.5 м, диаметр — 5 м. Большое Голубое озеро — сточное, оно отделено от р. Казанка дамбой. Расходы озерной воды по замерам преимущественно летнего периода — 480–900 л/с (в среднем около 850 л/с). На выходе озерной воды через дамбу до середины прошлого столетия функционировала гидроэлектростанция, питавшая располагавшийся здесь дом отдыха [7, 13]. Большое Голубое озеро используется для пеших и водных лодочных прогулок, купания и дайвинга. Голубые озера меньших размеров расположены северо-восточнее пос. Щербаково. Здесь многолюдно в течение всего года, так как они активно используются для оздоровительного купания.

Район расположения Голубых озер является зоной интенсивной разгрузки ПВ нижнепермских отложений, представленных сакмарским ярусом. Их субаэральные и субаквальные выходы отмечаются на значительном протяжении долины р. Казанка, а также в нижней части долины р. Солонка, правого притока Казанки. Устье Солонки находится в 0.9 км южнее южной оконечности Большого Голубого озера. Наиболее мощные восходящие родники отмечаются в русле и по левобережью Солонки в интервале 2.0–2.8 км от ее устья, по западному ограничению расположенного здесь пос. Кадышево. Суммарный дебит субаэральных

выходов оценивается более чем в 400 л/с [13]. Состав этих родниковых вод близок к составу вод Голубых озер. Расход р. Солонка довольно существенно увеличивается в ее нижнем течении, и речная вода становится здесь солоноватой с минерализацией более 1 г/л. В районе расположения Голубых озер возрастают расход и минерализация воды р. Казанка [2, 3], последняя постепенно увеличивается вниз по течению до пос. Большие Дербышки (в 2.4 км ниже устья Солонки), где достигает 1.5–1.7 г/л [11]. По оценкам предшествующих исследований доля ПВ нижнепермских отложений в расходе р. Казанка в районе Голубых озер составляет около 30% [8].

Аномалии гидрохимического поля рассматриваемого района определяются ПВ отложений сакмарского яруса. Он сложен толщей карбонатно-сульфатного состава, в которой выделяются стерлитамакский и тастубский горизонты [6]. Стерлитамакский горизонт выполнен интенсивно трещиноватыми, кавернозными, в определенной степени закарстованными доломитами, гипсами и ангидритами, содержащими прослой известняков, известняковой и доломитовой муки, а также глины и алевролитов. Мощность горизонта может составлять 60 м. Он отличается значительной водообильностью. Дебиты водозаборных скважин достигают 16–20 л/с [8, 13]. Нижележащий тастубский горизонт мощностью 24–38 м сложен массивными ангидритами, гипсами, доломитами.

Тастубский горизонт в рассматриваемом районе, как и на большей части территории Татарстана, играет роль регионального водоупорного горизонта, разделяющего зоны активного и затрудненного водообмена [22]. Кровля сакмарских отложений в районе Голубых озер залегает на гипсометрической отметке ~ 0 м [7], тогда как уровень р. Казанки составляет 53.2 м. Условия формирования химического состава этих ПВ были выявлены еще в середине XX в. Они определяются относительно длительным взаимодействием первичных атмосферных осадков с карбонатно-сульфатными породами сакмарского яруса и перекрывающими их сульфатно-терригенно-карбонатными образованиями казанского яруса, которые характеризуются приповерхностным развитием в зоне Вятского вала — субмеридиональной положительной платформенной структуры, осевая наиболее приподнятая часть которой, характеризующаяся абсолютными отметками до 250–275 м, расположена в 60–90 км северо-северо-западнее Голубых озер. От осевой зоны Вятского вала, где кровля сакмарских отложений залегает на гипсометрических отметках около 200 м, указанные отложения плавно погружаются, а локализованные в них ПВ набирают минерализацию до 2.5 г/л, реже более, примерно соответствующую растворимости гипса в существующих условиях. Ионный состав этих вод преимущественно сульфатный кальциевый [13, 20, 25, 26] (здесь и далее составы природных

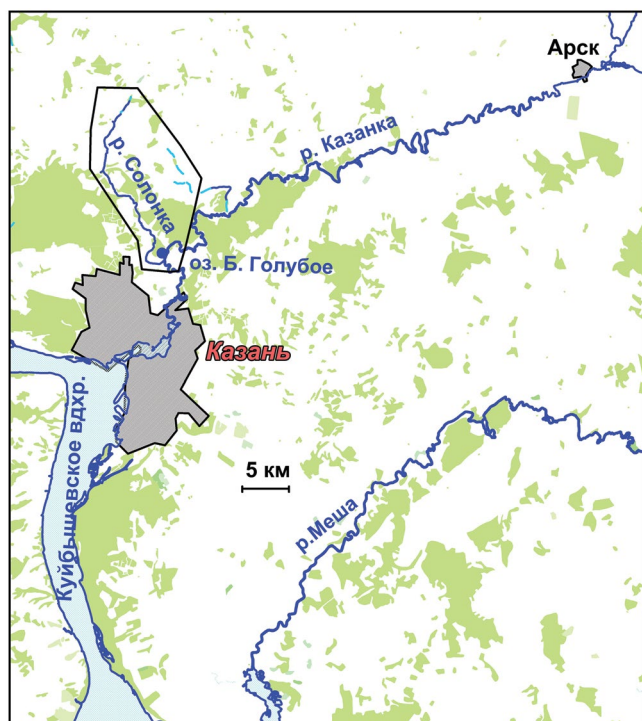


Рис. 1. Обзорная карта с контуром района работ.

вод согласно [21]). Они используются в лечебных целях (органы пищеварения) в санаториях “Казанский”, “Крутушка” и некоторых др.

Пьезометрическая поверхность стерлитамакского водоносного комплекса выше отметок рек в районе Голубых озер на 5–7 м [8], а в речных долинах она превышает и уровни всех вышележащих водоносных комплексов в пермских и плиоцен-четвертичных отложениях. Это является гидродинамической предпосылкой для восходящего перетекания. Наиболее масштабно оно проявлено вдоль ослабленных зон — зон повышенной трещиноватости вдоль долины р. Казанка и склонов локальной изометричной положительной структуры, установленной по кровле нижнеказанского подъяруса с амплитудой 20 м, — так называемого Кадышево-Щербаковского поднятия (р. Солонка в своем нижнем течении делает петлю на этом участке за счет огибания данной структуры) [8, 15].

Голубые озера и реки Солонка и Казанка представляют весьма интересный объект изучения. К настоящему времени имеются довольно полные сведения по их морфометрии, расходам и интенсивности водообмена; гидрохимии, включая изотопные данные; биологической продуктивности, рекреационному потенциалу, уровню антропогенного воздействия [1–4, 7–13, 20, 25, 26, 28 и др.].

Цели настоящего исследования — уточнение геохимии природных вод района расположения Голубых озер и определение доли ПВ стерлитамакских отложений (далее эти воды будут

именоваться артезианскими) в расходах рек Солонка и Казанка.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследованию подверглись водные объекты северной окраины г. Казань в районе пос. Щербаково и Кадышево — оз. Голубые, реки Солонка и Казанка, восходящие родники (рис. 1). В цепочке Голубых озер наиболее крупными являются озера: Большое Голубое, Малое Голубое и Проточное Голубое. Два последних находятся на северо-восточном замыкании озерной цепочки. Некоторые обобщенные данные по рекам и крупным озерам приведены в табл. 1 и 2.

Котловины Голубых озер имеют эрозионно-карстовое происхождение. Основной объем воды в них поступает за счет действия мощных субаквальных восходящих источников — одной из форм разгрузки артезианских вод. Вода озер стекает в р. Казанка. Она имеет голубоватый цвет за счет растворенного сероводорода, высокую прозрачность (на дне Большой пучины видны брошенные монеты), практически постоянную температуру в течение года 4–8°C (озера не замерзают зимой), преимущественно сульфатный кальциевый состав и минерализацию 2.0–2.5 г/л [7, 8, 10, 13, 20, 25, 26]. Вода оз. Большое Голубое по химическому составу аналогична сероводородным источникам курортов Хилово и Краинка [26]. Донные отложения Голубых озер обладают лечебными свойствами за счет своеобразного органо-минерального комплекса [13, 28]. Ил Большого Голубого озера как лечебная грязь используется в упоминавшихся санаториях “Казанский” и “Крутушка”.

Субаквальные восходящие выходы артезианских вод (грифоны) очень часто отмечаются и в руслах Казанки и Солонки. В пределах последней грифоны максимально проявлены вдоль западной окраины пос. Кадышево. Здесь отмечаются и субаэральные восходящие одиночные и групповые родники с расходами, варьирующими от 3–5 до нескольких сот л/с. Родниковая вода по температуре, составу и минерализации идентична воде Голубых озер. Это однозначно указывает на их единый общий источник — стерлитамакский водоносный комплекс.

Реки Солонка и Казанка являются типичными равнинными реками восточно-европейского типа. Основное питание они получают за счет весеннего снеготаяния. Весеннее половодье спадает довольно быстро, и реки переходят на грунтовое питание, обеспечивающее устойчивую межень. Их долины хорошо разработаны и террасированы. Средняя скорость течения — 0.1 м/с [8, 15]. По гидрохимическим показателям качество воды (по [23]) р. Казанка варьирует от слабо загрязненной 2 класса до экстремально грязной 5 класса. При

Таблица 1. Морфометрические характеристики и расходы рек Солонка и Казанка [4]

Река	Протяженность, км	Площадь бассейна, км ²	Густота речной сети, км/км ²	Среднегогодовой расход в устье, м ³ /с
Солонка	25.8	146.8	0.24	0.95
Казанка	140.0	2717.5	0.40	13.2

Таблица 2. Морфометрические и гидрологические данные по Голубым озерам [10]

Характеристики	Оз. Большое Голубое	Оз. Малое Голубое	Оз. Голубое Проточное
Площадь водного зеркала, га	2.73	0.32	0.24
Длина, м	555.0	182.0	276.0
Средняя ширина, м	49.2	17.7	8.6
Объем, тыс. м ³	20.38	2.68	1.31
Максимальная глубина, м	16.0	3.7	2.0
Средняя глубина, м	0.7	0.8	0.6
Время полного водообмена, сут	0.33	0.077	0.125

этом наихудшие показатели качества отмечаются в период зимней межени (декабрь—февраль), качество речной воды ухудшается вниз по течению [9]. По изучению фитопланктона на 6 створах р. Солонка местные условия определяются как олиготрофные, а качество воды как “чистые — умеренно загрязненные воды” [1].

Геологические условия района определяются развитием в верхней части разреза платформенного полифациального комплекса пермских отложений, перекрытых рыхлыми полигенными плиоцен-четвертичными отложениями. Пермские отложения в составе уржумского (P_{2ur}) и казанского (P_{2kz}) ярусов вскрываются на отдельных участках речных долин и в приводораздельных частях склонов. Уржумские образования (мощностью до 50–60 м) отличаются преобладанием в разрезе пестроцветных континентальных глин и алевролитов. Их подошва залегает на абсолютных отметках 90–120 м [6]. Казанскими отложениями, имеющими морской генезис и сульфатно-терригенно-карбонатный состав, выполнено основание и нижние части речных долин. Их мощность может достигать 120 м. Плиоценовый комплекс (N_2) представлен в основном аллювиальными песчано-глинистыми отложениями. Ими выполнены палеодолины крупных рек, в том числе Солонки и Казанки. Палеодолина первой несколько смещена к западу от современного русла, а палеодолина Казанки практически совпадает с современной. Если врез Палео-Солонки не превышает первых десятков метров, то основание Палео-Казанки находится на уровне преимущественно глинисто-карбонатных пород нижнеказанского подъяруса, с размытом залегающих на сакмарских (стерлитамакских) образованиях [6]. Четвертичный комплекс представлен полигенными отложениями неоплейстоцена (Q_1) и голоцена (Q_2). На водоразделах

и их склонах развиты элювиально-делювиальные суглинки мощностью до 10–12 м, а в речных долинах — аллювиальные песчано-глинистые образования мощностью до 46 м, слагающие пойму и надпойменные террасы (одну террасу на р. Солонка и три — на Казанке). В этой осадочной субгоризонтально залегающей толще формируются грунтовые и межпластовые безнапорные и напорные ПВ, формирующие типичные междуречные потоки, связанные водообменом по схеме А.Н. Мятлева. Основной объем их питания вне пределов речных долин приходится на инфильтрацию атмосферных осадков и нисходящее перетекание из вышележащих водоносных горизонтов. В речных долинах довольно существенную роль в приходной части водного баланса начинает играть восходящее перетекание с гидростратиграфического уровня стерлитамакских отложений. Зонами разгрузки ПВ являются овраги, речные долины и озерные котловины.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основными методами исследований были гидрометрическая и гидрохимическая съемки (рис. 2).

