

# СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Номер 2, 2022

---

---

Северная Крымско-Кавказская краевая флексурно-разрывная зона

*С. А. Несмеянов, О. А. Воейкова*

3

---

## ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Техногенные изменения режима подземных вод на застроенных территориях  
(геоэкологические, инженерно-геологические и гидрогеологические аспекты)

*В. В. Фуникова, И. В. Дудлер, Р. Т. Бутаев*

21

---

## ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Виды и современная активность развития опасных геологических процессов  
на Южном Урале и в Предуралье

*А. И. Смирнов*

33

Анализ инженерно-геологических условий и изменчивости состояния  
дисперсных отложений вблизи поверхностных карстовых форм  
в обстановках развития карбонатно-сульфатного карста

*Е. В. Дробинина, Д. Р. Золотарев*

48

---

## ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Совершенствование природоохранных мероприятий при эксплуатации  
нефтегазовых месторождений

*Н. С. Рогова*

63

Многолетняя изменчивость содержания соединений ртути в речных  
экосистемах России по данным мониторинга

*О. С. Решетняк*

70

---

## ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

Методы исследования свойств мерзлых грунтов и прогноза  
их изменения

*Ф. С. Карпенко, В. Н. Кутергин, Е. О. Дернова, А. А. Осокин*

80

---

## МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Методологические основы расчета биопозитивности объектов  
дорожно-транспортного комплекса

*Н. И. Шестаков, К. Л. Чертес*

88

---

---

# Contents

---

---

**Number 2, 2022**

---

---

The Northern Crimean-Caucasian marginal flexure-rupture zone

*S. A. Nesmeyanov, O. A. Voeikova*

3

---

## FUNCTIONING OF NATURAL AND NATURAL-ANTHROPOGENIC SYSTEMS

Technogenic changes in the ground water regime in the built-up areas  
(geoecological, engineering geological and hydrogeological aspects)

*V. V. Funikova, I. V. Dudler, R. T. Butaev*

21

---

## NATURAL AND HUMAN-INDUCED PROCESSES

Types and current activity in development of hazardous geological processes  
in the southern Urals and Cisurals

*A. I. Smirnov*

33

Analysis of engineering geological conditions and variability of fine-grained  
deposits near sinkholes in the carbonate-sulfate karst areas

*E. V. Drobinina, D. R. Zolotarev*

48

---

## ENVIRONMENT CONTAMINATION

Improvement of the environmental protection measures during  
the operation of oil and gas fields

*N. S. Rogova*

63

Long-term variability in the content of mercury compounds in river  
ecosystems of Russia according to monitoring data

*O. S. Reshetnyak*

70

---

## SOIL AND ROCK ENGINEERING AND MECHANICS

Methods of studying the properties of frozen soils and prediction  
of their changes

*F. S. Karpenko, V. N. Kutergin, E. O. Dernova, A. A. Osokin*

80

---

## RESEARCH METHODS AND TECHNIQUES

Methodological grounds for calculating the biopositivity of objects  
of the road transportation complex

*N. I. Shestakov, K. L. Chertes*

88

---

---

УДК 551.248.2 (234.9)

## СЕВЕРНАЯ КРЫМСКО-КАВКАЗСКАЯ КРАЕВАЯ ФЛЕКСУРНО-РАЗРЫВНАЯ ЗОНА

© 2022 г. С. А. Несмеянов<sup>1</sup>, О. А. Воейкова<sup>1,\*</sup><sup>1</sup> Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН),  
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

\*E-mail: voa49@mail.ru

Поступила в редакцию 23.11.2021 г.

После доработки 10.12.2021 г.

Принята к публикации 13.01.2022 г.

Северная Крымско-Кавказская флексурно-разрывная зона представляет собой пограничную структуру на сочленении новейших Крымско-Кавказской орогенической гряды и Индоло-Кубанского краевого прогиба. Она делится на три сегмента с различной историей развития. Это различие определяется позднеорогеной структурной перестройкой. Произошло преобразование раннеорогенного Кеченско-Таманского поперечного прогиба в позднеорогенный Керченско-Таманский седловинообразный элемент гряды. Соответственно, различны по строению и возрасту сегменты флексурно-разрывной зоны. Северная и Южная Крымско-Кавказские флексурно-разрывные зоны являются крупнейшими новейшими дизъюнктивными структурами данного региона.

**Ключевые слова:** орогеническая гряда, поперечный прогиб, флексурно-разрывная зона, сегмент, грабен, терраса, местонахождение

DOI: 10.31857/S0869780922020059

### ВВЕДЕНИЕ

Среднемасштабное неоструктурное районирование является важной составной частью исследований, опережающих инженерные изыскания для строительства в горных областях. Опыт проведения подобного районирования на Западном Кавказе оказался полезным для изысканий под строительство различных ответственных сооружений (газо- и нефтепроводы, олимпийские объекты и др.). Следует также отметить, что новейшие тектонические структуры существенно отличаются от более древних, выявляемых геологической съемкой. Неоструктурное районирование предусматривает выявление структур, определяющих основные черты современного рельефа. Поэтому целесообразно распространить такое районирование на территории, где предполагается проектирование и строительство различных, в том числе и ответственных объектов. Особенно важно выявление наиболее молодых структур на крупнейших структурных элементах.

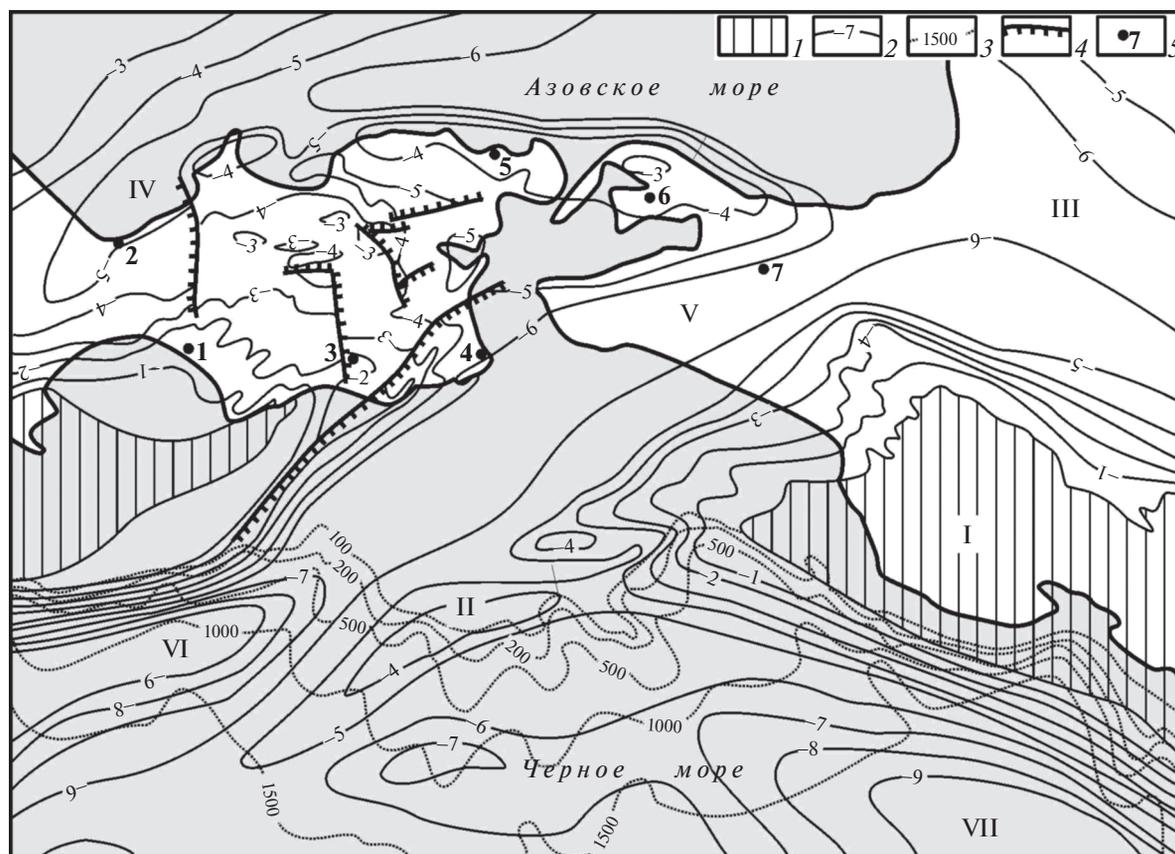
Прежняя схема среднемасштабного неоструктурного районирования Западного сегмента мегасвода Большого Кавказа за последнее тридцатилетие в целом показала свою надежность. Единственное дополнение, которое представляется в настоящее время необходимым, – выделение на самом западе мегасвода, в районе его сочленения

с седловинообразной Керченско-Таманской областью, участка развития поперечных к оси мегасвода дислокаций, преимущественно флексурного типа. Здесь поперечные дислокации преобладают над продольными, а общий уклон ориентирован с востока на запад. Соответственно, предлагается дополнительно выделять самостоятельную Подзону периклинального ступенчатого склона на западе Зоны осевой цепи брахисводов.

Цель данной статьи – типизация структур на северном ограничении Крымско-Кавказской орогенической гряды в области сближения Крымско-го и Кавказского орогенов.

В качестве северного ограничения новейших орогенов Северо-западного Кавказа и Восточного Крыма ранее предлагалось выделять краевую флексурно-разрывную зону [20], которая позже стала именоваться Северной Крымско-Кавказской [21, 22].

Крымско-Кавказская орогеническая гряда, в которой орогены разделены Керченско-Таманской седловиной, на новейшем этапе геологического развития претерпела существенную перестройку. Как показали геофизические исследования, на раннеорогеной стадии развития эти орогены были разделены глубоким Керченско-Таманским поперечным прогибом, выполненным отложениями майкопской серии (рис. 1) [18, 36].



**Рис. 1.** Структурная карта Керченско-Таманского региона по подошве майкопской серии [18]. 1 – области выхода домайкопских отложений на поверхность; 2 – изогипсы подошвы майкопских отложений (км); 3 – изобаты (м); 4 – разрывные нарушения; 5 – скважины. I – Анапский выступ, II – Барьерная антиклиналь, III – Западно-Кубанский прогиб, IV – Индольский прогиб, V – Керченско-Таманский прогиб, VI – прогиб Сорочкина, VII – Туапсинский прогиб.

Поэтому единая Крымско-Кавказская орогеническая гряда сформировалась только на позднеорогенной стадии, когда майкопский поперечный прогиб пересекла новообразованная Керченско-Таманская седловиннообразная возвышенность [22]. Соответственно, разные части ныне единой Северной Крымско-Кавказской флексурно-разрывной зоны разновозрастны и отличаются по своему строению. С востока на запад выделяются Ахтырский, Таманский и Северокерченский ее сегменты.

#### АХТЫРСКИЙ СЕГМЕНТ ФЛЕКСУРНО-РАЗРЫВНОЙ ЗОНЫ

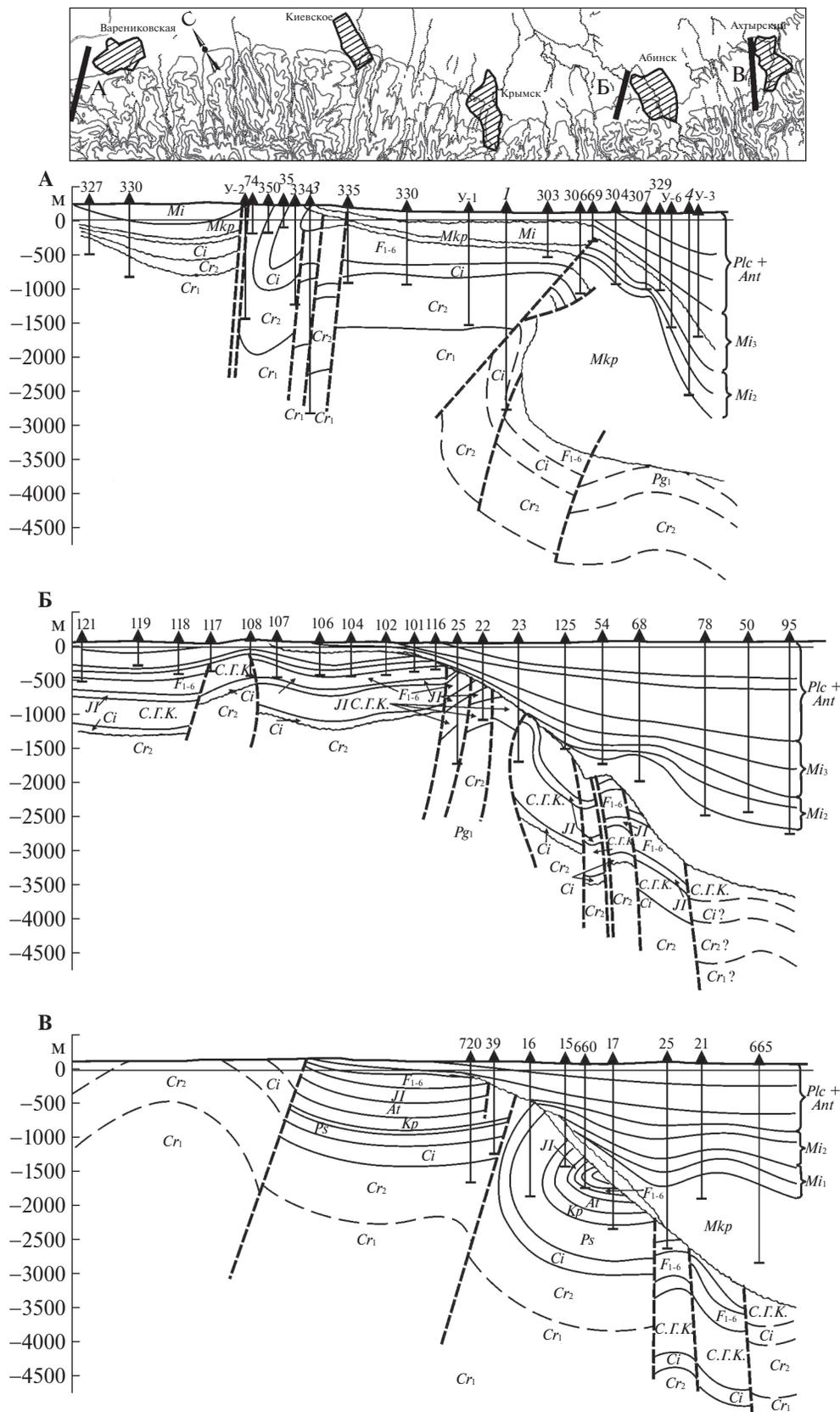
Ахтырский сегмент флексурно-разрывной зоны, разграничивающий ороген Западного Кавказа и Кубанскую часть Индоло-Кубанского краевого прогиба (т.е. Западно-Кубанский прогиб), начал формироваться на раннеорогенной стадии. К югу от него мощные майкопские отложения отсутствуют.

На западе северо-восточного склона мегасвода обычно выделяется Ахтырская шовно-разрывная

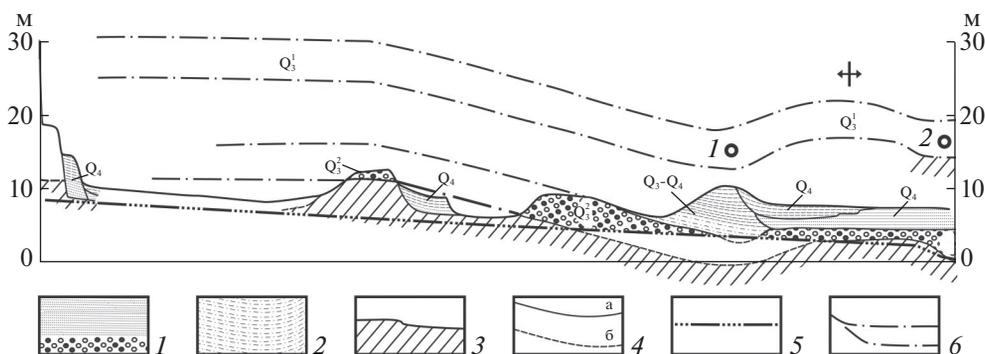
зона сложного строения и шириной до 10 км [13]. Здесь разрывные поверхности, нарушающие верхнее колено флексурно-разрывной шовной зоны, обычно наклонены к юго-западу под углами  $50^{\circ}$ – $80^{\circ}$ . Суммарные амплитуды разрывных и флексурных смещений по кровле мела достигают 1.5–4 км (рис. 2) [14, 17, 31].

Следует отметить, что глубже этой новейшей флексурно-разрывной зоны в более древних до меловых образованиях, по данным магнитотеллурического зондирования, предполагается, очевидно, доновейшее надвигание с амплитудой горизонтального перемещения до 10 км [2, с. 8; 34, с. 5]. Следовательно, здесь новейшая флексурно-разрывная зона является в какой-то мере унаследованным образованием дизъюнктивной природы.

В некоторых районах, например, в районе станции Варениковской, смыкающее крыло флексурно-разрывной зоны весьма крутое, местами с опрокинутыми залеганиями дислоцированных олигоцен-нижнемиоценовых и более древних отложений. В верхнем флексурном колене наблюдаются веера сопряженных разрывов. Но сложные разрывные нарушения отмечаются и в ниж-



**Рис. 2.** Строение верхнего флексурного перегиба и смыкающего крыла Северной Крымско-Кавказской флексурно-разрывной шовной зоны на северо-западе мегасвода Большого Кавказа (по [14, 17]). Сечения: А – Варнековское, Б – Абинское, В – Ахтырское.



**Рис. 3.** Складчатые деформации верхнеплейстоценовых речных террас на левобережье р. Иль к югу от пос. Ильский у Ильской палеолитической стоянки [23]. 1 – террасовые аллювиальные отложения различного гранулометрического состава от песка до валунных галечников; 2 – покровные субаэральные суглинистые и суглинисто-щебнистые отложения; 3 – коренные породы в цоколе террас; 4 – геологические границы: а – достоверные, б – предполагаемые; 5–6 – корреляционные линии: 5 – тальвега р. Иль, 6 – геоморфологических уровней.

нем флексурном колене флексурно-разрывной зоны. При переходе от флексурно-разрывной зоны к прогибу (например, к Агадумо-Афипской впадине) разрывы верхнего флексурного колена могут трансгрессивно перекрываться плиоценом, не затронутым разрывными нарушениями [14].

Повышенная тектоническая активность в районе Ахтырского сегмента подтверждается позднечетвертичным складкообразованием и воздыманиями на южной окраине пос. Ильский у Ильской палеолитической стоянки (рис. 3) [25]. На этом же сегменте скорости вертикальных смещений в зонах разломов, измеренные геолого-геоморфологическими методами, оцениваются в 0.2–0.5 мм/год, но оговаривается, что “*существенная часть тектонических напряжений реализуется в виде складчатых деформаций*” [30, с. 94].

### ТАМАНСКИЙ СЕГМЕНТ ФЛЕКСУРНО-РАЗРЫВНОЙ ЗОНЫ

Таманский сегмент флексурно-разрывной зоны имеет существенно иное строение, поскольку сформировался позже (на позднеорогенной стадии) и на более молодом основании. Здесь амплитуда перегиба по подошве майкопской серии достигает 2 км (см. рис. 1). Наиболее полное строение верхней части данного сегмента этой зоны может быть рассмотрено в пределах антиклинали Синея балки [23], где разнообразие разновозрастных местонахождений, особенно местонахождений мелких млекопитающих, а также применение палеомагнитных исследований [39], позволяет уточнить возраст и выяснит соотношение детально изученных здесь неоплейстоценовых, эоплейстоценовых (калабрий) и палеоплейстоценовых (гелазий) бассейновых и террасовых образований [15, 23, 27, 28 и др.].

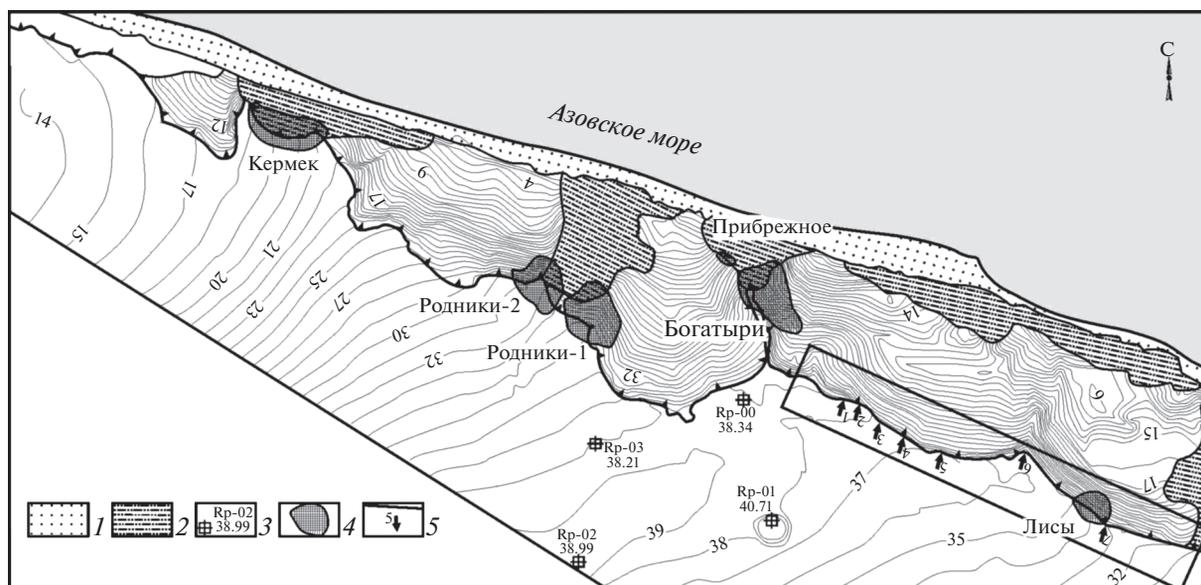
В западной части сегмента отложения бассейнового генетического комплекса, дислоцированные в антиклинальные складки, развиты в районе между поселками Кучугуры и Пересыпь и представлены прибрежно-морскими фаунистически охарактеризованными толщами от сарматского до ачкагыльского ярусов.

Восточнее, на антиклинали Синея балки наиболее древними дислоцированными отложениями служат песчано-глинистые куяльницкие, слагающие крутое северное и более пологое южное ее крылья. Это крутое крыло с углами наклона 30°–40° и характеризует Таманский сегмент Северной Крымско-Кавказской флексурно-разрывной зоны.

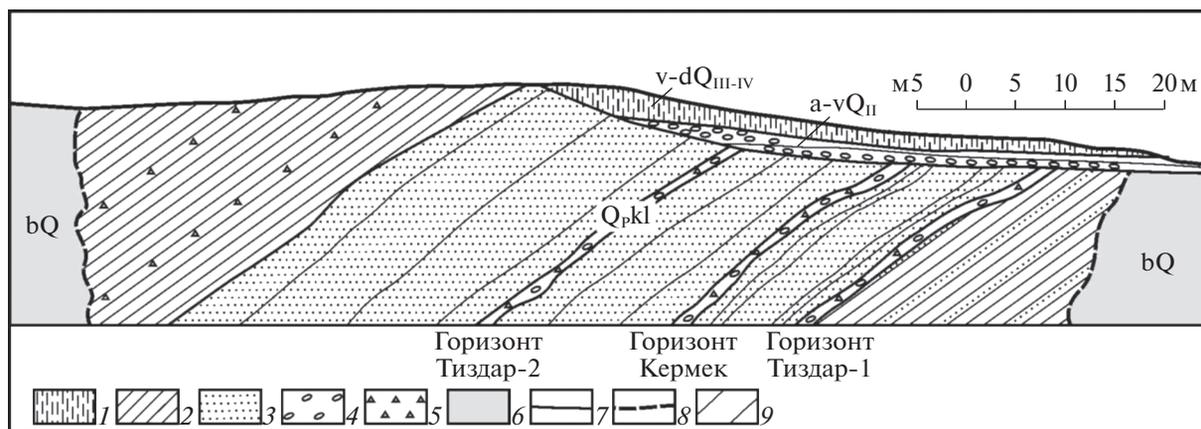
Более молодые отложения представлены на этой антиклинали, во-первых, присводовой покровной толщей, во-вторых, выполняющей небольшой грабен костеносной толщей местонахождения Синея Балка/Богатыри и, в-третьих, террасовым вложением с местонахождениями Родники-1 и 2 (рис. 4).

Датировка развитых здесь куяльницких отложений опирается на ряд местонахождений фауны мелких млекопитающих и археологических местонахождений. Одно из них, так называемая “рыбная” линза расположено в непосредственной близости к упомянутому выше грабену на северном склоне, обращенном к морю. Это небольшой тектонический клин песчаного материала, заключенный в грязевулканическую брекчию [15]. Три важных местонахождения Тиздар-1, Кермек и Тиздар-2 группируются примерно в 350 м к западу от этого грабена, где наблюдается толща куяльника, наклоненная под углами около 35°–40° (рис. 5) [15].