Гидрометрические исследования проведены на 8 гидростворах по р. Солонка в конце мая 2023 г. Работы велись согласно наставлениям гидропостам [19]. Глубины измерялись гидрометрической штангой, а скорости течения фиксировались гидрометрической вертушкой С-31 компании ОТТ (Германия). Параллельно с этим проводилось и опробование водопроявлений. Распределение гидропроб: р. Солонка — 14 проб, р. Казанка — 2 (в районе Голубых озер), оз. Голубые — 2 (с большого и одного из малых озер),

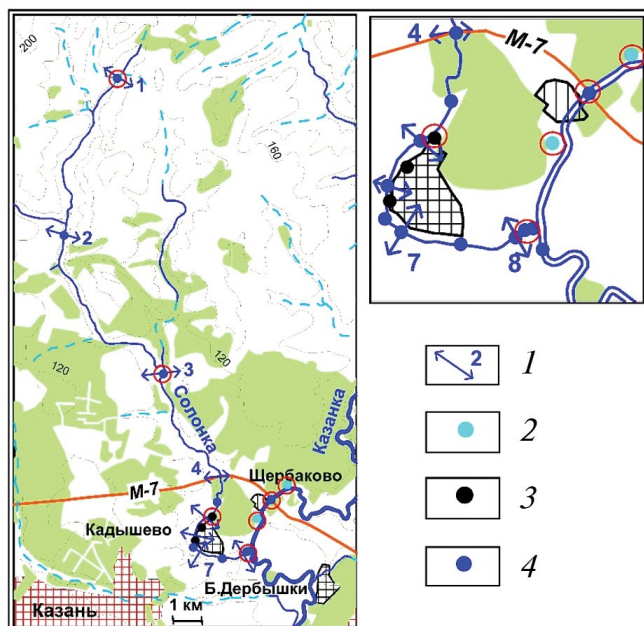


Рис. 2. Карта фактического материала: 1 – гидростворы и их номера; 2–4 – пункты опробования: 2 – оз. Голубые, 3 – восходящих родников, 4 – вод рек Солонка и Казанка. Гидропробы с пунктов опробования, обведенных красной окружностью, проанализированы на ICP-MS.

восходящие родники в долине р. Солонка на западной и северной окраинах пос. Кадышево – 3. Привязка гидростворов и гидропроб проводилась с помощью GPS-приемника.

В гидропробах по соответствующим нормативным документам определялись значения основных интегральных показателей природных вод, а также концентрации макро- и мезокомпонентов. Основная часть последних детектировалась на ионном хроматографе Dionex ICS-1600 компании Thermo Scientific (США) – SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , F^- , PO_4^{3-} , Br^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Li^+ . Гидрокарбонат-ион, перманганатная окисляемость и кремнекислота определялись титрованием, pH – потенциометрическим методом, а электропроводность – кондуктометрическим. Семь проб были проанализированы на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой iCAP Qc фирмы Thermo Scientific (Германия) с определением содержаний 65 элементов от лития до урана. Пробоподготовка осуществлялась с использованием особо чистых реактивов и деионизированной воды. Калибровка спектрометра проводилась на основе мультиэлементных стандартов ICP-MS-68A-A-100, ICP-MS-68A-B-100, ICP-MS-68A-C-100, High Purity Standards (США) с концентрацией в диапазоне от 1 до 1000 мкг/л каждого элемента. Проблема интерференционных наложений эффективно решалась системой KED (Kinetic Energy Discrimination), установленной в спектрометре. Полученные значения концентраций пересчитывались на исходное содержание

с учетом данных по “пустому образцу”, аликвоты образца и разбавления раствора. Концентрации выше предела обнаружения характеризовались следующие 53 элемента (в скобках отмечены пределы обнаружения, нг/л): Li (0.5), Na (448), Mg (1088), Al (2928), K (4328), Ca (188), Sc (0.1), Ti (8.2), V (3.6), Cr (26.8), Mn (0.3), Fe (17.9), Co (1.2), Ni (14.8), Cu (45), Zn (128), Ga (6.4), Ge (0.04), As (0.13), Se (0.01), Rb (0.08), Sr (25.9), Y (0.002), Zr (0.01), Nb (0.8), Mo (34.5), Cd (0.01), Sn (11.7), Sb (15.4), Cs (0.02), Ba (231.1), La (0.02), Ce (0.5), Pr (0.17), Nd (0.01), Sm (0.009), Eu (0.01), Gd (0.002), Tb (0.0008), Dy (0.01), Ho (0.0006), Er (0.0015), Tm (0.00002), Yb (0.0003), Lu (0.01), Hf (0.004), Ta (0.4), Re (0.0002), Tl (0.4), Pb (0.005), Bi (0.2), Th (0.04), U (0.1).

По изученному району имеется довольно значительное количество разновременных (с 1930-х гг.) аналитических данных различной полноты по составу природных вод. По ним максимальная вариабельность характерна для содержаний сульфатов и значений общей жесткости (в первую очередь, за счет ионов кальция). В большинстве случаев, сульфаты определялись гравиметрическим методом, основанным на определении массы осадка сульфата бария, а жесткость и ионы кальция – титриметрическим (комплексометрическим) [24, 27]. Для определения корректности своих аналитических данных и возможности их сопоставления с материалами предшествующих исследований, а также использования последних в расчетах доли артезианских вод в расходе р. Казанка, авторы в каждой из своих 21 гидропробы концентрации сульфатов, ионов кальция и значений жесткости определяли не только ионно-хроматографическим, но и указанными традиционными методами. Оказалось, что разница в концентрациях не превышает 5–10%, а ионно-хроматографические данные, которые и рассматриваются далее, отличаются меньшими значениями. Это позволяет считать корректными как сопоставления гидрогеохимических данных, полученных разными методами и в разное время, так и выводы, сформулированные на их основе.

Для выявления наиболее общих и характерных особенностей состава, а также корреляционных связей между компонентами состава и разными группами природных вод использованы стандартный статистический, а также факторный (в модификации главных компонент) и кластерный анализы. Первый включал определение предельных значений (минимум-максимум), среднего, стандартного отклонения и медианы. Методы многомерной статистики использованы для обработки 7 проб поверхностных и подземных вод с данными по содержаниям значительного числа микрокомпонентов, выявленных масс-спектрометрическим методом.

Расходы р. Солонка увеличиваются вниз по течению. Для каждого гидроствора рассчитывались линейные приращения расхода от истока реки

и на участке между соседними гидростворами по уравнениям:

$$\Delta Q_1 = Q_n / R_n, \quad (1)$$

$$\Delta Q_2 = (Q_1 - Q_{(n-1)}) / (R_1 - R_{(n-1)}), \quad (2)$$

где ΔQ_1 и ΔQ_2 — приращения расходов от истока реки и на участке между соседними гидростворами соответственно (л/с·м); Q_n — расход на определенном гидростворе (л/с), $Q_{(n-1)}$ — расход на предыдущем (выше по реке) гидростворе (л/с); — расстояние определенного гидроствора от истока реки (м), $R_{(n-1)}$ — расстояние предыдущего (выше по реке) гидроствора от истока реки (м).

Для определения доли артезианских вод в расходах рек Солонка и Казанка использовалась формула смешения [14]:

$$Q_a = Q_p (C_p - C_r) / (C_a - C_r), \quad (3)$$

где Q_a и Q_p — расходы артезианских и речных вод (л/с, м³/с); C_a , C_p , C_r — концентрации иона индикатора в артезианских, речных и грунтовых водах соответственно (мг/л).

В качестве иона индикатора обычно используют хлор- или сульфат-ионы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Природные воды района характеризуются весьма изменчивым составом (табл. 3). Максимальной вариабельностью обладают значения минерализации и жесткости, а также концентрации сульфатов и ионов кальция. Более однородное их распределение проявляется при рассмотрении отдельных выборок (табл. 4).

Гидрохимические данные по р. Солонка позволяют выделить в ее пределах два участка. На первом участке, протягивающемся на 20–21 км от истока реки (в табл. 4 он обозначен как верховье

реки), вода относительно слабо минерализованная и умеренно жесткая, концентрации сульфатов и ионов кальция сравнительно незначительные. Второй участок охватывает 5 км нижнего течения (ниже моста автотрассы М-7 “Волга”). Здесь минерализация и жесткость вод практически непрерывно возрастают до приустьевой части реки, при этом основными компонентами состава являются SO_4^{2-} и Ca^{2+} .

С гидрохимическими данными хорошо согласуются и гидрометрические (табл. 5). На первых 20–21 км русла линейные приращения расхода находятся в пределах 0.0052–0.0086 л/с·м, а в нижнем течении (ниже гидроствора № 4) они превышают 0.016 л/с·м. Максимальны эти приращения, достигающие почти 0.5 л/с·м, по западной и юго-западной окраинам пос. Кадышево, где и фиксируются наиболее мощные субаэральные выходы артезианских вод. Более тесная связь гидрохимических и гидрометрических данных проявляется при учете данных по каждому гидроствору (табл. 6). Тесная положительная корреляция в изменении расходов и состава воды р. Солонка обусловлены разгрузкой артезианских вод. Долю этих вод в общем расходе реки и на каждом гидростворе можно определить по ф. (3). В качестве иона индикатора наиболее оптимальный сульфат-ион, так как именно он обладает максимальной информативностью (см. табл. 3, 4, 6).

Для проведения расчетов значения концентраций сульфатов в грунтовых и артезианских водах определены следующим образом:

— в грунтовых водах — 10.3 мг/л (соответствует средней концентрации данного компонента в верхнем течении р. Солонка);

— в артезианских водах — 1393 мг/л (соответствует максимальной концентрации в таком типе вод (см. табл. 4) и близко к содержаниям, которые могут быть обусловлены растворением чистого гипса

Таблица 3. Некоторые показатели состава природных вод района Голубых озер

Типы воды	Минерализация, мг/л	Жесткость, ммоль/л	Электропроводность, мкСм/см	pH	SO_4^{2-} , мг/л
От $HCO_3^-/Mg-Ca$ до SO_4/Ca	369–2443 1521 ± 656 1636	4.3–35.4 19.4 ± 9.2 21.6	279–1813 1215 ± 567 1382	7.13–8.47 7.59 ± 0.31 7.58	7.1–1393 766.8 ± 469 906.1

Окончание таблицы 3 (со сдвигом вправо)

HCO_3^- , мг/л	Cl^- , мг/л	NO_3^- , мг/л	F^- , мг/л	Ca^{2+} , мг/л	$(Na+K)^+$, мг/л
268–427 334 ± 48 329.5	2.3–13.8 7.2 ± 2.4 6.81	0.2–28.8 5.3 ± 6.3 3.83	0.09–1.17 0.34 ± 0.27 0.31	48.1–601.2 308.4 ± 160 336.7	4.0–118.3 40.8 ± 34.9 38.11

Примечание. В этой и в табл. 4 цифровые данные в первой строке — предельные значения (минимум–максимум), во второй — среднее $\pm$ стандартное отклонение, в третьей — медиана.

Таблица 4. Значения наиболее характерных параметров состава поверхностных и подземных вод

Выборка	Кол-во проб	Минерализация, мг/л	Жесткость ммоль/л	SO ₄ ²⁻ , мг/л	Ca ²⁺ , мг/л	Тип воды
р. Солонка (верховья)	4	369–583 471 ± 105 467	4.3–6.0 5.2 ± 0.87 5.23	7.1–18.5 10.3 ± 5.5 7.89	48.1–88.2 69.9 ± 17.9 71.7	HCO ₃ /Mg-Ca
р. Солонка (низовья)	10	1045–1948 1625 ± 355 1748	11.6–25.0 20.4 ± 5.1 22.8	459.7–1118 876.1 ± 259 954.0	152.3–409 315.8 ± 90 348.7	HCO ₃ -SO ₄ /Ca
р. Казанка	2	1272–1282 1277 ± 6.8 1277	16.2–17.2 16.7 ± 0.7 16.7	493.3–559.6 526.5 ± 46.9 526.5	248.5–273 260.5 ± 17.0 260.5	HCO ₃ -SO ₄ /Mg-Ca
Оз. Голубое	2	2258–2382 2320 ± 87.7 2320	29.5–35.4 32.5 ± 4.1 32.5	1328–1335 1331.6 ± 4.5 1331.6	481.0–601 541.1 ± 85.0 541.1	SO ₄ /Ca
Восходящие родники	3	1953–2443 2202 ± 245 2210	22–31.2 28.0 ± 5.2 30.8	993.4–1393 1194.9 ± 200 1198.4	424.8–513 478.3 ± 47.0 497.0	HCO ₃ -SO ₄ /Ca и SO ₄ /Ca

Примечание. В последней графе указан преобладающий тип воды.

Таблица 5. Расходы р. Солонка

№ гидро-створа	Местоположение	Расстояние от истока, км	Расход, л/с	Линейное приращение расхода, л/с·м	
				от истока реки	от предыдущего гидроствора
1	д. Большие Ковали	1.90	16.40	0.0086	—
2	д. Берновые Ковали	8.35	66.08	0.0079	0.0077
3	д. Семиозерка	15.52	80.72	0.0052	0.002
4	Под мостом автотрассы М-7	20.38	131.33	0.0064	0.0104
5	СЗ окраина пос. Кадышево	22.18	359.16	0.0162	0.127
6	З окраина пос. Кадышево	22.75	601.62	0.0264	0.425
7	ЮЗ окраина пос. Кадышево	23.51	948.83	0.0404	0.457
8	Приустьевая часть реки (в 400 м от устья)	25.35	1279.41	0.050	0.180

Примечание. Минимальное значение приращения расхода между гидростворами 2 и 3 связано с тем, что на данном участке река зарегулирована двумя прудами-водохранилищами.

в существующих термодинамических условиях) (табл. 7).

Таким образом, расход р. Солонка в приустьевой части в начальный период летней межени на 80% определяется артезианскими водами, именно они формируют вышеотмеченные особенности изменения расхода реки и состава речной воды в нижней 5-километровой части ее долины. В периоды глубокой зимней межени эта доля может и превышать 80%.

Значительный интерес представляет и определение доли артезианских вод в расходе р. Казанка. Ее средний многолетний годовой расход в устье — 13.2 м³/с (см. табл. 1). Содержания сульфатов на уровне третьей транспортной дамбы

в г. Казань в осенне-зимний период по опробованию 2014–2017 гг. в рамках государственного мониторинга поверхностных водных объектов Республики Татарстан составляли 627–673 мг/л [4]. Осенью 2019 г. концентрации сульфатов на участке от Ленинской дамбы до третьей транспортной дамбы — 616–748 мг/л при минерализации речной воды 0.86–1.55 г/л и ее жесткости 10.7–20.5 ммоль/л [5]. В первой половине XX в. в осенне-зимний период были зафиксированы содержания сульфат-иона — 739–780 мг/л, а в начале зимы (декабрь) 1956 г. — 801.6–853.24 мг/л [11, 13]. Для расчетных процедур можно принять концентрацию сульфатов в приустьевой части р. Казанка в начальный период зимней межени равной 700–800 мг/л. Среднемноголетний расход Казанки в районе

Таблица 6. Наиболее информативные показатели химического состава воды р. Солонка

Пункт опробования	Расстояние от истока реки, км	Тип воды	Минерализация, мг/л	Жесткость, ммоль/л	SO ₄ ²⁻ , мг/л	Ca ²⁺ , мг/л
Г/створ № 1	1.90	HCO ₃ /Mg-Ca	538	5.89	7.91	80.16
Г/створ № 2	8.35	HCO ₃ /Mg-Ca	583	6.00	7.87	88.18
Г/створ № 3	15.52	HCO ₃ /Mg-Ca	369	4.34	7.10	48.10
Г/створ № 4	20.38	HCO ₃ /Mg-Ca	397	4.57	18.50	63.29
С окраина пос. Кадышево	21.47	HCO ₃ -SO ₄ /Mg-Ca	1045	13.20	459.74	152.3
Г/створ № 5	22.18	SO ₄ /Ca	1310	15.60	674.86	248.5
Г/створ № 6	22.75	SO ₄ /Ca	1590	20.00	906.12	324.6
Г/створ № 7	23.51	SO ₄ /Mg-Ca	1948	24.61	1082.2	368.7
ЮВ окраина пос. Кадышево	24.65	SO ₄ /Mg-Ca	1912	24.41	1114.3	360.7
Г/створ № 8	25.35	SO ₄ /Mg-Ca	1945	24.00	1118.5	372.7
Приустьевая часть	25.75	SO ₄ /Mg-Ca	1860	24.01	1083.1	336.7

Таблица 7. Обобщенные данные по величинам разгрузки артезианских вод в р. Солонка

№ г/ створа	Общий расход, л/с	Расход				Линейное приращение между створами, л/с·м	
		артезианских вод		грунтовых вод			
		л/с	%	л/с	%	артезианских вод	грунтовых вод
4	131.33	~0	~0	131.33	100	~0	0.0104
5	359.16	172.62	48.06	186.54	51.94	0.096	0.0307
6	601.62	389.78	64.79	211.84	35.21	0.381	0.0444
7	948.83	735.55	77.52	213.28	22.48	0.455	0.0019
8	1279.41	1025.42	80.15	253.99	19.85	0.158	0.0221

пос. Большие Дербышки за период наблюдений 1932–1955 гг. – 12.6 м³/с [15]. Средняя концентрация сульфатов в зимний период по аналитике 1933–1953 гг. – 852.64 мг/л, а контрольные анализы данных опробования декабря 1956 г. дали значение 759.53 мг/л [11, 13] (к сожалению, более свежие данные по содержаниям здесь сульфатов отсутствуют). Для расчетных процедур можно принять концентрацию SO₄²⁻ на данном участке реки в начальный период зимней межени – 700–850 мг/л. Содержания сульфат-ионов в артезианских водах удобно оставить прежними – 1393 мг/л, а с их значениями в грунтовых водах возникают значительные сложности. Долина р. Казанка в своем среднем и нижнем течении интенсивно дренирует артезианские воды. В связи с этим грунтовые воды долинных плиоцен-четвертичных отложений обладают высокой до 2.5 г/л минерализацией, которая в основном определяется сульфатами

и ионами кальция. В пределах г. Казань концентрации сульфатов в этих водах составляют 79.83–1330 мг/л, при преобладающих значениях более 700 мг/л [13]. В приводимой С.Г. Каштановым выборке есть только два значения – 79.83 и 179.88 мг/л, которые могут отражать содержания сульфатов в грунтовых водах без влияния артезианских вод. По существу, грунтовые воды в хорошо промытых песчано-глинистых аллювиальных плиоцен-четвертичных отложениях долины р. Казанка при их питании атмосферными осадками и за счет латеральной (боковой) фильтрации межпластовых вод из терригенно-карбонатных уржумских и верхнеказанских отложений (коренного обрамления долины) не могут иметь сульфатность более 100–200 мг/л. Так, содержания SO₄²⁻ в притоках р. Волга по ее правобережью в соседнем с изучаемым Верхнеуслонском административном районе в период летней межени, когда их основное питание

Таблица 8. Оценка доли артезианских вод в расходе р. Казанка ($\text{м}^3/\text{с} / \%$)

C_r , мг/л	C_p , мг/л				
	700.0	750.0	850.0	700.0	800.0
	р. Казанка у пос. Б. Дербышки			Устье р. Казанка	
10.3	6.28 / 49.9%	6.74 / 53.5%	7.65 / 60.7%	6.58 / 49.9%	7.54 / 57.1%
100.0	5.85 / 46.4%	6.33 / 50.3%	7.31 / 58.0%	6.13 / 46.4%	7.15 / 54.1%
200.0	5.28 / 41.9%	5.81 / 46.1%	6.87 / 54.5%	5.53 / 41.9%	6.64 / 50.3%

Примечание. C_r и C_p см. формулу (3).

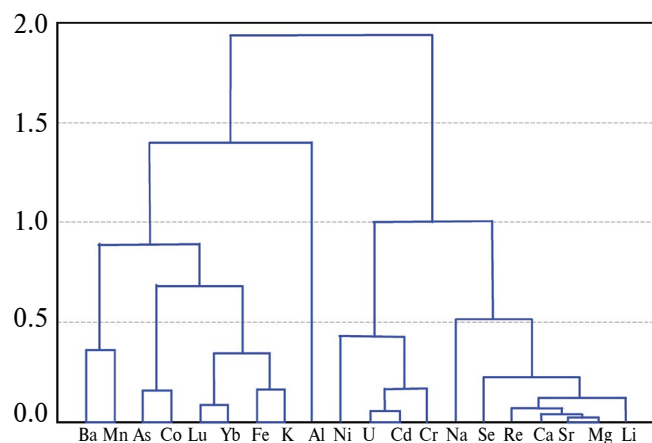


Рис. 3. Кластер-диаграмма связей компонентов состава природных вод (7 проб, мера связи — коэффициент корреляции Пирсона ($1-r$)).

является грунтовым, составляют 6.58–74.89 мг/л, а в ПВ уржумских и верхнеказанских отложений, разгружающихся в эти притоки, — 9.88–158.8 мг/л [18]. При наличии неопределенностей в содержаниях сульфатов в речной воде и грунтовых водах (без влияния разгрузки в грунтовые горизонты артезианских вод) наиболее оптимальным будет диапазонная оценка доли артезианских вод в расходе р. Казанка (табл. 8).

Наиболее вероятная доля артезианских вод в расходах р. Казанка в ее приустьевой части и в створе у пос. Бол. Дербышки в начальный период зимней межени находится в пределах 42–60%. При этом в последнем случае она немного выше несмотря на увеличение вклада артезианских вод в питание реки в направлении ее устьевой части. Это связано с разбавляющим влиянием Куйбышевского водохранилища, воды которого обладают меньшими значениями минерализации и концентраций сульфатов [18, 28], так как самая нижняя часть долины Казанки с 1957 г. представляет собой Казанский залив водохранилища.

Макрокомпонентный состав вод Голубых озер, рек Казанка, Солонка и родников в долине последней изучается длительное время, и он

хорошо известен. К сожалению, это не относится к их микрокомпонентному составу, литературные данные по которому крайне немногочисленны и включают концентрации единичных элементов. Из 53 вышеуказанных элементов, характеризующихся значимыми (ненулевыми) содержаниями по данным масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, 20 можно использовать в геохимических целях, так как они испытывают некоторое концентрирование в определенных типах природных вод (рис. 3, здесь Ca, Mg, Na и K отнесены к микрокомпонентам условно, кластер-диаграмма подтверждается и результатами факторного анализа). Остальные 33 элемента отличаются индифферентным поведением.

Диаграмма наглядно отражает наличие двух крупных кластеров. Первый включает элементы от бария до калия, образован компонентами, которые имеют тенденцию к относительному концентрированию в поверхностных и грунтовых водах. Второй — от лития до никеля, объединяет элементы, обладающие более высокими содержаниями в артезианских водах (табл. 9). Поведение алюминия не так закономерно. Его можно считать аморфным элементом. Диапазон концентраций алюминия 4–60.8 мкг/л, при преобладающих значениях 11.3–25.8 мкг/л. Отдельные повышенные всплески могут отмечаться как в грунтовых, так и в артезианских водах, что и определяет его положение на кластер-диаграмме.

Наиболее информативными элементами, обладающими максимальным накоплением в артезианских водах, являются Li, Mg, Sr, Ca, Re и Se, образующие единый кластер с наиболее тесными положительными корреляционными связями. Данные компоненты имеют тенденцию накопления с увеличением времени взаимодействия в системе “вода-порода”, часть из них по геохимическим свойствам близка к кальцию, являющемуся доминирующим катионом в рассматриваемых природных водах. Информативность рассмотренных 20 микрокомпонентов для разграничения разнотипных вод иллюстрируется другой кластер-диаграммой (рис. 4),

Таблица 9. Микрокомпонентный состав природных вод

Компонент	Водопроявления				
	р. Солонка		р. Казанка, 1 проба	оз. Голубое, 2 пробы	Восходящие родники, 1 проба
	верховья, 2 пробы	приустьевая часть, 1 проба			
Li, мкг/л	5.08–5.34	24.96	26.39	27.8–28.5	28.06
Mg, мг/л	22.9–23.6	60.9	46.5	65.4–67.1	68.1
Sr, мг/л	0.18–0.25	5.21	3.96	6.7–7.2	6.8
Re, мкг/л	0.002–0.003	0.01	0.0096	0.015–0.018	0.016
Se, мкг/л	0.00–0.02	0.057	0.027	0.054–0.057	0.08
Na, мг/л	4.0–6.9	12.9	18.9	12.6–14.8	14.8
U, мкг/л	0.7–1.6	1.6	1.3	2.3–2.4	2.4
Cr, мкг/л	0.9–1.14	1.21	1.61	12.1–15.4	14.4
Cd, мкг/л	0.004–0.02	0.017	0.023	0.05–0.053	0.054
Ni, мкг/л	0.68–0.89	0.99	1.28	1.3–1.9	2.91
Fe, мг/л	0.07–0.12	0.1	0.16	0.0–0.007	0.009
Co, мкг/л	0.1–0.14	0.09	0.10	0.02–0.05	0.07
As, мкг/л	0.66–1.42	0.33	0.67	0.23–0.25	0.13
Ba, мкг/л	59.3–76.9	87.7	55.93	19.1–55.1	17.53
K, мг/л	1.8–2.8	2.35	3.65	1.97–1.98	2.04
Mn, мкг/л	25.9–35.0	118.69	90.58	12.4–12.8	7.85
Yb, нг/л	1.81–3.79	1.16	5.61	0.58–0.97	0.22
Lu, нг/л	0.58–0.82	0.48	2.41	0.000–0.51	0.085

построенной на основе их содержаний. Положение разнотипных водопроявлений на этой диаграмме очень близко к данным табл. 4, составленной на основе содержаний макрокомпонентов. Воды приустьевой части р. Солонка по составу ближе к артезианским водам, а воды Казанки более соответствуют водам верхнего течения Солонки. Это вполне закономерно, учитывая, что доля артезианских вод в расходе р. Солонка в ее приустьевой части составляет 80%, а в расходе р. Казанка на рассматриваемом участке – около 50%.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Особенности макрокомпонентного состава вод оз. Голубое, р. Казанка и восходящих родников на окраине пос. Кадышево (см. табл. 4) хорошо согласуются с данными предшествующих исследований. Практическая неизменность этого состава во времени свидетельствует

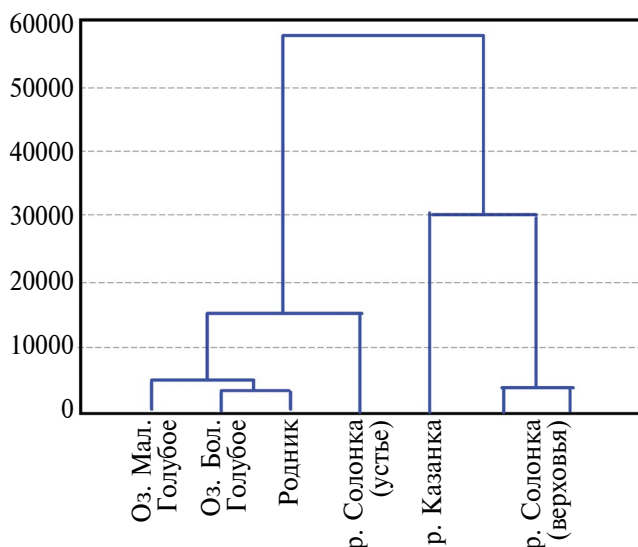


Рис. 4. Кластер-диаграмма связей разнотипных водопроявлений (7 проб, мера связи – Евклидово расстояние).