Наиболее древними считаются местонахождения Тиздар-1 и “рыбная” линза, для которых характерно сочетание примитивной полевки Алло-



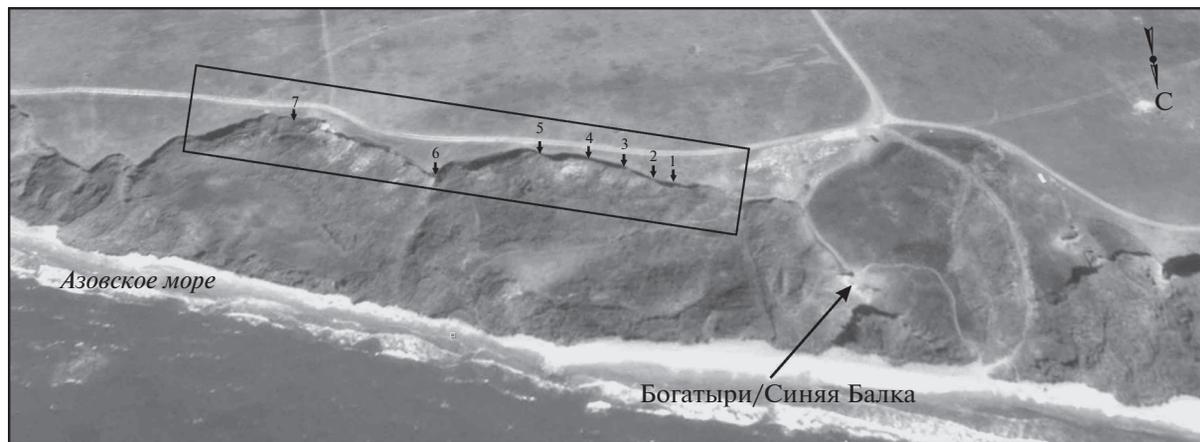
**Рис. 4.** Расположение комплекса опорных местонахождений на антиклинали Синей Балки. 1 – пляж, 2 – зоны развития оползней, 3 – геодезические реперы, 4 – участки фаунистических и археологических местонахождений, 5 – комплекс обнажений, изображенных на рис. 6.



**Рис. 5.** Принципиальная схема строения участка местонахождений Тиздар-1, 2 и Кермек [15]. 1 – суглинки лессовидные; 2 – глины; 3 – пески; 4 – гравий и галька; 5 – дрова и щебень; 6 – “брекчии” грязевулканические; 7–8 – границы геологические: 7 – стратиграфические, 8 – интрузивные; 9 – слоистость песков.

phaiomys deucalion и многочисленных корнезубых полевок *Borsodia* и *Mimomys* при наличии *Lagurodon arankaе*. Несколько более молодым выглядит местонахождение Тиздар-2, где доминируют *Allophaiomys deucalion* и *Lagurodon arankaе*, а доля корнезубых полевок существенно снижена [43, с. 16]. По мнению А.С. Тесакова [37, с. 64, 75; 39, с. 18], фауна мелких млекопитающих из местонахождений Тиздар-1 и 2 соответствует самому началу бихария, позднему псепкупскому комплексу и относится к концу куюльника черноморской шкалы. В терминах региональной биогеохронологии Восточной Европы микротериофауны местонахождений Тиздар-1 и линзы

рыбная относятся к региональной биозоне MQR11, а местонахождений Кермек и Тиздар-2 – к биозонам MQR10-11, и могут датироваться возрастным интервалом 2.1–1.8 млн лет [39, с. 18, 25]. Этот интервал отвечает второй половине гелазия и палеоплейстоцена. К близкому выводу приходит и изучавший малакофауну данного комплекса местонахождений П.Д. Фролов [41]. Принятая датировка подтверждается и современными палеомагнитными данными, поскольку в верхах разреза непосредственно выше всех трех упомянутых местонахождений располагается эпизод Олдувей (1.925–1.780 млн лет) [39, с. 19; 29].



**Рис. 6.** Общий вид местонахождения Богатыри/Синяя балка (перспективный космоснимок из базы Google Earth). Рамочкой околнурено обнажение нижнеэоплейстоценовых отложений, слагающих сводовую часть антиклинали-увала (см. рис. 7, цифры – номера разделов).

В точке Кермек, которая рассматривается и в качестве раннепалеолитической стоянки, в большом количестве встречены раковины разнообразных солоноватоводных, почти пресноводных унионид, дрейссен, вивипарусов и микромеланий [15, с. 28; 41, с. 660]. По-видимому, именно из этого района описывалась куяльницкая фауна моллюсков вместе с окатанными обломками киммерийских форм [9, 15].

Шарнир антиклинали Синея балки ундурирует. В районе местонахождения Синяя Балка/Богатыри этот шарнир сводово воздымается, образуя антиклинальный увал (рис. 6). Конседиментационное воздымание увала фиксируется присводовым угловым несогласием.

Налегающая на куяльницкие (палеоэоплейстоценовые) отложения к востоку от местонахождения Синяя Балка/Богатыри террасовидная раннеэоплейстоценовая толща ( $E_1$ ) в присводовой части антиклинали-увала характеризуется не только наличием углового несогласия в основании и размывами между слагающими ее слоями, но также нарастанием к востоку их мощностей и фациальными изменениями (рис. 7).

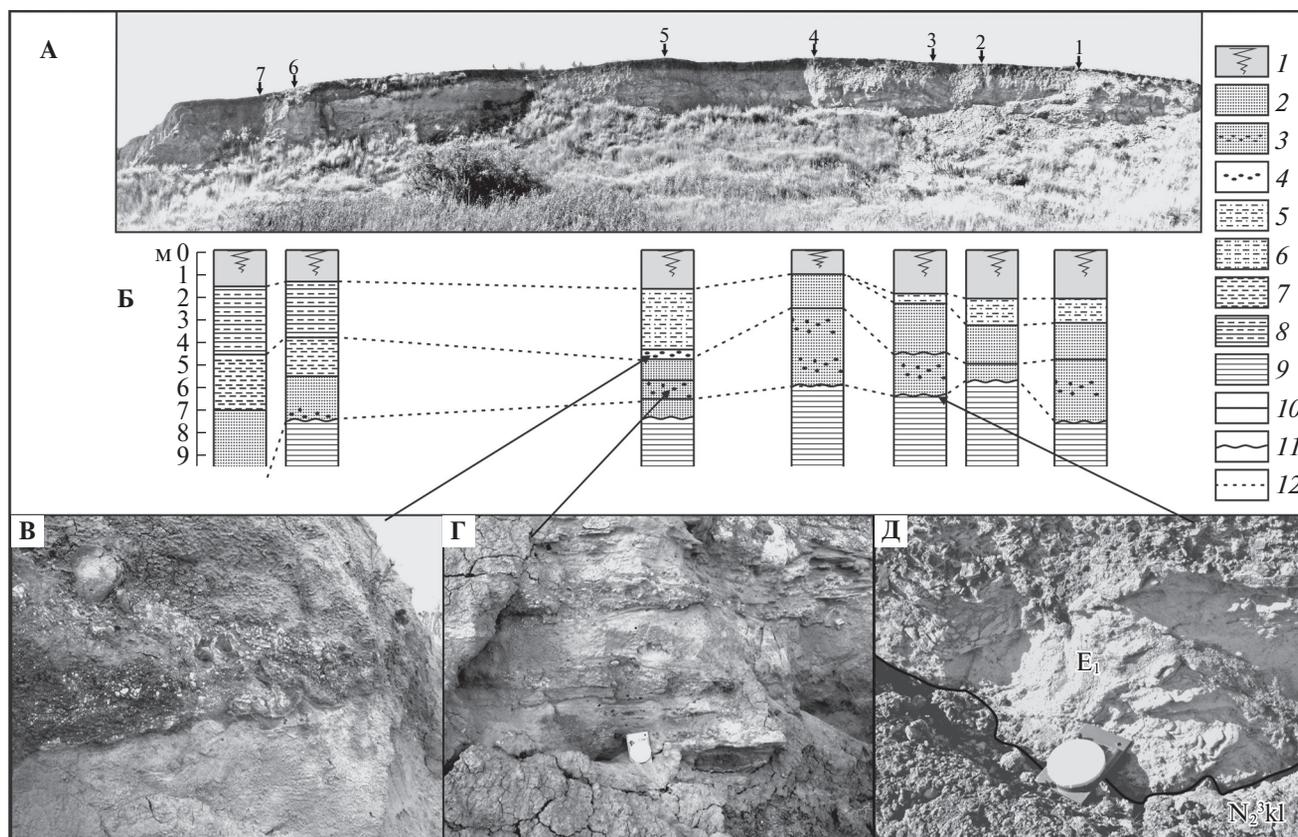
В западной части данного обнажения к границе куяльника и упомянутой террасовидной толщии приурочено местонахождение фауны (точка “Восточная”), сходное по составу мелких млекопитающих с местонахождением Тиздар-2 [39, с. 17]. Поскольку данная граница является поверхностью размыва и углового несогласия, можно полагать, что фауна эта была вымыта из подстилающих отложений куяльника, которые, соответственно, могут иметь возраст около 2 млн лет назад или несколько более молодой, т.е. палеоэоплейстоценовый. Вышележащая террасовидная толща по палеомагнитным данным характеризуется чередованием слоев с прямой и обратной

намагниченностью. Вероятно, они могут быть сопоставлены с эпизодом Харамилью, и более ранней частью эпохи Матуяма [39, с. 28]. Учитывая полный интервал возраста эпизода Харамилью (1.07–0.99 млн лет), можно допустить, что возраст формирования данной толщи около 1.5–1 млн лет и соответствует раннему эоплейстоцену (раннему калабрию).

Верхнее колено флексурного перегиба Таманского сегмента Крымско-Кавказской флексурно-разрывной зоны на антиклинали Синея Балки осложнено грабеном растяжения, выполненным среднеэоплейстоценовыми костеносными отложениями местонахождения Синяя Балка/Богатыри (рис. 8) [28].

Рассматриваемый грабен погружен в куяльницкие отложения – пески и темные глины с включениями материала грязевого вулканизма. Во многих обнажениях рядом с грабеном видно внедрение по трещинам грязевого материала в куяльницкие отложения [27]. В обнажениях, расположенных в присводовой части антиклинального увала к западу от грабена, наблюдаются многочисленные вертикальные каналы грязевого вулканизма. Количество грязевулканического материала местами столь велико, что некоторые авторы предлагают выделять здесь “ксенолитические пакеты” куяльницких отложений, залегающие в преобладающей грязевулканической матрице [15]. Во всяком случае, участие грязевого вулканизма и диапиризма в формировании современной антиклинали-увала представляется весьма значительным.

Наблюдаемый в грабене разрез среднеэоплейстоценовой маломощной толщи с юга на север (снизу-вверх по разрезу) представлен на рис. 9.



**Рис. 7.** Толща нижнеэоплейстоценовых ( $E_1$ ) отложений на своде антиклинали-увала. **А** – общий вид с номерами разрезов; **Б** – сопоставление разрезов, **В** – гравилитовый прослой; **Г** – чередование песчаных и гравийных прослоев; **Д** – граница несогласного налегания слоев. 1 – голоценовый почвенный слой; 2–7 – литология нижнеэоплейстоценовых отложений: 2 – охристые пески, 3 – пески серые с гравием, 4 – слабо сцементированный гравилит, 5 – серые супеси, 6 – суглинки серые, 7 – суглинки бурые и полосчатые (“зброидные”); 8 – темно-серые глины куяльницкого яруса (палеоплейстоцен); 9–10 – геологические границы: 9 – согласного напластования, 10 – размыва и несогласия; 11 – корреляционные линии.

1. Глины и тонкие пески с ракушечным детритом, линзовидно замещающиеся гравием и перекрывающиеся брекчийей. В брекчии наблюдаются мелкие смещения по трещинам. Общая мощность ~0.6 м.

В этом слое присутствует фауна мелких млекопитающих, близкая к фауне из точки Восточная [10, с. 56]. Не исключено, однако, что эта фауна является переотложенной из расположенных рядом куяльницких отложений (kl). Близость переотложения (возможно, всего на первые десятки метров) могла не сказаться на сохранности прочных зубов грызунов. Во всяком случае, реальный возраст этого слоя вряд ли мог существенно отличаться от возраста слоя 3, содержащего более молодую фауну.