о постоянстве условий его формирования, обусловленных весьма слабыми вариациями природно-техногенных условий по крайней мере с середины XX в. На стабильность состава вод Голубых озер обращали внимание многие исследователи [10, 12, 26].

Изученные объекты отличаются и проявлениями гидрохимической зональности — вертикальной в Большом Голубом озере и латеральной в реках Казанка и Солонка. В первом случае по мере увеличения глубины озера с 0.7 до 15.0 м минерализация возрастает с 2051 до 2320 мг/л, а концентрации сульфатов и ионов кальция увеличиваются в диапазоне 1309–1390 мг/л и 431–597 мг/л соответственно [12]. Минерализация и жесткость (в первую очередь за счет SO_4^{2-} и Ca^{2+}) вод Казанки постепенно и неуклонно увеличиваются от верховьев к устьевой части реки. Впервые детально это было показано профессором С.Г. Каштановым. Так, в верхнем течении Казанки преобладающая минерализация составляет 300–400 мг/л, вода имеет $\text{HCO}_3^-/\text{Mg}-\text{Ca}$ состав, концентрации сульфатов не превышают 195 мг/л. В среднем течении (на участке Арск-Куркачи) меженная минерализация уже составляет 700–800 мг/л, содержания SO_4^{2-} могут достигать 400 мг/л, а Ca^{2+} — 200 мг/л. В нижнем течении на протяжении 60–70 км происходит неуклонное увеличение концентраций практически всех компонентов, при доминировании SO_4^{2-} и Ca^{2+} , концентрации которых могут достигать 1000 и 400 мг/л соответственно, а минерализация — 1500–1700 мг/л [11, 13]. С созданием Куйбышевского водохранилища в приустьевой части Казанки на протяжении 7–8 км сформировался так называемый Казанский залив, где происходит смешение вод реки и водохранилища, за счет чего, как отмечалось, происходит снижение минерализации и жесткости воды. Проявление этой зональности было подтверждено в ходе масштабных мониторинговых исследований р. Казанка в 2017 г. [3, 9]. Река Солонка отличается близким характером зональности. Минерализация и жесткость речной воды, также в первую очередь за счет SO_4^{2-} и Ca^{2+} , возрастают от верховьев к низовьям. При этом практически линейное увеличение отмечается в нижней части русла (5 км), а верхняя более протяженная 20–21 км его часть отличается стабильными гидрохимическими показателями (см. табл. 6). Природа рассмотренных зональностей обуславливается долей артезианских вод в общем расходе рек, которая увеличивается вниз по их течению, а также степенью разбавления артезианских вод поверхностными и атмосферными водами в случае с Большим Голубым озером.

На большем протяжении р. Солонка (от верховьев до гидроствора № 4) минерализация речной воды не превышает 0.6 г/л, а ее жесткость находится в диапазоне 4.3–6.0 ммоль/л. При этом

концентрации SO_4^{2-} и Ca^{2+} весьма незначительны. Подобные особенности состава характерны и для других малых рек, находящихся в сходных природно-техногенных условиях соседних областей, когда основное питание в меженные периоды осуществляется за счет грунтовых вод, локализованных в аллювиальных четвертичных и карбонатно-терригенных верхне- и среднепермских отложениях [18].

Оценка доли артезианских вод в расходах р. Солонка в ее приустьевой части в 80% в начальный период летней межени представляется весьма достоверной. Об этом свидетельствуют: согласованное поведение гидрохимических и гидрометрических данных; неизменность практически на всем протяжении реки характера верхней части геологического разреза, представленного аллювиальными песчано-глинистыми породами плиоцен-четвертичного возраста и среднепермскими терригенно-карбонатными образованиями; а также высокие значения минерализации и жесткости (за счет SO_4^{2-} и Ca^{2+}), лишь немного уступающие соответствующим параметрам воды Голубых озер.

Довольно верной представляется и авторская 42–60% оценка доли артезианских вод в расходе р. Казанка на участке расположения Голубых озер и в ее приустьевой части. Некоторым подтверждением данной оценки являются расчеты сотрудников Института проблем экологии и недропользования АН РТ: приток в Казанку вод Большого и Малых Голубых озер обеспечивает около 20% суммарного объема речного стока на данном участке (здесь не учитывается вклад р. Солонка с 80% долей артезианских вод в расходе и многочисленных субаквальных и субфлювиальных источников артезианских вод); ежегодно с водами Голубых озер в Казанку поступает 61646 т сульфатов, что составляет 49% от их выноса со стоком реки [28].

Масс-спектрометрическая детекция значительного количества микрокомпонентов и использование для обработки их содержаний (несмотря на малое количество проб) методов многомерной статистики позволило выявить ассоциации компонентов, характеризующихся различной степенью концентрирования в приповерхностных и на более глубинных уровнях гидросферы. Это весьма важно для более точного выявления условий формирования состава природных вод на разных глубинных уровнях, более целенаправленного проведения дальнейших гидрогеохимических исследований, которые, в частности, могут подтвердить и уточнить намеченные закономерности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Природные воды северной окраины г. Казань обладают варьирующими в довольно широких пределах ионным составом и минерализацией. Специфику этой изменчивости во многом определяют подземные воды нижнепермских отложений, обладающие сульфатным кальциевым составом и минерализацией до 2.5 г/л, реже более. Их активная восходящая разгрузка в долинах рек Казанка и Солонка кроме гидродинамической предпосылки должна определяться проявлением интенсивной трещиноватости в пермских осадочных образованиях, а также невысокой мощностью и латеральной невыдержанностью глинистых прослоев в аллювиальном плиоцен-четвертичном долинном комплексе. Повышенная трещиноватость пермского основания речных долин может исходить уже из самого заложения рек, которые обычно тяготеют к ослабленным зонам верхней части земной коры. Некоторые предшествующие исследователи связывали зоны восходящей разгрузки артезианских вод в долине р. Солонка с наличием здесь локальной положительной структуры [7]. Такие структуры обычно характеризуются проявлением растягивающих напряжений, способствующих появлению трещин отрыва в их сводовых частях и на крыльях. Для Кадышево-Щербаковской положительной структуры максимальные артезианские водопритоки фиксируются в зонах субмеридиональной (на участке створов 6 и 7) и северо-восточной (на участке створов 5 и 6) ориентировки, такой же ориентировкой характеризуется цепочка Голубых озер вдоль русла р. Казанка, а минимальные — вдоль зоны субширотного направления (участок между гидростворами 7 и 8).

Отсюда может быть сделан вывод о максимальной проницаемости для артезианских вод трещинных зон субмеридионального и северо-восточного простирания и меньшей проницаемости трещинных зон субширотной и, вероятно, северо-западной ориентировки. Дополнительным фактором, благоприятствующим вертикальной восходящей фильтрации артезианских вод, является наличие положительных структур в верхней части геологического разреза, сводовые части которых расположены в пределах речных долин. Эти данные было бы интересно проверить на других участках долины р. Казанка, а также по долине р. Мёша, протягивающейся параллельно Казанке, расположенной в 30–40 км южнее и также дренирующей артезианские воды. Субширотно-субмеридиональная (ортогональная) и северо-восточная — северо-западная (диагональная) системы трещинных (разрывных) зон являются проявлением планетарной сетки трещиноватости, которая формируется за счет ротационных напряжений в процессе вращения Земли [17].

Разгрузка артезианских вод в долине р. Солонка начинается ниже моста через реку на трассе М-7 (ниже гидроствора № 4), а в долине р. Казанка важную роль она начинает играть в среднем и нижнем течении (ниже г. Арск). Это определяет повышенные значения минерализации, жесткости и сульфатности речных вод. Концентрации сульфатов учитываются при комплексной оценке степени загрязненности поверхностных вод. По действующему нормативному документу [23] они входят в обязательный перечень 15 ингредиентов и показателей качества воды для расчета комплексных оценок загрязненности. В исследованном районе повышенные содержания сульфатов имеют природный характер.

Природные факторы могут обеспечить сверхнормативные содержания в поверхностных водах железа, марганца и легко окисляемой органики (фиксируемой параметром биохимического потребления кислорода (БПК)), которые также фигурируют в этом обязательном перечне ингредиентов. В связи с этим, при расчетах различных показателей загрязнения поверхностных вод (комбинаторного, удельного комбинаторного индекса загрязненности и др.) необходимо учитывать условия формирования состава вод и отделять превышения предельно допустимых концентраций ингредиентов, определяемых природными и антропогенными факторами. Только в таком случае можно получить объективную пространственно-временную картину загрязненности поверхностных вод.

Очень важным обстоятельством является постоянство во времени (по крайней мере с середины XX в.) качественных показателей природных вод в изученном районе. Это свидетельствует о неизменности природно-техногенных условий, в первую очередь, за счет высокой скорости водообмена и невысокой интенсивности техногенного пресса.

Артезианские воды отличаются от грунтовых и поверхностных вод в районе Голубого озера концентрированием следующих микрокомпонентов: Li, Sr, Re, Se, Cr, U, в меньшей степени Cd и Ni. В поверхностных и грунтовых водах отмечаются более высокие содержания — Ba, Fe, Mn, As, Co. Критическое использование этих данных при дальнейших исследованиях также было бы весьма целесообразным.

Авторы выражают глубокую благодарность руководству и сотрудникам лаборатории геохимии, изотопного и элементного анализа Казанского федерального университета за проведенный анализ 7 гидропроб на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой iCAP Qc.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамова К.И., Токинова Р.П.* Фитопланктон р. Солонка // Российский журнал прикладной экологии. 2022. № 4 (32). С. 66–70.
2. *Багаутдинова К.И.* О влиянии напорной разгрузки сульфатных вод на состав воды р. Казанка в пределах Кадышево-Шербаковского поднятия // Геология в развивающемся мире: сб. науч. тр.: в 2 т. Пермь, 2013. Т. 2. С. 135–138.
3. *Валиев В.С., Иванов Д.В., Шагидуллин Р.Р. и др.* Вероятностная оценка загрязнения поверхностных вод (на примере реки Казанка) // Вода: химия и экология. 2019. № 1–2. С. 69–76.
4. Водные объекты Республики Татарстан. Гидрографический справочник. Казань: Изд-во “Фолиант”, 2018. 512 с.
5. *Гиззатуллин И.Р., Афлятунов Р.Ф., Ереев Д.А.* Гидрогеоэкологические условия г. Казани на основе качественных показателей поверхностных вод // Геология в развивающемся мире [Электронный ресурс]. Пермь, 2020. С. 531–535. URL: http://www.psu.ru/files/docs/science/books/sborniki/geolog_v_gazv_mire_2020.pdf.
6. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000. Серия Средневожская. Лист N-39-II (Казань). СПб: Изд-во СПб карт-фабрики ВСЕГЕИ, 2003.
7. *Дедков А.П., Мозжерин В.И.* Голубое озеро // Геологические памятники природы Республики Татарстан. Казань: Акварель-Арт, 2007. С. 98–105.
8. *Жаркова Н.И., Хузин И.А., Нуриев И.С., Серебренникова И.А.* Кадышево-Шербаковский полигон // Геология Приказанского района. Путеводитель по полигонам учебных геологических практик. Казань: ЗАО “Новое знание”, 2007. С. 107–137.
9. *Иванов Д.В., Валиев В.С., Шагидуллин Р.Р. и др.* Оценка вклада загрязняющих веществ в формирование качества вод реки Казанка // Сб. тр. IX Междунар. конгресса “Чистая вода. Казань”. Казань: ООО “Новое знание”, 2018. С. 114–118.
10. *Иванов Д.В., Зиганшин И.И., Мухаметзянова Л.К.* Воздействие рекреационной деятельности на природные комплексы заказника “Голубые озера” // Устойчивое развитие особо охраняемых природных территорий. Сб. статей IX Всерос. науч.-практ. конф. Сочи, 06–08 октября 2022 г. Сочи: Донской издательский центр, 2022. С. 205–212.
11. *Каштанов С.Г.* Гидрохимическая характеристика р. Казанки // Ученые записки Казанского гос. ун-та. 1957. Т. 117. Кн. 9. С. 282–290.
12. *Каштанов С.Г.* Голубое озеро // Изв. ВГО. 1975. Т. 107. Вып. 4. С. 364–367.
13. *Каштанов С.Г.* Подземные воды г. Казани. Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1979. 96 с.
14. *Коротков А.И.* Гидрогеохимический анализ при региональных геологических и гидрогеологических исследованиях. Л.: Недра, 1983. 231 с.
15. *Малышева О.Н., Нелидов Н.Н., Соколов М.Н.* Геология района г. Казани. Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1965. 96 с.
16. *Мингазова Н.М., Деревенская О.Ю., Палагушкина О.В. и др.* Инвентаризация и экологическая паспортизация водных объектов как способ сохранения и оптимизации их состояния // Астраханский вестник экологического образования. 2014. № 2 (28). С. 37–43.
17. Михайлов А.Е., Хаин В.Е. Общая геотектоника. М.: Недра, 1985. 326 с.
18. *Мусин Р.Х., Сарычев Д.В., Хамитов А.Д., Ахметова А.А.* Характер и динамика изменения во времени состава природных вод в окрестностях г. Казани // Геология, полезные ископаемые и проблемы геологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий: матер. XIV Межрегион. науч.-практ. конф., Уфа, 23–26 мая 2022 г. М.: Изд-во «Перо», 2022. С. 105–110.
19. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6. Ч. I. Гидрологические наблюдения и работы на больших и средних реках. Гидрометеослужба СССР, 1977. URL: http://mgmtmo.ru/edumat/rd/nast_gmsp_6_1.pdf.
20. Озера Среднего Поволжья. Л.: Изд-во Наука, 1976. 236 с.
21. Отраслевой стандарт. Воды подземные. Классификация по химическому составу и температуре. М.: ВСЕГИНГЕО, 1986. 12 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/471823632>.
22. Подземные воды Татарии / Под ред. М.Е. Королева. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1987. 189 с.
23. РД 52.24.643–2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. Ростов-на-Дону: ГХИ Росгидромета, 2002. 53 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/10d/4293831806.pdf>.
24. *Резников А.А., Муликовская Е.П., Соколов И.Ю.* Методы анализа природных вод. Изд. 3-е, дополн. и перераб. М.: Недра, 1970. 488 с.
25. *Селивановский Б.В., Макаров Н.Е., Батыр В.В.* Гидрохимические фации подземных вод из нижней перми на южном окончании Вятского вала // ДАН СССР. 1949. Т. 68. № 2. С. 369–373.
26. Уникальные экосистемы солоноватоводных карстовых озер Среднего Поволжья / Под ред. А.Ф. Алимова и Н.М. Мингазовой. Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2001. 256 с.
27. Унифицированные методы анализа вод / Под ред. Ю.Ю. Лурье. Изд. 2-е, испр. М.: Химия, 1973. 376 с.
28. *Шагидуллин Р.Р., Иванов Д.В., Горшкова А.Т. и др.* Качество воды в реке Казанка: теоремы и аксиомы // Сб. тр. VIII Междунар. конгресса “Чистая вода. Казань”. Казань: ООО “Новое знание”, 2017. С. 258–262.