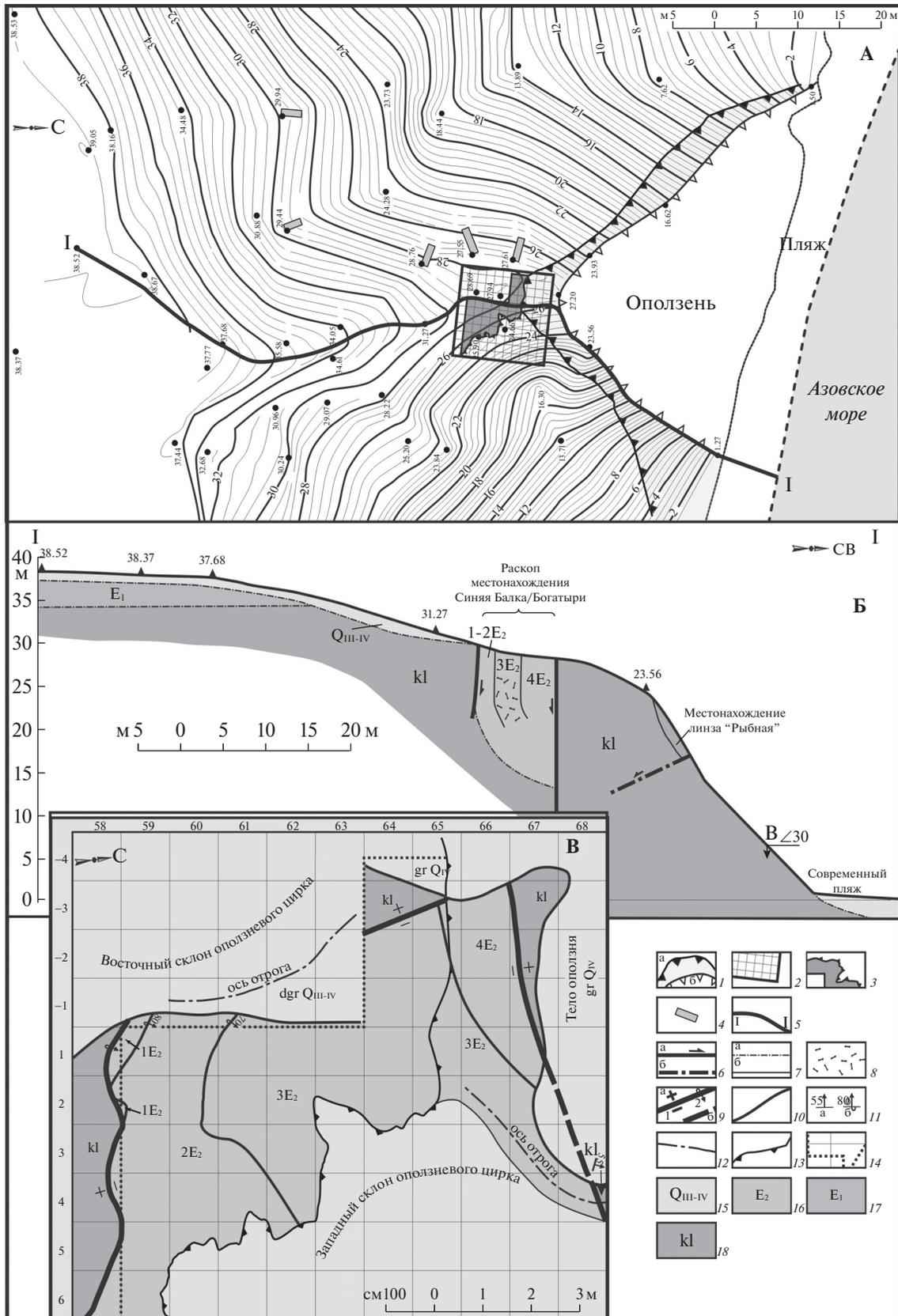
2. Пески серые, ожезненные в нижней части, с отдельными глыбами, костями и палеолитическими артефактами. Присутствие глыб свидетельствует о близости расчлененного рельефа. Не исключена пляжевая природа песков. Мощность 1.7 м.

3. Основной костеносный слой – карбонатизированные пески со щебнем и остатками крупных млекопитающих таманского фаунистического комплекса. Наличие групп костей, располагающихся в анатомической последовательности, свидетельствует о геологической инситуности костного материала, а присутствие артефактов указывает на вероятность посещения людьми этого места. Мощность слоя достигает 2.5 м.

Здесь также присутствует фауна мелких млекопитающих, для которой характерно присутствие *Allophaiomys ex gr. pliocaenicus* [11].

4. Плохо сортированный щебеник с грубо намечающейся слоистостью и слабым песчано-гравийно-дресвяным цементом. Встречаются отдельные кости и их обломки. В щебне преобладают угловатые обломки размером до 5 см в поперечнике. Видимая мощность до 2.5 м.

Общая мощность сохранившейся в грабене среднеэоплейстоценовой толщи составляет 7.5 м.



**Рис. 8.** Строение верхнего колена Северной Крымско-Кавказской флексуно-разрывной шовной зоны в районе местонахождения Синяя Балка/Богатыри: А – схема расположения объектов, Б – профиль по линии I-I, В – геологический план участка местонахождения Синяя Балка/Богатыри. На А: 1 – зона активизации оползнеобразования за 2007–

2011 гг. (бровки оползневых уступов: а – 2007 г., б – 2011 г.); 2 – участок детальных геологических исследований, показанный на В; 3 – археологический раскоп 2011 г.; 4 – археологические шурфы; 5 – линия геологического профиля I-I. На Б: 6 – разрывные нарушения: а – достоверные (стрелкой показано направление тектонического смещения), б – предполагаемые; 7 – геологические границы: а – толщ, б – слоев; 8 – основной костеносный слой. На В: 9 – разрывные нарушения: а – достоверные с указанием наклона сместителя (1 – вертикальное положение, 2 – опрокинутое залегание), б – предполагаемые; 10 – геологические границы; 11 – залегание слоев: а – нормальное, б – опрокинутое; 12 – орографические оси отрогов; 13 – бровки обрывов; 14 – границы археологического раскопа 2011 г. и плановая археологическая сеть. На Б и В – стратиграфические подразделения: 15 – верхний неоплейстоцен и голоцен нерасчлененные; 16–17 – эоплейстоцен: 16 – средний, 17 – нижний; 18 – куяльник.



Рис. 9. Среднеэоплейстоценовые костеносные отложения на местонахождении Синяя Балка/Богатыри (раскоп 2008 г.).

Фауна из местонахождения Синяя Балка включает остатки *Castor tamanensis* N.Ver., *Canis tamanensis* N.Ver., *Archidiskodon meridionalis tamanensis* Dubrovo, *Trogotherium cuvieri* Fisch., *Eguus aff. susenbornensis* Wust., *Elasmotherium caucasicum* Boris., *Bison cf. schoetensacki* Frend. [4, 5, 12].

Возраст слонов из таманского фаунистического комплекса понимается различно от 0.8–1.1 [4] до 1.6 млн лет [35]. Присутствие в данном местонахождении прогрессивной формы полевок *Allophaiomys ex gr. plioaenicus* позволяет считать его возраст “не моложе середины эоплейстоцена” [11, с. 56], т.е. порядка 1.2–1.4 млн лет [43]. Фауна сопоставляется с регионой MQR8 [39, с. 20] (возрастной интервал 1.2–1 млн лет). Слои 1–3 данного разреза обратно намагничены и считаются принадлежащими верхней части эпохи Матуяма, но более молодыми, чем эпизод Харамильо. Поэтому их возраст предлагалось оценивать интервалом 0.8–0.9 млн лет [40, с. 434]<sup>1</sup>. Суммируя все имеющиеся разноречивые данные можно остановиться на предварительной оценке возраста дан-

ного местонахождения интервалом в 1–0.9 млн лет и считать его среднеэоплейстоценовым ( $E_2$ ).

Слои 1–3 данного разреза являются, безусловно, террасовыми образованиями, а в слое 4 присутствуют или даже преобладают склоновые фации.

Небольшие различия в датировке водораздельной террасовидной раннеэоплейстоценовой толщи ( $E_1$ ) и залегающей в грабене несколько более молодой террасовой среднеэоплейстоценовой толщи ( $E_2$ ) местонахождения Синяя Балка/Богатыри, вероятно, свидетельствуют о локальном “расщеплении” регионального эоплейстоценового геоморфологического уровня в присводовой части антиклинали Синей Балки.

Приведенные выше данные свидетельствуют о начале конседиментационного вздымания антиклинали до отложения основных слоев костеносной пачки среднеэоплейстоценового местонахождения Синяя Балка.

На расположенных непосредственно к западу от местонахождения Синяя Балка/Богатыри взаимосвязанных обнажениях Родники-1 и 2 в основании разреза залегают куяльницкие отложения. В их кровле “в разрезе Родники-2 обнаружены остатки мелких млекопитающих сходные с наход-

<sup>1</sup> Первоначально по тем же палеомагнитным материалам из песков, подстилающих основной костеносный слой, возраст данного местонахождения оценивался интервалом 1.77–1.07 млн лет [11, с. 58].

ками в местонахождении Тиздар-2" [39, с. 15]. Эта фауна подтверждает палеоплейстоценовый возраст куяльницких отложений.

Выше с размывом залегают маломощные (0.6–1 м) культуросодержащие отложения, представленные неяснослоистым и линзовиднослоистым сочетанием галечника и гравийника. Они содержат обломки раковин и неопределимые мелкие обломки костей крупных млекопитающих, а в разрезе Родники-1 также остатки мелких млекопитающих. Литология и наклоны слоев культуросодержащих отложений на обнажениях Родники-1 и 2, типичны для склоновых отложений гравитационной природы, обычных для бортов и подножия невысоких возвышенностей. В этой пачке не прослеживаются уровни обживания, свойственные стоянкам. Очевидно это – местонахождение гравитационно перемещенного культуросодержащего материала. Присутствующая в разрезе Родники-1 прогрессивная форма серой полевки *Allophaiomys ex gr. pliosaenicus* (ранний-средний калабрий) [39, с. 18], очевидно, также является переотложенной.

Эти склоновые отложения подстилают 8–10-метровую толщу желто-серых и светло-серых прибрежно-морских песков, в которых отмечается перекрестная слоистость дюнного типа, характерная для морского побережья. Данная толща может рассматриваться в качестве морской террасы, на которой залегают маломощные (первые метры) делювиальные суглинки (рис. 10).

Для геоморфологии района важное значение имеет строение antecedentной долины Синяя Балка [23]. Она пересекает антиклинальный увал и открывается в сторону Азовского моря. Не исключено, что эта морская терраса, вложена в рассмотренную выше водораздельную раннеоплейстоценовую ( $E_1$ ) толщу или прислонена к ней. Ее цоколь имеет высоту около 32 м над уровнем моря. Налгающая на маломощные гравитационные отложения толща прибрежно-морских песков по геоморфологическому положению, сходна с песчаной толщей в обнажении у мыса Литвинова. Поэтому ее можно предположительно относить к раннечаудинской трансгрессии.

По палеомагнитным данным нижние 3.5 м песков имеют нормальную намагниченность и параллелизуются с эпизодом Харамилло (0.99–1.07 млн лет), а вышележащие 6 м – с концом эпохи Матуяма [40, с. 435]. Предположительно они могут охватывать возрастной диапазон 1.07–0.78 млн лет [39, с. 28]. Поэтому можно полагать, что данная терраса несколько моложе толщи с местонахождения Синяя Балка. Следует также отметить малую надежность палеомагнитных материалов из рассматриваемых рыхлых террасовых песков. Это подтверждается, например, тем, что отрицательная намагниченность показана и для

среднечетвертичных отложений блока Родники [39, с. 29]. Поэтому нельзя полностью исключать еще более молодого возраста данной террасы.

Поскольку раннечаудинская терраса, развитая между мысом Литвинова и местонахождением Кучугуры, содержит дотираспольских пресноводных моллюсков и, вероятно, дотираспольских млекопитающих, ее формирование началось близко к 0.85 млн лет (начало формирования тираспольского фаунистического комплекса [38, с. 423]). Следовательно, вполне допустимо параллелизовать песчаную толщу местонахождений Родники-1 и 2 с раннечаудинской террасой. Соответственно, культуросодержащие склоновые отложения местонахождений Родники-1 и 2 отлагались в эпоху предчаудинской регрессии.