GEOCHEMISTRY AND FORMATION CONDITIONS OF THE NATURAL WATER COMPOSITION IN THE NORTHERN OUTSKIRTS OF KAZAN

R. Kh. Musin^{a, #}, A. R. Idiyatullina^{a, ##}, A. D. Khamitov^{a, ###}, K. R. Minnebaev^{a, ####}

^aKazan Federal University (KFU), Kremlevskaya ul. 18, Kazan, 420008 Russia

[#]E-mail: Rustam.Musin@kpfu.ru

^{##}E-mail: idiyatullina.2001@mail.ru

^{###}E-mail: AyDKhamitov@kpfu.ru

^{####}E-mail: minnebaev17@gmail.com

Kazan is located on the left bank of the Kuibyshev water reservoir in the east of the Russian Plain. The Blue Lakes, which are unique salt-water karst lakes in the Middle Volga region, appear to be a real natural treasure in the northern outskirts of the city. On the basis of field and analytical data obtained in 2023, the geochemical composition of the natural water is studied in the Blue Lakes, the Solonka and Kazanka rivers, uprising springs, and snow cover. Significant variations in the hydrochemical field are controlled by the effect of discharging relatively deep sulfate calcium groundwater from the lower Permian carbonate-sulfate deposits with a mineralization of about 2.5 g/l. The shares of these artesian waters in the river discharge have been determined. They are about 80% for the mouth of the Solonka River in the initial period of summer low water and about 50–60% for the lower reaches of the Kazanka River in the initial period of winter low water. Maximum values of deep water inflows are observed in river valleys along fracture zones of submeridional and northeastern orientation. The stability of hydrochemical parameters in the studied water bodies over time is shown, which is due to a high rate of water exchange and a low anthropogenic impact on the environment. Complexes of microcomponents concentrated in artesian and near-surface waters have been identified. In artesian waters such components are: Ca, Sr, Mg, Li, U, Re, Se; and in the near-surface – K, Fe, Mn, Ba, As, Co. It is noted that in order to determine the degree of surface water pollution, it is important to take into account the conditions of their composition formation and to distinguish between excess concentrations caused by natural and anthropogenic factors.

Keywords: Solonka river, Kazanka river, Blue lake, hydrometry, surface- and groundwater, uprising springs, microcomponent composition of natural water

REFERENCES

- Abramova, K.I., Tokinova, R.P. [Phytoplankton of the Solonka River]. *Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii*, 2022, no. 4 (32), pp. 66–70. (in Russian)
- Bagautdinova, K.I. [On the influence of pressure discharge of sulfate waters on the composition of the Kazanka River water within the Kadyshovo-Shcherbakovskii uplift]. *Geologiya v razvivayushchemsya mire*, 2013, vol. 1–2, pp. 135–138. (in Russian)
- Valiev, V.S., Ivanov, D.V., Shagidullin, R.R. et al. [Probabilistic assessment of surface water pollution (by the example of the Kazanka River)]. *Voda: khimiya i ekologiya*, 2019, vol. 1–2, pp. 69–76. (in Russian)
- [Water objects in the Republic of Tatarstan. Hydrographic guide]. Kazan, "Foliant" Publ., 2018, 512 p. (in Russian)
- Gizatullin, I.R., Aflyatunov, R. F., Ereev, D.A. [Hydrogeoecological conditions of Kazan city on the basis of qualitative indicators of surface waters]. In: [Geology in the developing world]. Perm, pp. 531–535. URL: http://www.psu.ru/files/docs/science/books/sborniki/geolog_v_razv_mire_2020.pdf (in Russian)
- [State geological map of the Russian Federation, scale 1:200000. Middle Volga series. Sheet N-39-II (Kazan)]. St. Petersburg, Karpinsky Russian Geological Research Institute, 2003. (in Russian)
- Dedkov, A.P., Mozzherin, V.I. [Blue Lake. Geological monuments of nature in the Republic of Tatarstan]. Kazan, Akvarel-Art, 2007. pp. 98–105. (in Russian)
- Zharkova, N.I., Khuzin, I.A., Nuriev, I.S., Serebrennikova, I.A. [Kadyshovo-Shcherbakovsky test site]. In: [Geology of Kazan region. Guide to training grounds for geological practices]. Kazan, "Novoye znaniye" Publ., 2007, pp. 107–137. (in Russian)
- Ivanov, D.V., Valiev, V.S., Shagidullin, R.R. et al. [Assessment of the contribution of pollutants to the formation of the water quality in the Kazanka River]. Proc. IX Int. Congress "Clean Water. Kazan". Kazan, "Novoye znaniye" Publ., 2018, pp. 114–118. (in Russian)
- Ivanov, D.V., Ziganshin, I.I., Mukhametzyanova, L.K. [The impact of recreational activities on the natural complexes of the "Golubye ozera" reserve]. In: [Sustainable development of specially protected natural areas]. Proc. IX All-Russia Sci. and Pract. Conf., Sochi, October 6–8, 2022. Sochi, Donskoi Publ. Center, 2022, pp. 205–212 (in Russian)
- Kashtanov, S.G. [Hydrochemical characteristics of the Kazanka river]. In: [Scientific notes of Kazan state university]., 1957, vol. 117, book 9, pp. 282–290. (in Russian)
- Kashtanov, S.G. [The Blue Lake]. *Izvestia VGO*, 1975, vol. 107, no. 4, pp. 364–367. (in Russian)
- Kashtanov, S.G. [Groundwater in Kazan]. Kazan, Kazan University Publ. House, 1979, 96 p. (in Russian)
- Korotkov, A.I. [Hydrogeochemical analysis in regional geological and hydrogeological studies]. Leningrad, Nedra Publ., 1983, 231 p. (in Russian)
- Malysheva, O.N., Nelidov, N.N., Sokolov, M.N. [Geology of the Kazan region]. Kazan, Kazan University Publ. House, 1965, p. 96. (in Russian)
- Mingazova, N.M., Derevenskaya, O. Yu., Palagushkina, O.V. [Inventory and environmental certification of water bodies as a way to conservation and optimization of their state]. *Astrakhanskii vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*, 2014, no. 2, pp. 37–43. (in Russian)
- Mikhailov, A.E., Khain, V.E. [General geotectonics]. Moscow, Nedra Publ., 1985, p. 326. (in Russian)

18. Musin, R. Kh., Sarychev, D.V., Khamitov, A.D., Akhmetova, A.A. [The nature and dynamics of changes over time in the composition of natural waters in the vicinity of Kazan]. In: [Geology, mineral resources and geoecological problems in Bashkortostan, Urals, and adjacent areas]. Moscow, 2022, pp. 105–110. (in Russian)
19. [Instructions for hydrometeorological stations and posts. Issue 6. Part I. Hydrological observations and work on large and medium-sized rivers]. Hydrometeorological Service of the USSR, 1977. URL: http://mgmtmo.ru/edumat/rd/nast_gmsp_6_1.pdf (in Russian)
20. [Lakes in the Middle Volga region]. Leningrad, Nauka Publ., 1976, p.236. (in Russian)
21. [Industry standard. Underground water. Classification by chemical composition and temperature]. Moscow, VSEGINGEO, 1986, p.12. (in Russian)
22. [Underground waters of Tatar Republic]. Korolev M. E., Ed. Kazan, Kazan University Publ., 1987, 189 p. (in Russian)
23. [RD24.643–2002. Method for a comprehensive assessment of the surface water pollution degree based on hydrochemical indicators]. Rostov-on-Don, GKHI Rosgidromet Publ., 2002, 53 p. (in Russian)
24. Reznikov, A.A., Mulikovskaya, E.P., Sokolov, I. Yu. [Methods for analyzing natural waters]. Moscow, Nedra Publ., 1970, issue 3, 488 p. (in Russian)
25. Selivanovskii, B.V., Makarov, N.E., Batyr V.V. [Hydrochemical facies of groundwater from the Lower Permian deposits at the southern end of the Vyatka ridge]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1949, vol. 68, no. 2, pp. 369–373. (in Russian)
26. [Unique ecosystems of brackish karst lakes in the Middle Volga region]. Alimov A. F., Mingazova N. M., Eds., Kazan, Kazan University Publishing House, 2001, p. 256. (in Russian)
27. [Unified methods of water analysis]. Lurie Yu. Yu., Ed., Moscow, Khimiya Publ., 1973, 376 p. (in Russian)
28. Shagidullin, R.R., Ivanov, D.V., Gorshkova, A.T. et al. [Water quality in the Kazanka River: theorems and axioms]. Proc. of the VIII Intern. Congress. Kazan, “Novoye znaniye” Publ., 2017, pp. 258–262. (in Russian)

УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

УДК 502/504

**ОЦЕНКА ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ
ДЛЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ СХЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ
С ТВЕРДЫМИ КОММУНАЛЬНЫМИ ОТХОДАМИ**

© 2024 г. И. В. Козлякова^{1,*}, О. Н. Ерёмина¹, Е. Р. Романова¹,
А. Г. Хайрединова¹, Е. С. Чуткерашвили¹

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

*E-mail: ivk.geoenvironment@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.05.2024 г.

После доработки 28.05.2024 г.

Принята к публикации 20.07.2024 г.

Рассмотрены современные тенденции развития системы управления отходами, и указано на проблемы использования пространственной геологической информации, заключающиеся в сложности ее объединения с другими данными в общей системе обращения с отходами. Предложен методологический подход к использованию цифрового картографирования для учета особенностей геологической среды в территориальной схеме обращения с отходами на примере Московской области. В программе QGIS проведено оценочное районирование репрезентативной территории по благоприятности для размещения твердых коммунальных отходов в зависимости от наличия слабопроницаемых пород в геологическом разрезе.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, управление отходами, захоронение отходов, загрязнение, районирование, цифровое картографирование, защищенность геологической среды, территориальная схема обращения с отходами, геоэкологическая безопасность

DOI: 10.31857/S0869780924040081 EDN: SFLUSN

ВВЕДЕНИЕ

*Некоторые современные тенденции в области
обращения с твердыми коммунальными
отходами (ТКО)*

В сфере обращения с ТКО исследования геологической среды необходимы, в первую очередь, когда речь идет об их захоронении на полигонах. В этом случае, отходы часто непосредственно контактируют с подстилающими и вмещающими горными породами, а риск поступления загрязнения из свалочного тела в толщу пород и подземные воды может быть очень велик. В журнале *Environmental Science and Pollution Research* в 2022 г. был представлен исчерпывающий обзор публикаций последнего времени, посвященных исследованиям загрязнения окружающей среды, обусловленного захоронением отходов на полигонах и свалках во многих странах мира [15]. Авторы описывают так называемые “санитарные свалки” (sanitary landfills) — специально оборудованные понижения (естественные или искусственные) для захоронения отходов

с изолирующим слоем в днище и бортах и системой отвода образующихся газов и утилизации фильтрата. В обзоре отмечается, что даже для них существует большая вероятность подземного загрязнения из-за высокой токсичности воды, поступающей из захороненных отходов.

Воздействие фильтрата из свалочного тела на качество подземных вод в окрестностях полигона отходов может быть значительным. В развивающихся странах, где большая часть полигонов отходов построены без какой-либо изоляции от вмещающего массива горных пород, загрязнение подземных вод компонентами свалочного фильтрата наблюдается в радиусе до 1 км от их границ [13].