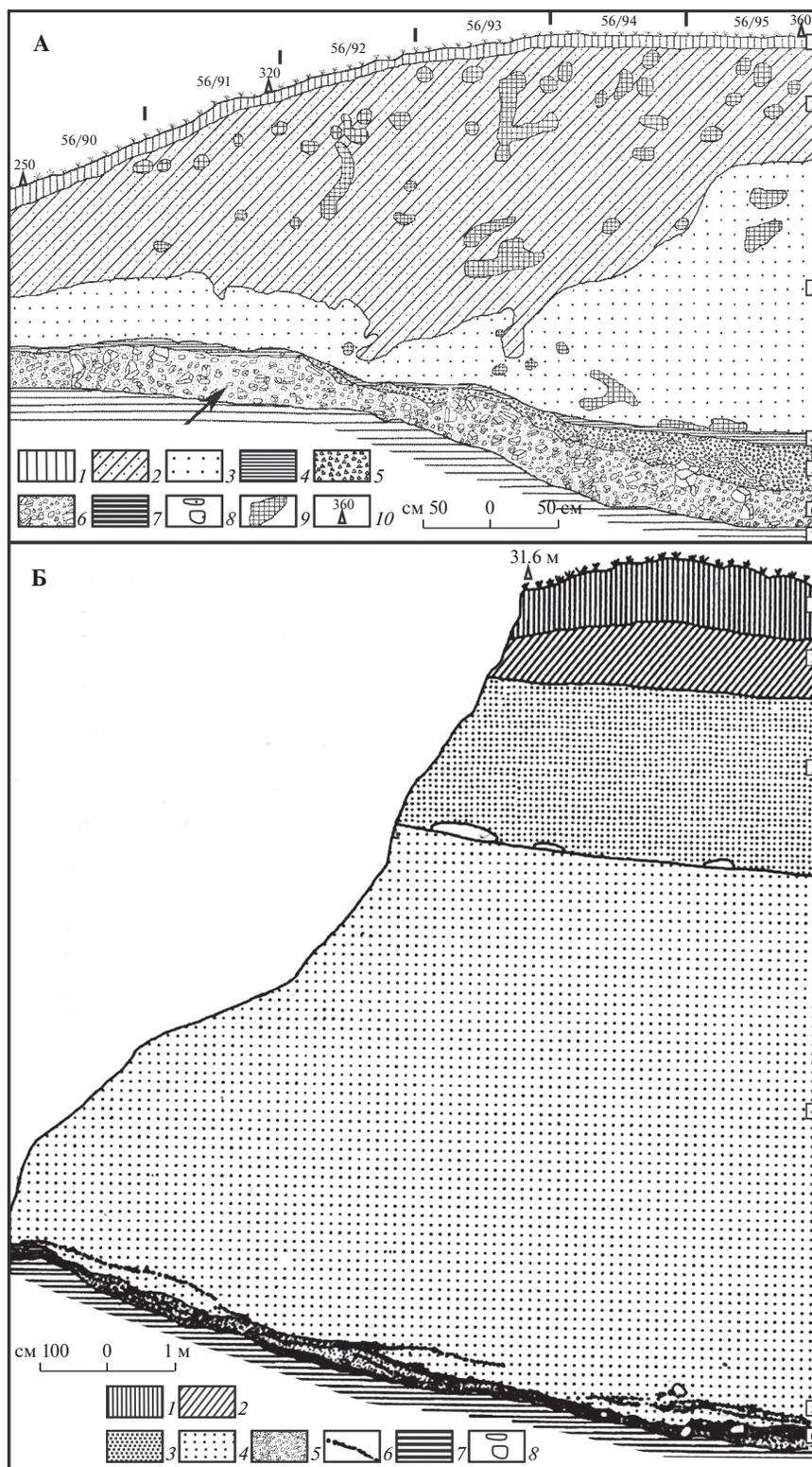
Данное сопоставление представляется более рациональным, чем мнение И.М. Губкина [7, 8], который сопоставлял с песками нижнечаудинской террасы, содержащими морских моллюсков (*Didacna parvula* Nal., *Monodacna subcolorata* Andr., *Adacna cf. plicata* Eichw. и др.), известных из бакинских слоев, пески основного местонахождения Синей Балки. Показательно, что Н.А. Лебедева [16] считала нижнечаудинские отложения мыса Чауда апшеронскими, а позднечаудинские – нижнеоплейстоценовыми.

Днище балки и развитые в ней две террасы расширяются к северу. Террасовые отложения вскрываются только на нижней террасе, где у русла балки их разрез мощностью около 4 м имеет следующий вид (снизу-вверх):

1. Брекчии грязно-бурые, желтоватые с суглинисто-песчаным заполнителем, залегают с размывом в основании (1–1.2 м).
2. Пески желтовато-бурые, супеси, суглинки, прослой глин, дресвяников и брекчии (2 м).
3. Суглинки серые, грязно-серые со щебнем (0.5–0.8 м).

Более молодые покровные образования представлены суглинками мощностью (до 2 м). Примерно в 150 м восточнее, где высота террасы достигает 18 м, разрез следующий:

1. На неровной с карманами границе размыва залегают брекчии с несортированными обломками и песчаным заполнителем; в основании встречаются обломки костей (0.3 м);
2. Глина зеленовато-серая со щебнем (0.15 м);
3. Дресвяник (0.15 м);
4. Пески буровато-серые, косослоистые (0.1 м);
5. Пески глинистые, супеси зеленовато-серые с дресвой и щебнем (0.15 м);
6. Брекчия щебнистая, охристо-бурая (0.7 м);
7. Пески грязно-серые со щебнем (0.1 м);
8. Щебенник темно-серый с песчаным заполнителем (0.1 м);



**Рис. 10.** Разрезы местонахождений Родники-1 (А) и Родники-2 (Б) [43].

На А: 1 – современная почва; 2–3 – песок: 2 – делювиальный серый и желтый, 3 – прибрежно-морской желто-серый, слоистый; 4 – окатыши плотной глины с гальками доломитов и песчано-гравийным заполнителем; 5 – гравий плотный с песком; 6 – галечник слабоокатанный с песчаным заполнителем; 7 – коренная темно-серая глина (куяльник); 8 – прослойки алевроитов; 9 – кротовины. 10 – места геодезических измерений (в м). Стрелкой отмечен культуросодержащий слой.

На Б: 1 – современная почва; 2 – суглинок коричневый, делювиальный; 3–4 – песок прибрежно-морской слоистый: 3 – желто-коричневато-серый, 4 – серо-желтый; 5 – галечник слабоокатанный, слоистый с песком, 6–7 – глина: 6 – серо-коричневая, 7 – темно-серая (куяльник); 8 – конкреции глинисто-карбонатные. Цифры справа – номера слоев на А и Б.

9. Глины известковистые, пятнистые серые, зеленовато-бурые (0.5–0.7 м);

10. Покровные суглинки (до 1.5 м).

В нижнем слое (по устному сообщению В.И. Жегалло) содержатся средненеоплейстоценовые (хазарского фаунистического комплекса) *Mammuthus primigenius* (ранняя форма), *Equus* sp., *Canis* sp. [23, с. 58].

Там же на восточном борту этой долины “в приобровочной” части уступа высотой около 19 м зафиксированы образующие террасовидную поверхность субаквальные отложения мощностью около 1.5 м, представленные ожелезненными брекчиями с суглинисто-дресвяным заполнителем, переходящие выше в пестроцветные глины. Они с размывом залегают на моноклиальной толще куяльнича. Здесь в них обнаружена почти целая нижняя челюсть лошади, которая по определению В.С. Байгушевой и В.В. Титова, принадлежит *Equus cf. chosaricus*, характерной для хазарского фаунистического комплекса второй половины среднего неоплейстоцена” [15, с. 32].

Очевидно, эти два местонахождения связаны с одной и той же средненеоплейстоценовой террасой. Соответственно, более древний внутрибалочный уровень, перекрытый восточнее в местонахождениях Родники-1 и 2 прибрежно-морскими песками, может считаться раннечаудинским (с условным индексом –  $Q_1$ ), а рассмотренный выше и начинающий “расщепляться” водораздельный уровень – эоплейстоценовым (с индексом –  $Q_E$ ).

Следует также отметить, что на восточном склоне возвышенности, связанной с антиклиналью Синей Балки, “в небольшом карьерчике выше зигзагообразного спуска дороги на пляж в 200 м к востоку от Синей Балки/Богатырей” наблюдаются “отложения, которые по литологическим особенностям и условиям залегания могут быть отнесены к нижнему неоплейстоцену (предположительно нижнечаудинский горизонт)”. “Здесь, напротив вершины западного изгиба упомянутой дороги, с резким несогласием на отмеченных выше эоплейстоценовых отложениях залегают толща белесых, светло-серых до кремовых, “сахарных” песков. В базальном горизонте мощностью до 0.5 м наблюдается обогащение обломочным материалом слабой окатанности, горизонт ожелезнен. В целом пески тонкие, отдельными прослоями и линзами ожелезненные, косослоистые, иногда с полуметровыми плитами уплотнения до состояния песчаника, сыпучие, с редкими угловатыми обломками осадочных пород. Толща срезает эоплейстоцен практически до самой бровки абразионного уступа. Контакт с надеием на юго-восток под углом около 30°” [15, с. 31]. Таким образом, на западе и востоке рассматриваемой возвышенности, наблюдается однотипное вложение (прислонение) предположительно ран-

нечаудинских отложений. Их некоторые литологические различия могут быть связаны с разнообразием фациальных обстановок прибрежной седиментации.

Изложенные выше материалы по району антиклинали Синей балки позволяют реконструировать определенную последовательность ряда тектонических и геоморфологических процессов.

Верхняя часть куяльницкой толщи накопилась в условиях мелководного бассейна [39, с. 31], т.е. первоначально была практически субгоризонтальной. Все известные здесь деформации образовались позже палеоплейстоцена.

В раннем эоплейстоцене (1.5–1 млн лет) на своде антиклинали появилась слабо орографически выраженная возвышенность, на которой накопилась маломощная (5–8 м) толща субаквально-субаэральных отложений ( $E_1$ ).

В результате последующего небольшого воздымания на северной периферии этого свода в абразионном врезе отложилась также маломощная (более 7 м) среднеэоплейстоценовая толща ( $E_2$ ) с фауной местонахождения Синяя Балка/Богатыри (1–0.9 млн лет).

Образование грабена, выполненного среднеэоплейстоценовыми отложениями с местонахождения Синяя Балка, связано с формированием верхнего колена флексурного перегиба на севере антиклинали Синей балки (см. рис. 8). Этот перегиб образовался после накопления террасовых отложений с указанным местонахождением.

При формировании перегиба на нем за счет растягивающих напряжений могла появиться раскрытая тектоническая трещина. Вполне вероятно эрозионно-овражная моделировка данной трещины. При этом базисом овражной эрозии мог стать последующий абразионный врез, служащий цоколем для морской террасы, обнаженной на местонахождениях Родники-1 и 2 [39, с. 31]. Поскольку подобная, тектонически предопределенная полость не могла долго существовать, ее заполнение отложениями среднеэоплейстоценовой террасы произошло, скорее всего, практически одновременно с накоплением раннечаудинской террасы.

Вне зависимости от истинной природы погружения массива среднеэоплейстоценовых пород во вмещающие палеоплейстоценовые (куяльницкие) отложения, наблюдаемые их современные соотношения (см. рис. 8В) по правилам геологического картирования должны интерпретироваться как грабенообразные, а границы этих толщ как разрывные.

Таким образом, активизация данного флексурного перегиба и орогенического воздымания началась с чаудинского этапа и определила здесь начало формирования Северной Крымско-Кав-

казской флексурно-разрывной зоны и наклона слоев куальника в районе местонахождений линза “рыбная”, Тиздар-1,-2 и Кермек. Данная активизация отвечает по времени началу значительного усиления новейшего Кавказского орогенеза, охватывающего неоплейстоцен [22].

Дальнейшее развитие этого сегмента флексурно-разрывной зоны сопровождалось воздыманием данного борта Таманского седловинообразного поднятия и формированием более молодых элементов террасового ряда. Голоценовая активизация разрывных смещений на Азовском побережье Таманского полуострова, зафиксированная тренчингом, относится к интервалу от 2926–2621 до 802–725 лет назад [33].

Современная тектоническая активность рассматриваемой зоны подтверждается еще и тем, что в апреле–июне 2011 г. в районе мыса Каменный и в 5 км западнее грязевого вулкана м. Пекло произошло быстрое поднятие прибрежного участка дна (длиной 435 м и шириной 50 м) с захватом береговой полосы. Максимальная амплитуда воздымания у береговой линии составляет 3.38 м, а в морской части – до 5 м. Это поднятие в плане совпадает с брахиантиклиналью м. Каменный. В ее ядре обнажаются отложения сармата (панагийская свита), а на крутопадающих крыльях – мэотиса (холоднодолиновская свита). На поверхности наблюдались субверикальные разрывные уступы высотой до 0.5 м, субпараллельные оси складки и осложненные диагональными сдвигами с амплитудой смещения до 1 м. Результаты сейсмоакустического профилирования допускают здесь миграцию глубинных флюидов [32].

### СЕВЕРОКЕРЧЕНСКИЙ СЕГМЕНТ ФЛЕКСУРНО-РАЗРЫВНОЙ ЗОНЫ

Северокерченский сегмент флексурно-разрывной зоны, расположенный еще далее к западу, изучен гораздо слабее. Здесь величина перегиба в подошве майкопской серии достигает 1–2 км (см. рис. 1), а в качестве южного края этой флексурно-разрывной зоны обычно рассматривается Южно-Азовский разлом с амплитудой перемещений по кровле майкопских отложений до 0.5 км. В зоне фиксируются флексурные и разрывные смещения верхнеплейстоценовых (карангатских) отложений с амплитудами до 50–60 м и скоростями до 0.3–0.5 мм/год [29]. В районе мыса Казантип в поднятом крыле Южно-Азовского разлома молодая активность ряда тектонических разрывов и современная подвижность территории, подтвержденная геодезическими измерениями, оказались настолько высоки, что обусловили прекращение работ по строительству Крымской АЭС [3, 6, 24, 42].

Следует отметить также определенные черты симметрии в строении северного и южного бортов Запднокавказского новейшего орогена и смежных краевых прогибов.

Во-первых, оба борта ограничены региональными Северной и Южной флексурно-разрывными зонами [20–22]. В них вертикальные амплитуды разрывных смещений меньше амплитуд флексурных деформаций. Для южного борта новейшего мегасвода это было показано ранее [26].

Во-вторых, наблюдается определенное сходство строения поперечного профиля Запднокубанского и Туапсинского краевых прогибов.

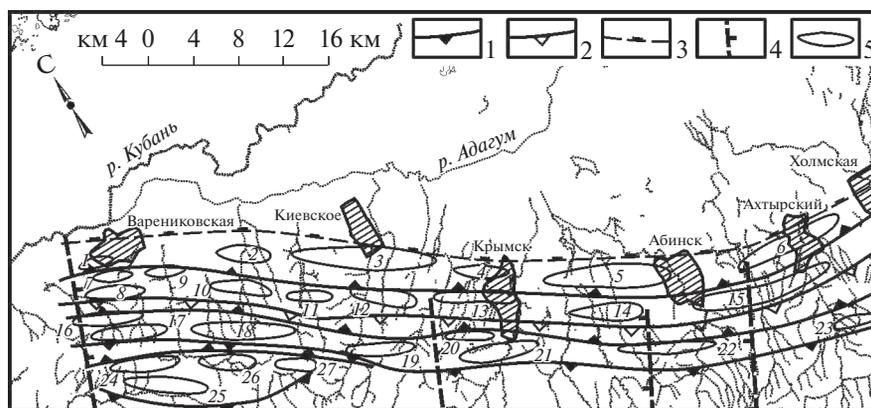
Для Туапсинского прогиба характерно выделение двух продольных зон. Северная (внутренняя) из них, более глубокая, отличается присутствием шести выраженных в рельефе продольных гряд диапировых складок, а южная (внешняя) характеризуется постепенным выполаживанием дислокаций и сокращением глубины прогиба [19, 36].

Сходное строение отмечается и для Запднокубанского прогиба, у которого южная (внутренняя) зона также характеризуется присутствием продольных складок, группирующихся в четыре цепи антиклиналей (рис. 11) [1; 17 и др.], а северная (внешняя) зона – постепенным выклиниванием прогиба.

### ВЫВОДЫ

Таким образом, Северная Крымско-Кавказская флексурно-разрывная зона представляет собой сложную построенную пограничную структуру на сложении новейших Крымско-Кавказской орогенической гряды и Индоло-Кубанского краевого прогиба. Она делится на три сегмента с различной историей развития. Это различие определяется преобразованием раннеорогенного Керченско-Таманского поперечного прогиба в позднеорогенный Керченско-Таманский седловинообразный элемент гряды. Соответственно различны по строению и возрасту сегменты флексурно-разрывной зоны.

Важно подчеркнуть, что краевые Северная и описанная ранее [26] Южная Крымско-Кавказские флексурно-разрывные зоны по амплитудам вертикальных смещений являются крупнейшими новейшими дизъюнктивными структурами рассматриваемого региона. Их положение на рубежах орогенического мегасвода Западного Кавказа и сочленяющихся с ним Запднокубанского и Туапсинского краевых прогибов определяет внутреннее единство и противоположную направленность движений каждой из этих смежных новейших мегаструктур. Все расположенные внутри данных мегаструктур дизъюнктивные структуры по амплитудам вертикальных смеще-



**Рис. 11.** Системы складок на сочленении Северо-Западного Кавказа с Западнокубанским краевым прогибом (по [17]). 1–3 – границы: 1 – основных структурных элементов, 2 – структурных зон второго порядка, 3 – структурных зон Западно-Кубанского прогиба; 4 – основные поперечные разломы (штрихи в сторону опущенного блока); 5 – антиклинальные складки: 1 – Варениковская; 2 – Северо-Адагумская; 3 – Кудако-Киевская; 4 – Северо-Крымская; 5 – Абино-Украинская; 6 – Северо-Ахтырская; 7 – Западно-Варениковская; 8 – Южно-Варениковская; 9 – Северо-Варениковская; 10 – Адагумская; 11 – Медовская; 12 – Арнаутская; 13 – Крымская; 14 – Украинская; 15 – Ахтырско-Бугундырская; 16 – Шуго; 17 – Верхне-Чекупская; 18 – Гладковская; 19 – Даманская; 20 – Южно-Крымская; 21 – Нижне-Баканская; 22 – Южно-Абинская; 23 – Хабльская; 24 – Северо-Шумайская; 25 – Шумайская; 26 – Красно-Партизанская; 27 – Псифская.

ний меньше краевых практически на порядок величин.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байрак И.К. Нефтегазоносность мезозоя краевых прогибов Предкавказья. М.: Наука, 1982. 82 с.
2. Беляевский В.В., Егоркин А.В., Солодилов Л.Н., Ракитов В.А., Яковлев А.Г. Некоторые результаты применения методов естественных электромагнитных и сейсмических полей на Северном Кавказе // Физика Земли. 2007. № 4. С. 4–14.
3. Бондарь А.Л., Выкалюк С.В., Серебрякова Л.И., Энман С.В. Закономерности вертикальных движений земной поверхности в районе строительства Крымской АЭС // Физика Земли. 1994. № 4. С. 73–77.
4. Вангенгейм Э.А., Векуа М.Л., Жегалло В.И., Певзнер М.А., Тактакишвили И.Г., Тесаков А.С. Положение таманского фаунистического комплекса в стратиграфической и магнитохронологической шкалах // Бюлл. КИЧП. 1991. № 60. С. 41–52.
5. Верещагин Н.К. Остатки млекопитающих из нижнечетвертичных отложений Таманского полуострова // Тр. ЗИН АН СССР. 1957. Т. 22. С. 9–74.
6. Геология и геодинамика района Крымской АЭС / [Гавриленко Н.М., Чекунов А.В., Шнюков Е.Ф. и др.]. Киев: Наукова думка, 1992. 188 с.
7. Губкин И.М. Заметка о возрасти слоев с *Elasmotherium*, *Elephas* на Таманском полуострове // Изв. Рос. АН. 1914. Сер. 6. Т. 8. № 9. С. 587–590.
8. Губкин И.М. Основные вопросы разработки нефтяных месторождений Ново-Грозненского и Майкопского районов // Нефтяное хозяйство. 1930. № 11. С. 517–527.
9. Губкин И.М., Варенцов М.И. Геология нефтяных и газовых месторождений Таманского полуострова и ближайшие задачи разведки на газ в пределах Таманского полуострова // Природные газы. 1933. Сб. № 7.
10. Додонов А.Е., Тесаков А.С., Симакова А.Н. Таманское местонахождение фауны млекопитающих Синяя Балка: новые данные по геологии и стратиграфии // Ранний палеолит Евразии: новые открытия: матер. междунар. конф. Ростов-на-Дону: Южный науч. центр РАН. 2008. С. 53–57.
11. Додонов А.Е., Трубихин В.М., Тесаков А.С. Палеомагнетизм костеносных отложений местонахождения Синяя Балка/Богатыри // Ранний палеолит Евразии: новые открытия: матер. междунар. конф. Ростов-на-Дону: Южный науч. центр РАН. 2008. С. 57–58.
12. Дуброво И.А. Новые данные о таманском фаунистическом комплексе // Бюлл. МОИП, отдел геологии. 1963. Т. 32. В. 6. С. 94–99.
13. Дьяконов А.И., Байдов Ф.К., Кузьменко Ю.Д. Типы локальных структур геосинклинальной и переходной областей (на примере западного окончания Большого Кавказа) // Тектоника Сибири. Т. 5. М.: Наука, 1972. С. 149–153.
14. Жабрев И.П., Дворцова Л.А., Буряк В.Н. О развитии разрывных нарушений в неогеновых отложениях Крымско-Варениковского района // Геол. сборник (Тр. КФ ВНИИнефти). Вып. 13. Л.: Недра, 1964. С. 114–126.
15. Измайлов Я.А., Щелинский В.Е. Геологическая ситуация раннепалеолитических местонахождений в Южном Приазовье на Таманском полуострове // Древнейший Кавказ: перекресток Европы и Азии. СПб.: ИИМК РАН, 2013. С. 20–39.
16. Лебедева Н.А. Корреляция антропогенных толщ Понто-Каспия. М.: Наука, 1978. 136 с.
17. Левкин Ф.И., Сидоренко С.Ф. Некоторые результаты геолого-поисковых работ на нефть и газ в мело-