В.И. Осипов и др. [8] отмечают, что “важнейшей задачей при создании полигона является изолирование его основания. Наиболее благоприятной ситуацией следует считать наличие природного барьера достаточной мощности, сложенного породами (например, глинистыми) с низким коэффициентом фильтрации. При отсутствии природных барьеров допускается применение многобарьерной защиты с сочетанием природных и техногенных барьеров”.

Авторы используют термин “безопасный полигон”, понимая под этим, что отходы полностью изолированы от окружающей среды, а полигон оборудован системой отвода фильтрата и биогаза. Полигон можно считать безопасным в том случае, если на нем захораниваются только биоразлагаемые отходы, прошедшие предварительную сортировку.

Многобарьерная защита предусматривает использование комплекса организационно-технических мероприятий, направленных на снижение эмиссии загрязняющих веществ (ЗВ) от полигона в окружающую среду. В организации полигонов захоронения выделяются три основные группы барьеров, обеспечивающих минимальное поступление ЗВ в окружающую среду. К ним относят: качество отходов, поступающих на захоронение после предварительной сортировки; естественную (природную) защиту — прежде всего наличие слабопроницаемых пород в основании полигона; искусственную защиту — использование специальных технологических решений [11].

Инженерно-геологическая оценка территории для выбора участков размещения отходов основывается на том положении, что существование в геологическом разрезе природных барьеров, препятствующих поступлению загрязнения с поверхности в грунтовые толщи и подземные воды, значительно упрощает задачу сохранения благоприятной экологической обстановки в районах полигонов и предприятий утилизации ТКО [6, 12].

Захоронение ТКО на полигонах влечет за собой серьезный риск ущерба для геологической среды. В России многие из таких объектов эксплуатируются давно и возникли стихийно из старых свалок в отработанных карьерах. Практически повсеместно выбор места размещения ТКО проводился без учета геологических и экологических критериев. Но даже в случае, если соблюдены все требуемые нормативами меры защиты, нельзя полностью исключить поступление ЗВ в геологическую среду на территории размещения полигона ТКО. Для объектов повышенной экологической опасности всегда требуется рассмотрение пессимистичного сценария развития событий.

В вопросах обращения с ТКО лица, принимающие решения, находятся в очень непростой ситуации. С одной стороны, социальная напряженность в связи с размещением отходов и предприятий по их утилизации в районах тех или иных населенных пунктов, с другой — экологические и геоэкологические ограничения.

Существует мнение, что от захоронения отходов вообще следует отказаться, а инженерно-геологические и геоэкологические исследования направлять только на рекультивацию загрязненных территорий [7].

В последнее время в систему управления ТКО приходят современные технологии и применение методов науки о данных¹. К разделам управления ТКО, которые могут извлечь наибольшую пользу из информации, основанной на данных, относят прогнозирование образования отходов, оптимизацию маршрутов сбора и развитие технологий переработки. Перспективы расширения роли науки о данных заключаются в привлечении геоинформационных исследований для управления отходами. Например, картирование горячих точек образования отходов в режиме реального времени, прогнозирование емкости свалок, оптимизация маршрутов сбора отходов с использованием данных о дорожном движении в реальном времени [14].

Проблема использования пространственной геологической информации заключается, главным образом, в ее специфическом, преимущественно нецифровом (растровом или бумажном) формате. Информация с геологических карт и разрезов трудно совместима с прочими характеристиками объектов ТКО. Необходим такой подход, который бы обеспечивал возможность объединения геологической информации с другими данными в системе обращения с отходами.

О ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ СХЕМЕ ОБРАЩЕНИЯ С ТКО

В России геологические и геоэкологические исследования для целей обращения с ТКО на региональном уровне, т.е. для отдельных субъектов Российской Федерации (РФ), в основном, имеют своей целью совершенствование территориальных схем обращения с отходами. В состав территориальных схем большинства областей РФ входит электронная модель, под которой понимается “информационная система, включающая в себя базы данных, программное и техническое обеспечение, предназначенные для ввода, хранения, актуализации, обработки, анализа, представления, визуализации данных о системе организации и осуществления на территории субъекта РФ деятельности по накоплению (в том числе раздельному накоплению), сбору, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию, размещению отходов, образующихся на территории субъекта РФ, и (или) отходов, поступающих из других субъектов РФ” [9].

Электронная модель территориальной схемы включает, как правило, пространственную информацию о расположении источников отходов;

¹ Наука о данных — раздел информатики, который изучает проблемы анализа, обработки и представления данных в цифровой форме. Основная практическая цель профессиональной деятельности в науке о данных — обнаружение закономерностей в данных и извлечение знаний из данных в обобщенной форме.

местах сбора и накопления отходов; количестве образующихся отходов; целевых показателях по утилизации; схемах потоков отходов и прочее. Вся информация представлена в виде пространственно привязанных точечных данных или различного рода карт-схем. Каких-либо характеристик природных условий территории области электронная модель не содержит [10]. Тем более она не содержит никаких карт и карт-схем геологического содержания. По всей видимости, это обусловлено сложностью формализации геологической информации и представления ее для понимания неспециалистами.

То есть в территориальных схемах обращения с ТКО субъектов РФ геологическая среда практически никак не охарактеризована [10], и органы, принимающие решения по оценке экологической ситуации в регионе, лишены возможности получить представление о том, насколько велико негативное влияние существующих объектов ТКО на геологическую среду.

Размещение новых полигонов захоронения отходов тоже происходит без учета особенностей геологической среды. Фактически сведения об инженерно-геологической обстановке на участке предполагаемого полигона могут быть получены только на стадии изысканий, когда место размещения полигона уже выбрано. Конечно, существуют геологические и инженерно-геологические карты территорий субъектов РФ, и они, безусловно, так или иначе анализируются при обращении с ТКО, но воздействие отходов на геологическую среду имеет специфические особенности и для его учета требуется специальное инженерно-геологическое районирование [8].

Инженерно-геологическая типизация геологических условий и районирование территории, выполненные на основе принципов оценки естественной защищенности геологической среды от загрязнения и включенные в электронную модель, должны быть понятны как представителям органов, принимающих решения, так и населению. Только в этом случае можно добиться того, чтобы геологические условия учитывались при оценке ситуации на участках уже существующих объектов ТКО и планировании размещения новых.

ТИПИЗАЦИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Рассмотрим основные принципы инженерно-геологической оценки территорий для размещения ТКО на примере Московской области. Проблемы Московской обл. в сфере обращения с отходами те же, что и везде в России. Здесь много старых полигонов, практически исчерпавших свой ресурс, крайне негативное отношение

населения к любым объектам обращения с отходами — и к полигонам захоронения, и к мусоросжигательным заводам, какими бы современными они не были [1, 2].

В геологическом строении территории Московской обл. четко обособляются два стратиграфических комплекса — дочетвертичный и четвертичный. Они отличаются по составу и строению слагающих пород, условиям залегания и обводненности. Эти отличия — результат разных условий образования этих комплексов в составе осадочного чехла древней платформы.

Дочетвертичные отложения образовались преимущественно в морских условиях. По составу это терригенные и карбонатно-терригенные породы, сохраняющие последовательность напластования на достаточно большой площади, только на участках древних речных долин они могут быть частично или полностью размыты.

Четвертичные отложения имеют континентальное происхождение. Они значительно более изменчивы по простиранию и мощности. Это в основном нелитифицированные или слаболитифицированные породы, представленные песками, супесями и суглинками. Водоносные комплексы в четвертичных отложениях характеризуются наличием прямой взаимосвязи между входящими в их состав невыдержанными по простиранию водоносными горизонтами.

При геологическом картографировании платформенных территорий четвертичные и дочетвертичные отложения показывают на отдельных картах, что дает возможность получить более детальную характеристику геологического строения территории. Анализ этих карт с учетом известных закономерностей геологических напластований, позволил провести типизацию геологических условий территории.

Типизация грунтовых толщ территории Московской обл. приведена в табл. 1. При ее составлении предполагалось, что естественная защищенность геологической среды зависит от наличия в геологическом разрезе слабопроницаемых (водоупорных) слоев, их количества и мощности [3, 4].

Среди дочетвертичных отложений присутствует один мощный и выдержанный по простиранию водоупорный слой глин юрского возраста. В зависимости от наличия или отсутствия этих глин выделяются два типа грунтовых толщ дочетвертичного возраста.

В четвертичной толще слабопроницаемые слои — это моренные суглинки. В четвертичном разрезе встречаются отложения сетуньской, донской, окской и московской морен, из которых широко распространены только донская и московская. Они представлены суглинками с включением валунов и щебня. Мощность моренных

Таблица 1. Основные типы геологического строения на территории Московской области [4]

Четвертичные отложения	Дочетвертичные отложения	Каменноугольные терригенно-карбонатные породы, иногда перекрытые юрскими песками (как правило водоносные)	Каменноугольные терригенно-карбонатные породы, перекрытые юрскими песками и глинами, над которыми местами залегают пески мелового возраста. Юрские глины разделяют каменноугольный водоносный горизонт и водоносный горизонт в юрских и меловых песках)
		I	II
1	Отложения московской и донской морены (или одной из них), залегают с поверхности или перекрыты маломощными песками (менее 10 м)	I–1	II–1
2	Аллювиальные, озерные и водно-ледниковые пески и песчано-глинистые отложения мощностью более 10 м подстилаются моренными суглинками	I–2	II–2
3	Аллювиальные, озерные и водно-ледниковые пески и песчано-глинистые отложения слагают всю четвертичную толщу, выдержанные по простиранию и мощности моренные суглинки в разрезе отсутствуют	I–3	II–3
	Четвертичные отложения отсутствуют или имеют мощность менее 1 м	I–I	II–II

суглинок может превышать 40 м. Они залегают на водоразделах или заполняют доледниковые речные врезы. В зависимости от их залегания в разрезе выделяются грунтовые толщи:

1 – отложения московской и донской морены залегают с поверхности или перекрыты маломощными песками (менее 10 м);

2 – аллювиальные, озерные и водно-ледниковые пески мощностью более 10 м подстилаются моренными суглинками;

3 – аллювиальные, озерные и водно-ледниковые пески слагают всю четвертичную толщу, выдержанные по простиранию и мощности моренные суглинки в разрезе отсутствуют.

Кроме того, на территории области есть участки, где четвертичные отложения отсутствуют или имеют небольшую мощность.

Типизация грунтовых толщ Московской обл. – это только первый этап оценки степени пригодности территории для реализации проектов обращения с ТКО. Следующий этап – создание

двух информационных картографических слоев: пространственное расположение типов дочетвертичных отложений и пространственное расположение типов четвертичных отложений. Взаимное наложение этих слоев позволит дать площадную оценку естественной защищенности геологической среды от загрязнения с поверхности на карте специального инженерно-геологического районирования.

При работе над картой стояло два основных вопроса. Первый – как сделать ее достаточно простой и понятной неспециалисту, сохранив необходимую информативность? Второй – где взять информацию?

Ответом на первый вопрос стала разработанная типизация грунтовых толщ, которая позволяет выделять районы по степени защищенности геологической среды, учитывая количество слабопроницаемых толщ в геологическом разрезе. Что касается получения доступной информации о геологическом строении территории, то наиболее оптимальным видимо является использование листов Государственной геологической карты СССР

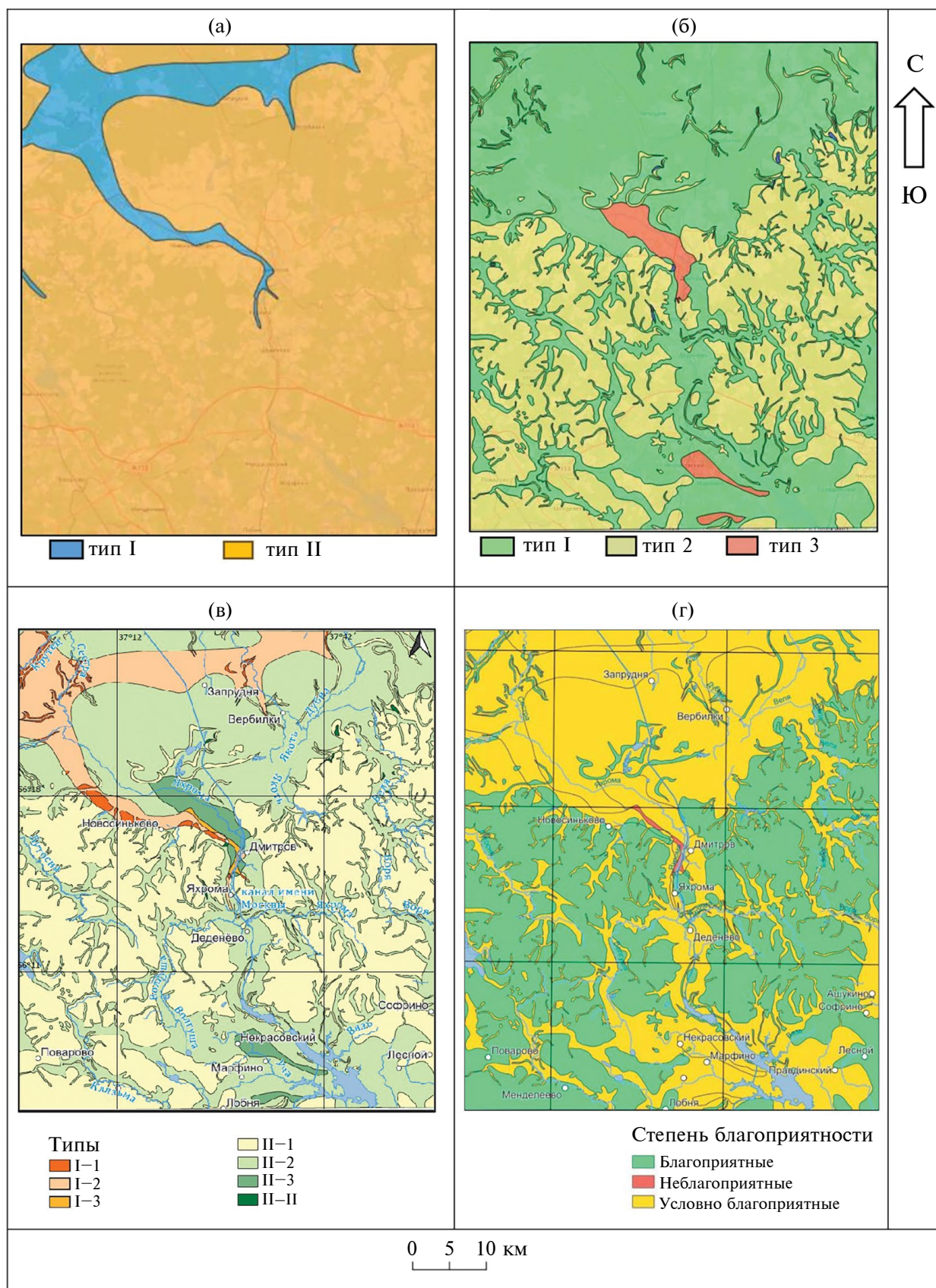


Рис. 1. Инженерно-геологическое районирование Московской обл. для размещения полигонов ТКО (репрезентативный участок – Дмитровский городской округ и окрестности): а – вспомогательный информационный слой “типы дочетвертичных отложений”, б – вспомогательный информационный слой “типы четвертичных отложений”, в – карта типологического районирования, г – карта оценочного районирования. Условные обозначения см. табл. 1 и 2.