- вых отложениях Северо-западного погружения большого дна северо-восточной части Черного моря // Геол. сб. (Тр. КФ ВНИИнефти). В. 13. Л.: Недра, 1964. С. 190–199.
18. Мейснер Л.Б., Туголесов Д.А. Верхнекайнозойские прогибы дна северо-восточной части Черного моря // Геотектоника. 1981. № 6. С. 109–119.
19. Мейснер Л.Б., Туголесов Д.А. Туапсинский прогиб – впадина с автономной складчатостью // Геотектоника. 1998. № 5. С. 76–85.
20. Несмеянов С.А. Основные черты неоструктурного районирования Северо-Западного Кавказа // ДАН СССР. 1986. Т. 291. № 6. С. 1449–1453.
21. Несмеянов С.А. Приповерхностные новейшие структуры Северо-западного Кавказа и смежных областей // Матер. по сейсмическому районированию Северо-Западного Кавказа. М.: Наука, 1991. С. 4–44.
22. Несмеянов С.А. Неоструктурное районирование Северо-Западного Кавказа (опережающие исследования для инженерных изысканий). М.: Недра, 1992. 254 с.
23. Несмеянов С.А. Геоморфологические аспекты палеоэкологии горного палеолита (на примере Западного Кавказа). М.: Научный мир, 1999. 392 с.
24. Несмеянов С.А. Инженерная геотектоника. М.: Наука, 2004. 780 с.
25. Несмеянов С.А. Генетические комплексы континентальных отложений. М.: Книга и Бизнес, 2012. 397 с.
26. Несмеянов С.А., Воейкова О.А. Неотектоника зоны сочленения мегасвода Большого Кавказа с Черноморской мегавпадиной // Геоэкология. 2021. № 3. С. 3–18.
27. Несмеянов С.А., Леонова Н.Б., Воейкова О.А. Палеоэкологическая реконструкция района Богатырей и Синей Балки // Древнейшие обитатели Кавказа и расселение предков человека в Евразии. (Тр. ИИМК РАН. Т. XXXV). СПб.: Петербургское Востоковедение, 2010. С. 47–61.
28. Несмеянов С.А., Кулаков С.А. Геологическое строение раннепалеолитической стоянки Богатыри/Синяя балка // Древнейший Кавказ: перекресток Европы и Азии. СПб.: ИИМК РАН, 2013. С. 40–50.
29. Никонов А.А. О сильных землетрясениях на Большом Кавказе в I тысячелетии н. э.: пересмотр исходных данных и каталога // Физика Земли. 1994. № 7–8. С. 107–112.
30. Овсяченко А.Н. Соотношение различных форм современных тектонических деформаций на Северо-Западном Кавказе // Исследования по сейсмологии и современной геодинамике. М.: ИФЗ РАН, 2006. С. 89–104.
31. Орел В.Е. Продуктивность палеоценовых отложений на месторождении Глубокий Яр и перспективы их разведки на Черноморской площади // Геологический сборник (Тр. КФ ВНИИ. Вып. 13). Л.: Недра, 1964. С. 139–144.
32. Попков В.И., Фоменко В.А., Глазырин Е.А., Попков И.В. Катастрофическое тектоническое событие лета 2011 г. на Таманском полуострове // ДАН. 2013. Т. 448. № 6. С. 680–683.
33. Рогожин Е.А., Богатиков А.В., Овсяченко А.Н. Активные разломы и глубинное строение Керченского пролива // Геология и геофизика Юга России. 2015. № 1. С. 65–68.
34. Рогожин Е.А., Миллюков В.К., Миронов А.П., Горбатилов А.В., Овсяченко А.Н. Характеристики современных горизонтальных движений в зонах заметных землетрясений 21 века в центральном секторе Большого Кавказа по данным GPS-наблюдений и их связь с глубинным строением земной коры // Проблемы тектоники континентов и океанов: матер. ЛII Тектонического совещания. Т. II. М.: ГЕОС, 2019. С. 173–178.
35. Саблин М.В. Вероятный возраст местонахождения Синяя Балка (Богатыри) // Ранний палеолит Евразии: новые открытия: матер. междунар. конф. Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН. 2008. С. 96–99.
36. Тектоника мезозойских отложений Черноморской впадины / [Д.А. Туголесов, А.С. Горшков, Л.М. Мейснер и др.]. М.: Недра, 1985. 215 с.
37. Тесаков А.С. Биостратиграфия среднего плиоцена-эоплейстоцена Восточной Европы (по мелким млекопитающим). М.: Наука, 2004. 247 с.
38. Тесаков А.С., Титов В.В., Сотникова М.В., Бондарев А.А., Симакова А.Н., Фролов П.Д. Обновленная биохронологическая схема квартера восточной Европы и Западной Азии // Фундаментальные проблемы квартера: итоги изучения и основные направления дальнейших исследований: матер. X Всерос. сов. по изучению четвертичного периода. М.: ГЕОС, 2017. С. 422–424.
39. Тесаков А.С., Гайдаленок О.В., Соколов С.А., Фролов П.Д., Трифонов В.Г. и др. Тектоника плейстоценовых отложений северо-восточной части Таманского полуострова. Южное Приазовье // Геотектоника. 2019. № 5. С. 12–35.
40. Трубихин В.М., Чепалыга А.Л., Кулаков С.А. Возраст стратотипа Таманского комплекса и стоянок ольдованского типа на Тамани (по палеомагнитным данным) // Фундаментальные проблемы квартера: итоги изучения и основные направления дальнейших исследований: матер. X Всерос. сов. по изучению четвертичного периода. М.: ГЕОС, 2017. С. 432–434.
41. Фролов П.Д. Раннеплейстоценовая (куяльницкая) малакофауна местонахождения Тиздар (Таманский п-ов, Россия): стратиграфия и палеоэкология // Фундаментальные проблемы квартера: итоги изучения и основные направления дальнейших исследований: матер. VIII Всерос. сов. по изучению четвертичного периода. Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2013. С. 659–660.
42. Чекунов А.В., Гавриленко Н.М., Шнюков Е.Ф. и др. Геологическая структура и геодинамика района Крымской АЭС // Геофизический журнал. 1990. Т. 12. № 3. С. 3–27.
43. Щелинский В.Е., Додонов А.Е., Байгушева В.С., Кулаков С.А., Симакова А.Н., Тесаков А.С., Титов В.В. Раннепалеолитические памятники Таманского полуострова (Южное Приазовье) // Древнейшие обитатели Кавказа и расселение предков человека в Евразии. СПб.: Петербургское Востоковедение, 2010. С. 11–46.

## THE NORTHERN CRIMEAN-CAUCASIAN MARGINAL FLEXURE-RUPTURE ZONE

S. A. Nesmeyanov<sup>a</sup> and O. A. Voeikova<sup>a, #</sup>

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

<sup>#</sup> *E-mail: voa49@mail.ru*

The Northern Crimean-Caucasian flexural-rupture zone is a boundary structure at the junction of the newest Crimean-Caucasian orogenic ridge and the Indolo-Kuban foredeep. It is divided into three segments with different development histories. This difference is determined by late orogenic restructuring. The early orogenic Kerchensko-Taman transverse trough was transformed into the late orogenic Kerch-Taman saddle-shaped element of the ridge. Therefore, the segments of the flexural-rupture zone differ in their structure and age. The North and South Crimean-Caucasian flexural-discontinuous zones are the largest newest disjunctive structures in the region.

**Keywords:** *orogenic ridge, transverse trough, flexure-rupture zone, segment, graben, terrace, location*

### REFERENCES

1. Bayrak, I.K. *Neftgazonosnost' mezozoya krayevykh progibov Predkavkazia* [Oil and gas potential of the Mesozoic foredeeps in the CisCaucasus region]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 82 p. (in Russian)
2. Belyaevskii, V.V., Egorkin, A.V., Solodilov, L.N., Rakitov, V.A., Yakovlev, A.G. *Nekotorye rezul'taty primeneniya metodov estestvennykh elektromagnitnykh i seismicheskikh polei na Severnom Kavkaze* [Some results of the application of methods of natural electromagnetic and seismic fields in the North Caucasus]. *Fizika Zemli*, 2007, no. 4, pp. 4–14. (in Russian)
3. Bondar, A.L., Vyalyuk, S.V., Serebryakova, L.I., Enman S.V. *Zakonomernosti vertikal'nykh dvizhenii zemnoi poverkhnosti v raione stroitelstva Krymskoi AES* [Regularities of vertical movements of the earth's surface in the construction area of the Crimean NPP] *Fizika Zemli*, 1994, no. 4, pp. 73–77. (in Russian)
4. Vangengeim, E.A., Vekua, M.L., Zhegallo, V.I., Pevzner, M.A., Taktakishvili, I.G., Tesakov, A.S. *Polozheniye tamanskogo faunisticheskogo kompleksa v stratigraficheskoi i magnetokhronologicheskoi shkalakh* [The position of the Taman faunal complex in stratigraphic and magnetochronological scales]. *Byull. KICHP*, 1991, no. 60, pp. 41–52. (in Russian)
5. Vereshchagin, N.K. *Ostatki mlekopitayushchikh iz nizhechetvertichnykh otlozhenii Tamanskogo poluostrova* [Remains of mammals from the lower Quaternary deposits of the Taman Peninsula]. *Tr. ZIN AN SSSR*, vol. 22, 1957, pp. 9–74. (in Russian)
6. *Geologiya i geodinamika raiona Krymskoi AES* [Geology and geodynamics of the Crimean NPP area] Kiev, Naukova dumka Publ., 1992, 188 p. (in Russian)
7. Gubkin, I.M. *Zametka o vozraste slojev s Elasmotherium, Elephas na Tamanskom poluostrove* [A note about the age of layers with Elasmotherium, Elephas on the Taman Peninsula]. *Izvestiya Rossiiskoi AN*, 1914, ser. 6, vol. 8, no. 9, pp. 587–590. (in Russian)
8. Gubkin, I.M. *Osnovnye voprosy razrabotki neftyanykh mestorozhdenii Novo-Groznskogo i Maykopskogo raionov* [The main issues of the development of oil fields in the Novo-Grozny and Maikop districts]. *Neftyanoye khozyaystvo*, 1930, no. 11, pp. 517–527. (in Russian)
9. Gubkin, I.M., Varentsov, M.I. *Geologiya neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii Tamanskogo poluostrova i blizhaishie zadachi razvedki na gaz v predelakh Tamanskogo poluostrova* [Geology of oil and gas fields of the Taman Peninsula and the immediate tasks of gas exploration within the Taman Peninsula]. *Prirodnye gazy*. Collection of articles no. 7, 1933. (in Russian)
10. Dodonov, A.E., Tesakov, A.S., Simakova, A.N. *Tamanskoe mestonakhozhdenie fauny mlekopitayushchikh Sinyaya Balka: novye dannye po geologii i stratigrafii* [Taman location of mammal fauna in Sinyaya Balka: new data on geology and stratigraphy]. *Trudy mezhdunarodnoi konferentsii. Rannii paleolit Evrazii: novye otkrytiya* [Proc. int. Conf.: early Paleolithic in Eurasia: new discoveries.]. Rostov-on-Don, 2008, pp. 53–57. (in Russian)
11. Dodonov, A.E., Trubikhin, V.M., Tesakov, A.S. *Paleomagnetizm kostonosnykh otlozhenii mestonakhozhdeniya Sinyaya Balka/Bogatyri* [Paleomagnetism of bone-bearing deposits in Sinyaya Balka/Bogatyri location]. *Trudy mezhdunarodnoi konferentsii. Rannii paleolit Evrazii: novye otkrytiya* [Proc. int. Conf.: early Paleolithic in Eurasia: new discoveries.]. Rostov-on-Don, 2008, pp. 57–58. (in Russian)
12. Dubrovo, I.A. *Novye dannye o tamanskom faunisticheskoi komplekse* [New data on the Taman fauna complex]. *Byull. MOIP, otдел geologii*, 1963, vol. 32, issue 6, pp. 94–99. (in Russian)
13. Diakonov, A.I., Baidov, F.K., Kuz'menko, Yu.D. *Tipy lokal'nykh struktur geosinklinal'noi i perekhodnoi oblasti (na primere zapadnogo okonchaniya Bol'shogo Kavkaza)* [Types of local structures of geosynclinal and transitional regions (on the example of the western end of the Greater Caucasus)]. *Tektonika Sibiri*, vol. 5, Moscow, Nauka Publ., 1972, pp. 149–153. (in Russian)
14. Zhabrev, I.P., Dvortsova, L.A., Buryak, V.N. *O razviti razryvnykh narushenii v neogenovykh otlozheniyakh Krymsko-Varenikovskogo raiona* [On the development of fault discontinuities in the Neogene deposits of the Crimean-Varenikovskii district]. *Tr. KF VNIInefiti*, is-