масштаба 1 : 200 000. Ее детальность, с определенными допущениями, можно считать соответствующей региональному уровню исследований.

Была осуществлена пространственная привязка листов карты дочетвертичных отложений и карты четвертичных отложений в программе QGIS для всей территории Московской обл., т.е. была создана основа для составления цифровой карты инженерно-геологического районирования области в соответствии с разработанной типизацией. Проведено апробирование предложенного подхода и составлен рабочий вариант карты районирования для Дмитровского городского округа.

Выделение типов четвертичных отложений и их площадного распространения проводилось в соответствии с типизацией (см. табл. 1) и на основании анализа карты четвертичных отложений, геологических разрезов, схем соотношения четвертичных отложений. В результате был создан в цифровом виде вспомогательный слой – распространение типов четвертичных отложений (рис. 1). Аналогичным образом на основе геологической карты дочетвертичных отложений создан второй вспомогательный слой – распространение типов дочетвертичных отложений.

Результатом взаимного наложения двух вспомогательных слоев стала карта инженерно-геологического районирования, которая дает представление о распространении различных типов грунтовых толщ на исследуемой территории и позволяет судить об изменении защищенности геологической среды по площади (см. рис. 1).

Такое районирование вместе с типизацией грунтовых толщ – первый этап оценки естественной защищенности геологической среды территории. При этом главным фактором является характеристика естественной защищенности геологической среды от загрязнения, поступающего с поверхности, который определяется наличием в геологическом разрезе слабопроницаемых толщ, их количеством, глубиной залегания и мощностью.

Оценочное инженерно-геологическое районирование

В территориальную схему обращения с отходами субъектов РФ целесообразно включать окончательную формализованную оценку геологических условий по принципу “пригодные – непригодные” или менее категорично – “благоприятные – неблагоприятные”.

Представление о природной геолого-гидрогеологической обстановке территории могут дать типовые геологические разрезы. Обобщенные литологические колонки для всех типов грунтовых толщ, выделенных при проведении типизации геологической среды приведены на рис. 2.

В колонках схематизирован геологический разрез каждого таксона типизации, и до глубины около 50 м показаны разные по водопроницаемости слои. Четверичные и мезозойские пески представляют собой хорошо проницаемые породы, часто водонасыщенные. Карбонатно-терригенные породы каменноугольного возраста, преимущественно водоносные или хорошо проницаемые. На участках распространения терригенных прослоев такие грунтовые толщи можно характеризовать как неравномерно проницаемые или частично обводненные. К слабопроницаемым породам относят юрские глины и четвертичные моренные суглинки. Юрские глины разделяют четвертичный водоносный горизонт в песках и каменноугольный преимущественно напорный водоносный комплекс в карбонатно-терригенных породах. Моренные суглинки не выдержаны по простирацию и разделяют водоносные горизонты в четвертичных песках различных геолого-генетических комплексов.

Цель оценочного районирования области для размещения ТКО – ранжировать территорию по сложности проведения мероприятий в сфере

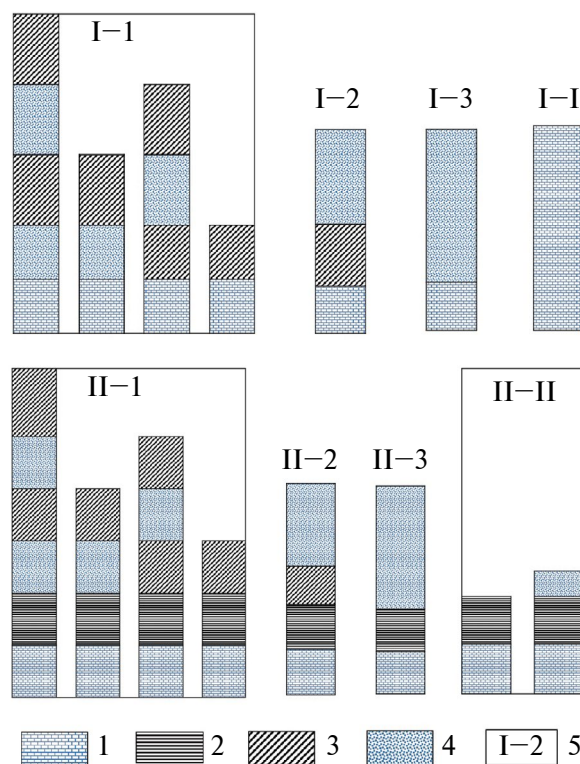


Рис. 2. Типовые разрезы грунтовых толщ Московской обл. [3]. Условные обозначения: 1 – известняки с прослоями глин, доломитов и мергелей, хорошо проницаемые, водоносные и частично обводненные, 2 – глины, слабопроницаемые, 3 – моренные суглинки, слабопроницаемые, 4 – пески, хорошо проницаемые и обводненные, 5 – индекс типа грунтовых толщ.

обращения с отходами. В основу районирования целесообразно заложить не запреты, а *предупреждения для соответствующих органов и компаний о масштабах проблем, с которыми они могут столкнуться, размещая полигоны на том или ином участке*. Выделенные при типизации грунтовые толщи были отнесены либо к благоприятной, либо условно благоприятной, или неблагоприятной категории с позиций оценки условий размещения ТКО (см. табл. 2).

Благоприятная категория характерна для участков, где слабопроницаемые толщи залегают с поверхности, что препятствует поступлению загрязнения в четвертичный и каменноугольный водоносный горизонт. То есть можно считать, что здесь геологическая среда в естественных условиях защищена от загрязнения.

Условно благоприятная категория – это участки, где с поверхности залегает мощная хорошо проницаемая песчаная толща. В разрезе присутствует слабопроницаемый слой, но он залегает на достаточно большой глубине и защищает от загрязнения только водоносный горизонт в каменноугольных терригенно-карбонатных породах.

Неблагоприятная категория — участки, в пределах которых отсутствуют выдержанные по простиранию слабопроницаемые толщи моренных суглинков и юрских глин; разрез до глубины 50 м представлен четвертичными песками и карбонатно-терригенными породами каменноугольного возраста.

При типизации и районировании территории области учитывалась изменчивость геологического строения, соответствующая региональному уровню исследований. При выделении районов допускалась определенная генерализация — игнорирование малых выделов, спрямление границ районов. Основой для проведения этих работ стали карты масштаба 1 : 200 000, которые, в свою очередь, также имеют ограниченную точность при проведении геологических границ. То есть при выполнении локальных исследований и уточнении геологического строения категория благоприятности может быть изменена.

Площадное расположение территорий различной категории благоприятности показано на карте оценочного инженерно-геологического районирования для размещения полигонов ТКО (см. рис. 1г), которая дает представление

Таблица 2. Ранжирование территории Московской обл. по степени благоприятности инженерно-геологических условий для размещения отходов [5]

Степень благоприятности инженерно-геологических условий. (типы грунтовых толщ)	Особенности инженерно-геологических условий
Благоприятные (I–1, II–1, II–II)	В разрезе выделяются одна или две слабопроницаемые толщи пород, залегающие практически с поверхности. Геологическая среда защищена от загрязнения, поступающего с поверхности
Условно благоприятные (I–2, II–2, II–3)	С поверхности залегают четвертичные пески большой мощности, хорошо проницаемые и часто водоносные. Каменноугольный водоносный комплекс отделен от четвертичного водоносного горизонта слабопроницаемым слоем юрских глин и/или четвертичной мореной. Четвертичный водоносный горизонт незащищен от загрязнения с поверхности. В таких условиях сооружение полигона захоронения ТКО требует специальных конструктивных решений
Неблагоприятные (I–3, I–I)	В разрезе выделяются только хорошо проницаемые и водоносные четвертичные пески и/или каменноугольные терригенно-карбонатные породы. Геологическая среда практически незащищена от загрязнения на большей части территорий. При детальном исследовании возможно выделение участков, где в каменноугольной толще встречаются слои глин достаточной мощности, что может служить обоснованием для перевода участка в более благоприятную категорию

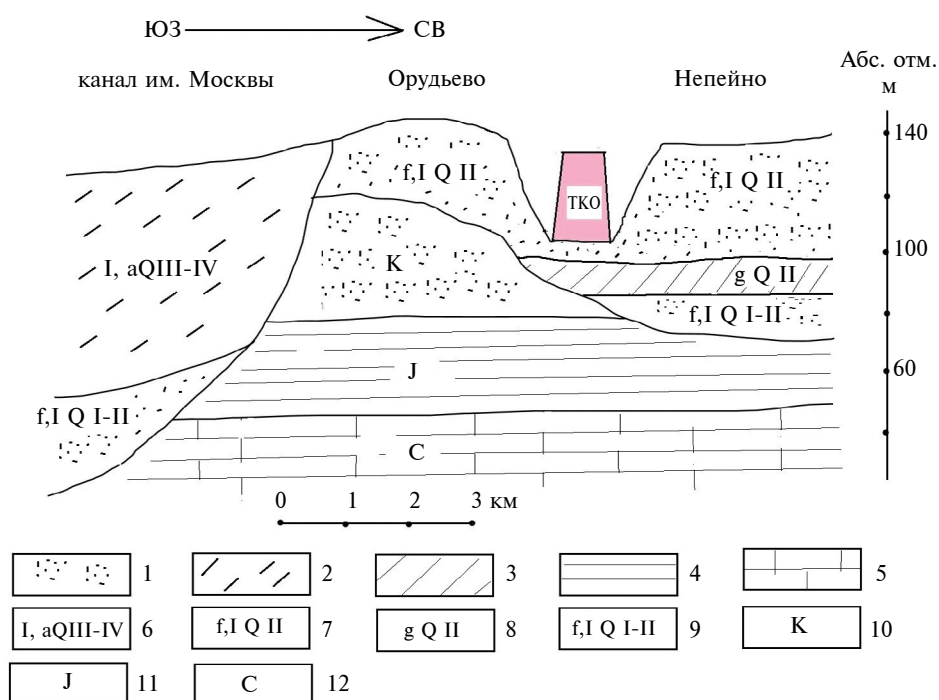


Рис. 3. Схема геологического строения в окрестностях полигона ТКО Непейно [3]. Условные обозначения: 1 – пески, 2 – песчано-глинистые отложения, 3 – суглинки, 4 – глины, 5 – известняки, 6 – верхнечетвертичные, современные озерно-аллювиальные отложения, 7 – среднечетвертичные флювиогляциальные и озерные отложения, 8 – среднечетвертичные ледниковые отложения (московская морена), 9 – ниже-, среднечетвертичные флювиогляциальные и озерные отложения, 10 – отложения меловой системы, 11 – отложения юрской системы, 12 – отложения каменноугольной системы.

о возможных сложностях при размещении отходов в том или ином районе, причем, не только на участке расположения полигона, но и в его окрестностях. Карта составлена на основе карты типологического инженерно-геологического районирования (см. рис. 1в) и оценки степени благоприятности каждого выделенного типа с позиций обращения с ТКО (см. табл. 2).

Анализ геологической обстановки в окрестностях полигона ТКО (на примере полигона Непейно)

Типизация территории по пригодности для размещения объектов ТКО представляет собой пространственную информацию о характеристиках геологической среды и должна использоваться на предпроектном этапе работ по размещению объектов обращения с отходами. Но даже если полигон расположен на достаточно благоприятном участке, геологическая среда которого характеризуется естественными защитными свойствами, нельзя полностью исключить риск ущерба от поступления загрязнения с поверхности в геологическую среду (горные породы и подземные воды).

Инженерные изыскания под строительства или рекультивацию полигонов ограничиваются,

к сожалению, только участком размещения объекта и глубиной 20–30 м, хотя изучение геолого-гидрогеологической обстановки на прилегающей территории имеет немаловажное значение. Рассмотрим это на примере полигона Непейно в Дмитровском районе Московской обл. [3]. Этот полигон расположен в 1,3 км к северу от деревни Непейно, функционирует с 1975 г. и находится в отработанном песчаном карьере. В соответствии с картой оценочного районирования полигон расположен в пределах территории, отнесенной к условно благоприятной категории.

В основании свалочного тела под маломощными среднечетвертичными флювиогляциальными песками здесь залегают отложения московской морены. Они представлены супесями и суглинками с включением гравия и щебня, с линзами песка. Максимальная вскрытая мощность моренных отложений по данным инженерно-геологических изысканий составляет 22 м. Они представляют собой водоупорный слой и разделяют грунтовый безнапорный водоносный горизонт в вышележащих среднечетвертичных флювиогляциальных песках и техногенных грунтах свалочного тела и напорный водоносный горизонт в ниже-, среднечетвертичных озерных и флювиогляциальных песках. То есть, на первый взгляд, на участке полигона существует природный защитный барьер в виде суглинков

московской морены, который препятствует поступлению компонентов свалочного фильтрата в глубокие горизонты подземных вод.

Изучение же геологического строения окрестностей полигона показывает следующее: отложения московской морены не имеют выдержанного распространения и выклиниваются менее чем в 1 км от полигона; в 4–5 км к юго-западу от полигона расположен крупный речной доледниковый размыв, вскрывший толщу известняков каменноугольного возраста (рис. 3).

В окрестностях полигона отмечается практически прямая гидравлическая связь грунтового и каменноугольного водоносных горизонтов, т.е. существует достаточно высокий риск поступления компонентов свалочного фильтрата в каменноугольный водоносный горизонт — основной источник питьевого водоснабжения. В таких условиях даже после предстоящего закрытия полигона и при проведении его рекультивации обязательным требованием должно быть осуществление мониторинга химического состава подземных вод не только грунтового, но и более глубоких водоносных горизонтов, вплоть до подземных вод каменноугольных известняков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представление об особенностях геологической среды для обращения с ТКО на территории субъекта РФ дает карта оценочного инженерно-геологического районирования. Она оперирует категориями благоприятные — неблагоприятные условия и должна быть понятна неспециалисту. Смысловая нагрузка категорий достаточно проста и объясняется в специальной таблице (приложение к карте). Включение такой карты в территориальную схему обращения с отходами позволит увидеть, какие действующие и рекультивируемые полигоны расположены в неблагоприятных условиях и требуют особого внимания для обеспечения геоэкологической безопасности на прилегающих территориях. С другой стороны, карта может использоваться для принятия решений на региональном уровне по размещению новых полигонов ТКО.

Карта составлена в цифровом формате и может войти в состав электронной модели территориальной схемы обращения с отходами. Объединение в электронной модели информации о геологической среде региона с такими, например, данными как расположение объектов ТКО поставит обращение с отходами на территории субъекта РФ на более современный и безопасный уровень.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 22-17-00045.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заиканов В.Г., Заиканова И.Н., Булдакова Е.В. Геоэкологический и ландшафтно-экологический анализ территорий существующих свалок ТБО Московской области // Сергеевские чтения: Вып. 20. Обращение с отходами: задачи геоэкологии и инженерной геологии. М.: РУДН, 2018. С. 65–73.
2. Кашиперук П.И., Макеева Т.Г., Аканов А.В. и др. Некоторые правовые и природоохранные вопросы формирования полигонов переработки и захоронения ТКО в Подмоскowie // Сергеевские чтения: Вып. 20. Обращение с отходами: задачи геоэкологии и инженерной геологии. М.: РУДН, 2018. С. 71–73.
3. Козлякова И.В., Еремина О.Н. Оценка геологической среды для размещения твердых коммунальных отходов на территории Московской области. Геоэкологические проблемы техногенного этапа истории Земли — 2022 // Сб. матер. Всерос. (национальной) научно-практ. конф. (Москва, 14 октября 2022 г.). М.: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2022. С. 201–208.
4. Козлякова И.В., Еремина О.Н., Романова Е.Р. и др. Карта типологического инженерно-геологического районирования для размещения твердых коммунальных отходов на территории Московской области // Сергеевские чтения. Вып. 24. Фундаментальные и прикладные вопросы инженерной геодинамики. М.: Геоинфо, 2023. С. 168–171.
5. Козлякова И.В., Еремина О.Н., Романова Е.Р. и др. Оценочное инженерно-геологическое районирование для территориальной схемы обращения с твердыми коммунальными отходами // Сергеевские чтения. Вып. 25. Региональная инженерная геология и геоэкология. М.: “Геоинфо”, 2024. С. 297–300.
6. Козлякова И.В., Кожевникова И.А., Еремина О.Н., Анисимова Н.Г. Методологические принципы оценки геологической среды для размещения объектов обращения с ТКО // Геоэкология. 2021. № 1. С. 48–58. <https://doi.org/10.31857/S0869780921010045>.
7. Королев В.А. Полигоны ТБО: есть ли альтернатива? // Инженерная геология. 2010. № 1. С. 46–56.
8. Осипов В.И., Галицкая И.В., Заиканов В.Г. Полигонная технология обращения с отходами // Геоэкология. 2022. № 3. С. 3–15. <https://doi.org/10.31857/S0869780922030079>
9. Правила разработки, общественного обсуждения, утверждения, корректировки территориальных схем в области обращения с отходами производства и потребления, в том числе с твердыми коммунальными отходами, а также требования к составу и содержанию таких схем. Утв. постановлением Правительства Российской Федерации от 22 сентября 2018 г. N 1130. <https://base.garant.ru/72060036/>
10. Территориальная схема обращения с отходами, в том числе с твердыми коммунальными отходами, Московской области. 2018. <https://люберцы.рф/files/JKH/Regoper/Территориальная%20схема.pdf>
11. Управление отходами. Полигонные технологии захоронения твердых бытовых отходов. Рекультивация и постэксплуатационное обслуживание полигона: монография / [Вайсман Я.И. и др.]. Под ред. Я.И. Вайсмана. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2012. 244 с.
12. Irina V. Kozliakova, Irina A. Kozhevnikova, Olga N. Eremina, Nadezhda G. Anisimova Engineering Geological Typification of Territories for Allocation of Municipal Solid Waste Management Facilities (with the Example of Central Russia) // Periodico Tch Quimica. 2020. V. 17. №35. P. 1124–1136.
13. Mishra S., Tiwary D., Ohri A., Agnihotri A.K. Impact of municipal solid waste landfill leachate on groundwater quality in Varanasi, India // Groundwater for Sustainable Development. 2019. 9:100230. <https://doi.org/10.1016/J.GSD.2019.100230>

14. *Muhammad Tajammal Munir, Bing Li, Muhammad Naqvi, Abdul-Sattar Nizami*. Green loops and clean skies: Optimizing municipal solid waste management using data science for a circular economy // *Environmental Research*. 2024. V. 243. 117786.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117786>
15. *Ayesha Siddiqua, John N. Hahladakis, Wadha Ahmed K.A. AlAttiya*. An overview of the environmental pollution and health effects associated with waste landfilling and open dumping // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. 29:58514–58536.
<https://doi.org/10.1007/s11356-022-21578-z>

ASSESSMENT OF GEOLOGICAL ENVIRONMENT FOR THE TERRITORIAL SCHEME OF MUNICIPAL SOLID WASTE MANAGEMENT

**I. V. Kozliakova^{a,#}, O. N. Eremina^a, E. R. Romanova^a, A. G. Khairedinova^a,
E. S. Chutkerashvili^a**

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

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

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

The current trends in the municipal waste management development are considered and the problems in using spatial geological data are shown, which consist in the complexity of combining geological information with other data in the waste management system. A methodological approach is proposed to take into account the geological environment specifics in the territorial scheme of waste management on the basis of digital mapping by the example of the Moscow region. An assessment zoning of a representative key site was carried out in the QGIS program according to its suitability for the municipal solid waste disposal depending on the presence of low-permeable soils and rocks in the geological section.

Keywords: *municipal solid waste, waste management, waste disposal, protection from pollution, zoning, digital mapping, natural protection of the geological environment, territorial waste management scheme, geoeological safety*

REFERENCES

1. Zaikanov, V.G., Zaikanova, I.N., Buldakova, E.V. [Geoeological and landscape-ecological analysis of existing landfill areas in Moscow region]. In: [Sergeev's readings. Issue 20. Waste management: tasks for environmental geoscience and engineering geology. Proc. annual session of the Sci. Council RAS on the problems in geoeology, engineering geology and hydrogeology. March 22, 2018]. Moscow, RUDN Publ., 2018, pp. 65–73 (in Russian)
2. Kashperuk, P.I., Makeeva, T.G., Akanov, A.V., Nikitina, K.V., Podlesnykh, A.I. [Some legislative and nature-conservation issues of forming MSW recycling and disposal sites in the Moscow region] In: [Sergeev's readings. Issue 20. Waste management: tasks for environmental geoscience and engineering geology. Proc. annual session of the Sci. Council RAS on the problems in geoeology, engineering geology and hydrogeology. March 22, 2018]. Moscow, RUDN Publ., 2018, pp. 71–73 (in Russian)
3. Kozliakova, I.V., Eremina, O.N. [Assessment of geological environment for the disposal of municipal solid waste in the Moscow area]. In: [Geoeological problems of anthropogenic stage in the Earth's history -2022. Proc. All-Russia (national) sci. and pract. conf. (Moscow, October 14, 2022)]. Moscow, MISI-MGSU Publ., 2022, pp. 201–208. (in Russian)
4. Kozliakova, I.V., Eremina, O.N., Romanova, E.R. et al. [The map of typological engineering geological zoning for the disposal of municipal solid waste in the Moscow region]. In: [Sergeev's readings. Fundamental and applied issues of engineering geodynamics. Issue 24. Proc. annual session of the Sci. Council RAS on the problems in geoeology, engineering geology and hydrogeology (March 30–31, 2023)]. Moscow, Geoinfo Publ., 2023, pp. 168–171 (in Russian)
5. Kozliakova, I.V., Eremina, O.N., Romanova, E.R., Khairedinova, A.G., Chutkerashvili, E.S. [Estimative engineerign geological zoning for the territorial scheme of MSW management]. In: [Sergeev's readings. Regional engineering geology and geoeology. Issue 25. Proc. annual session of the Sci. Council RAS on the problems in geoeology, engineering geology and hydrogeology (March 28–29, 2024)]. Moscow, Geoinfo Publ., 2024, pp. 297–300 (in Russian)
6. Kozliakova, I.V., Kozhevnikova, I.A., Eremina, O.N., Anisimova, N.G. [Methodological principles of geological environment assessment for allocation of MSW management facilities]. *Geoeekologiya*, 2021, no. 1, pp. 48–58. <https://doi.org/10.31857/S0869780921010045>. (in Russian)
6. Korolev, V.A. [MSW disposal sites: is there any alternative?]. *Inzhenernaya geologiya*, 2010, no. 1, pp. 46–56 (in Russian)
7. Korolev, V.A. [MSW disposal sites: is there any alternative?]. *Inzhenernaya geologiya*, 2010, no. 1, pp. 46–56. (in Russian)
8. Osipov, V.I., Galitskaya, I.V., Zaikanov, V.G. [Landfill technology of waste management]. *Geoeekologiya*, 2022, no. 3, pp. 3–15.
<https://doi.org/10.31857/S0869780922030079> (in Russian)
9. [Rules for the development, public discussion, approval, adjustment of territorial schemes in the management of production and consumption waste, including municipal solid waste, as well as requirements for the composition and content of such schemes. Approved by Decree of the Government of the Russian Federation of September 22, 2018, no. 1130.] (in Russian)

10. [Territorial waste management scheme including municipal solid waste for the Moscow region]. Krasnogorsk, 2018. (in Russian)
11. [Waste management. Landfill technologies for solid waste disposal. Reclamation and post-operational maintenance of a landfill]. Vaisman Ya.I. et al. Perm, Perm National Research Polytechnic Univ. Publ., 2012, 244 p. (in Russian)
12. Kozliakova, I.V., Kozhevnikova, I.A., Eremina, O.N., Anisimova, N.G. Engineering geological typification of territories for allocation of municipal solid waste management facilities (with the example of Central Russia). *Periodico Tch Quimica*, 2020, vol.17, no.35, p. 1124–1136
13. Mishra, S., Tiwary, D., Ohri, A., Agnihotri, A.K. (Impact of municipal solid waste landfill leachate on groundwater quality in Varanasi, India. *Groundw Sustain Dev*, 2019, no. 9:100230 <https://doi.org/10.1016/J.GSD.2019.100230>
14. Muhammad Tajammal Munir, Bing Li, Muhammad Naqvi, Abdul-Sattar Nizami. Green loops and clean skies: Optimizing municipal solid waste management using data science for a circular economy. *Environmental Research*. 2024, vol. 243, no. 117786 <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117786>
15. Ayesha Siddiqua, John N. Hahladakis, Wadha Ahmed K A Al-Attiya. An overview of the environmental pollution and health effects associated with waste landfilling and open dumping. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, no. 29, pp. 58514–58536. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21578-z>