- sue 13, Leningrad, Nedra Publ., 1964, pp. 114–126. (in Russian)
15. Izmailov, Ya.A., Shchelinskii, V.E. *Geologicheskaya situatsiya rannepaleoliticheskikh mestonakhozhdenii v Yuzhnom Priazov'e na Tamanskom poluostrove* [Geological situation of early Paleolithic localities in the Southern Azov region on the Taman Peninsula]. *Drevneishii Kavkaz: perekrestok Evropy i Azii* [The most ancient Caucasus: Europe and Asia cross]. St. Petersburg, IIMK RAS, 2013, pp. 20–39. (in Russian)
  16. Lebedeva, N.A. *Korrelatsiya antropogenovykh tolshch Ponto-Kaspiya* [Correlation of anthropogenic strata of the Ponto-Caspian Sea]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 136 p. (in Russian)
  17. Levkin, F.I., Sidorenko, S.F. *Nekotorye rezul'taty geologo-poiskovykh rabot na nef't' i gaz v melovykh otlozheniyakh Severo-zapadnogo pogruzheniya bol'shogo Kavkaza* [Cretaceous sediments of the Northwestern plunging of the Greater Caucasus]. *Tr. KVVNIinefti*, issue 13, Leningrad, Nedra Publ., 1964, pp. 190–199. (in Russian)
  18. Meisner, L.B., Tugolesov, D.A. *Verkhnekainozoiskie progiby dna severo-vostochnoi chasti Chernogo morya* [Upper Cenozoic troughs on the bottom of the northeastern part of the Black Sea]. *Geotektonika*, 1981, no. 6, pp. 109–119. (in Russian)
  19. Meisner, L.B., Tugolesov, D.A. *Tuapsinskii progib – vpadina s avtonomnoi skladchatost'yu* [Tuapse trough as a depression with autonomous folding]. *Geotektonika*, 1998, no. 5, pp. 76–85. (in Russian)
  20. Nesmeyanov, S.A. *Osnovnye cherty neostrukturnogo raionirovaniya Severo-Zapadnogo Kavkaza* [The main features of the non-structural zoning of the North-West Caucasus]. DAN SSSR, 1986, vol. 291, no. 6, pp. 1449–1453. (in Russian)
  21. Nesmeyanov, S.A. *Prioverkhnostnye noveishie struktury Severo-zapadnogo Kavkaza i smezhnykh oblastei* [Near-surface recent structures of the North-West Caucasus and related areas]. *Materialy po seismicheskomu raionirovaniyu Severo-Zapadnogo Kavkaza* [Data on seismic zoning of the North-West Caucasus]. Moscow, Nauka Publ., 1991, pp. 4–44. (in Russian)
  22. Nesmeyanov, S.A. *Neostrukturnoe raionirovanie Severo-Zapadnogo Kavkaza (operezhayushchie issledovaniya dlya inzhenernykh izyskaniy)* [Neostuctural zoning of the North-Western Caucasus (advanced research for engineering surveys)]. Moscow, Nedra Publ., 1992, 254 p. (in Russian)
  23. Nesmeyanov, S.A. *Geomorfologicheskie aspekty paleoekologii gornogo paleolita (na primere Zapadnogo Kavkaza)* [Geomorphological aspects of paleoecology of mountain Paleolithic (by the example of Western Caucasus)]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 1999, 392 p. (in Russian)
  24. Nesmeyanov, S.A. *Inzhenernaya geotektonika* [Engineering geotectonics]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 780 p. (in Russian)
  25. Nesmeyanov, S.A. *Geneticheskie komplekсы kontinental'nykh otlozhenii* [Genetic complexes of continental sediments]. Moscow, Kniga i Biznes Publ., 2012, 397 p. (in Russian)
  26. Nesmeyanov, S.A., Voeikova, O.A. *Neotektonika zony sochleneniya megasvoda Bol'shogo Kavkaza s Chernomorskoj megavpadinoj* [Neotectonics of the conjunction zone of the megavault of the Greater Caucasus with the Black Sea megadepression]. *Geotektonika*, 2021, no. 3, pp. 3–18. (in Russian)
  27. Nesmeyanov, S.A., Leonova, N.B., Voeikova, O.A. *Paleoekologicheskaya rekonstruktsiya raiona Bogatyrei i Sinei Balki* [Paleoecological reconstruction of the Bogatyr and Sinyaya Balka area]. *Drevneishiye obitateli Kavkaza i rasseleniye predkov cheloveka v Evrazii* [The most ancient inhabitants of the Caucasus and the settlement of human ancestors in Eurasia]. St. Petersburg, Peterburgskoe Vostokovedenie Publ., 2010, pp. 47–61. (in Russian)
  28. Nesmeyanov, S.A., Kulakov, S.A. *Geologicheskoe stroenie rannepaleoliticheskoi stoyanki Bogatyri/Sinyaya balka* [Geological structure of the Early Paleolithic Bogatyr/Sinyaya Balka]. *Drevneishii Kavkaz: perekrestok Evropy i Azii* [The Ancient Caucasus: the crossroads of Europe and Asia]. St. Petersburg, IIMK RAN, 2013, pp. 40–50. (in Russian)
  29. Nikonov, A.A. *O sil'nykh zemletryaseniyyakh na Bol'shom Kavkaze v I tysyacheletii n.e.: peresmotr iskhodnykh dannykh i kataloga* [On strong earthquakes in the Greater Caucasus in the I millennium A.D.: revision of the initial data and catalog]. *Fizika Zemli*, 1994, no. 7–8, pp. 107–112. (in Russian)
  30. Ovsyuchenko, A.N. *Sootnosheniye razlichnykh form sovremennykh tektonicheskikh deformatsii na Severo-Zapadnom Kavkaze* [Correlation between various forms of modern tectonic deformations in the North-Western Caucasus]. *Issledovaniya po seysmotektonike i sovremennoi geodinamike* [Studies in seismotectonics and modern geodynamics]. Moscow, IFZ RAN Publ., 2006, pp. 89–104. (in Russian)
  31. Orel, V.E. *Produktivnost' paleotsenovykh otlozhenii na mestorozhdenii Glubokii Yar i perspektivy ikh razvedki na Chernomorskoj ploshchadi* [Productivity of Paleocene deposits at the Glubokii Yar deposit and prospects for their exploration in the Black Sea area]. *Geologicheskii sbornik. Tr. Krasnodarskogo filiala Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta nef'ti* [Geological collection of article. Proc. Krasnodar branch of the All-Union Scientific Research Institute of Petroleum. Vol. 13]. Leningrad, Nedra Publ., 1964, pp. 193–144. (in Russian)
  32. Popkov, V.I., Fomenko, V.A., Glazyrin, E.A., Popkov, I.V. *Katastroficheskoe tektonicheskoe sobytie leta 2011 g na Tamanskom poluostrove* [Catastrophic tectonic event of summer 2011 on the Taman Peninsula]. DAN, 2013, vol. 448, no. 6. pp. 680–683. (in Russian)
  33. Rogozhin, E.A., Bogatkov, A.V., Ovsyuchenko, A.N. *Aktivnye razlomy i glubinnoe stroenie Kerchenskogo proliva* [Active faults and deep structure of the Kerch Strait]. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*, 2015, no. 1. pp. 65–68. (in Russian)
  34. Rogozhin, E.A., Milyukov, V.K., Mironov, A.P., Gorbatikov, A.V., Ovsyuchenko, A.N. *Kharakteristiki sovremennykh gorizonta'lnykh dvizhenii v zonakh zametnykh zemletryaseniy 21 veka v tsentral'nom sektore Bol'shogo Kavkaza po dannym GPS nablyudenii i ikh svyaz' s glubinnym stroeniyem zemnoi kory* [Characteristics of modern horizontal movements in the zones of noticeable earthquakes of the 21st century in the central

- sector of the Greater Caucasus according to GPS observations and their relationship with the deep structure of the Earth's crust]. *Materialy LII Tektonicheskogo soveshchaniya "Problemy tektoniki kontinentov i okeanov"* [Proc. of the LII Tectonic workshop "Problems of tectonics of continents and oceans". Vol. II]. Moscow, GEOS Publ., 2019, pp. 173–178. (in Russian)
35. Sablin, M.V. *Veroyatnyi vozrast mestonakhozhdeniya Sinyaya Balka (Bogatyr)* [Probable age of the location of the Blue Beam (Bogatyr) location]. *Ranniy paleolit Evrazii: novye otkrytiya. Trudy mezhdunarodnoi konferentsii*. [Proc. Int. Simp.: Early Paleolithic of Eurasia: new discoveries]. Rostov-on-Don, 2008, pp. 96–99. (in Russian)
  36. *Tektonika mezokainozoiskikh otlozhenii Chernomorskoj vpadiny* [Tectonics of the Meso-Cenozoic sediments of the Black Sea basin]. Moscow, Nedra Publ., 1985, 215 p. (in Russian).
  37. Tesakov, A.S. *Biostratigrafiya srednego plitsena-eopleistotsena Vostochnoi Evropy (po melkim mlekopitayushchim)* [Biostratigraphy of the Middle Pliocene-Eopleistocene of Eastern Europe (on small mammals)]. Moscow, Nauka Publ., 2004, 247 p. (in Russian)
  38. Tesakov, A.S., Titov, V.V., Sotnikova, M.V., Bondarev, A.A., Simakova, A.N., Frolov, P.D. *Obnovlennaya biokhronologicheskaya skhema kvartera vostochnoi Evropy i Zapadnoi Azii* [Updated biochronological scheme of the quarter of Eastern Europe and Western Asia]. *Materialy X Vserossiiskogo soveshchaniya po izucheniyu chetvertichnogo perioda (Moskva. 25–29 sentyabrya 2017 g.)* [Proc. the X All-Russian Meeting on the Study of the Quaternary Period (Moscow, September 25–29, 2017)]. Moscow, Geos Publ., 2017, pp. 422–424. (in Russian).
  39. Tesakov, A.S., Gaidalenok, O.V., Sokolov, S.A., Frolov, P.D., Trifonov, V.G., Simakova, A.N., Latyshev, A.V., Titov, V.V., Shchelinskii, V.E. *Tektonika pleistotsenovyykh otlozhenii severo-vostochnoi chasti Tamanskogo poluostrova. Yuzhnoe Priazov'e* [Tectonics of Pleistocene deposits of the northeastern part of the Taman Peninsula. Southern Azov region]. *Geotektonika*, 2019, no. 5, pp. 12–35. (in Russian)
  40. Trubikhin, V.M., Chepalyga, A.L., Kulakov, S.A. *Vozrast stratotipa Tamanskogo kompleksa i stoyanok oldovanskogo tipa na Tamani (po paleomagnetnym dannym)* [The age of the stratotype of the Taman complex and Moldovan-type sites on Taman (according to paleomagnetic data)]. *Materialy X Vserossiiskogo soveshchaniya po izucheniyu chetvertichnogo perioda* [Proc. the X All-Russian Meeting on the Study of the Quaternary period]. Moscow, Geos Publ., 2017, pp. 432–434. (in Russian)
  41. Frolov, P.D. *Rannepleistotsenovaya (kuyal'nitskaya) malakofauna mestonakhozhdeniya Tizdar (Tamanskii pov, Rossiya): stratigrafiya i paleoekologiya* [Early Pleistocene (kuyal'nitskaya) malacofauna of the Tizdar locality (Taman peninsula, Russia): Stratigraphy and paleoecology]. *VIII Vserossiiskoe soveshchanie po izucheniyu chetvertichnogo perioda: "Fundamental'nye problemy kvartera. Itogi izucheniya i osnovnyye napravleniya dal'neishikh issledovaniy"*. [VIII All-Russian meeting on the study of the Quaternary period: "Fundamental problems of the quarter, the results of the study and the main directions of further research"]. Rostov-on-Don, YuNTs RAN, 2013, pp. 659–660. (in Russian)
  42. Chekunov, A.V. Gavrilenko, N.M., Shnyukov, E.F., et al. *Geologicheskaya struktura i geodinamika raiona Krymskoi AES* [Geological structure and geodynamics of the Crimean NPP area]. *Geofizicheskii zhurnal*, 1990, vol. 12, no. 3, pp. 3–27. (in Russian)
  43. Shchelinskii, V.E., Dodonov, A.E., Baigusheva, V.S., Kulakov, S.A., Simakova, A.N., Tesakov, A.S., Titov, V.V. *Rannepaleoliticheskie pamyatniki Tamanskogo poluostrova (Yuzhnoye Priazov'e)* [Paleolithic monuments of the Taman Peninsula (Southern Azov region)]. *"Drevneyshiy obitateli Kavkaza i rasseleniye predkov cheloveka v Evrazii"* [The oldest inhabitants of the Caucasus and the settlement of human ancestors in Eurasia]. St. Petersburg, Peterburgskoe vostokovedenie, 2010, pp. 11–46. (in Russian)

---

---

**ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ  
И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

---

---

УДК 55.550

**ТЕХНОГЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД  
НА ЗАСТРОЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ (ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ,  
ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ  
АСПЕКТЫ)**© 2022 г. В. В. Фуникова<sup>1,\*</sup>, И. В. Дудлер<sup>2,\*\*</sup>, Р. Т. Бутаев<sup>3,\*\*\*</sup><sup>1</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет,  
Ленинские горы, ГСП 1, Москва, 119234 Россия*<sup>2</sup> *Научный совет РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии,  
Уланский переулок, д. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия*<sup>3</sup> *ООО “Альтеркаса”, 1-й Тружеников пер., 17А, Москва, 119121 Россия*

\*E-mail: funikova@geol.msu.ru

\*\*E-mail: div-33@yandex.ru

\*\*\*E-mail: butaev.r.t@gmail.com

Поступила в редакцию 19.10.2021 г.

После доработки 11.12.2021 г.

Принята к публикации 20.12.2021 г.

Отмечается перманентный характер техногенного изменения на застроенных территориях режима подземных вод, являющихся наиболее динамичной компонентой геологической среды. Обращается внимание на комплексные изменения режима подземных вод, которые могут иметь целый ряд негативных последствий геоэкологического, инженерно-геологического и гидрогеологического плана, определяющих, в том числе и сложность инженерно-геологических условий строительства. Предполагается определенная цикличность техногенных изменений режима подземных вод и геологической среды в целом, отвечающим этапам технического прогресса и экономического уровня развития городов. Кратко освещаются типичные для XX и начала XXI веков оседания поверхности территорий мегаполисов в связи с мощными и длительными водозаборами для питьевого и технического водоснабжения. Подчеркнуто значение долгосрочных прогнозов техногенного изменения режима подземных вод, в частности длительных прогнозов подтопления на примере Москвы. Показано особое значение контролирования и учета изменения градиента вертикальной фильтрации для застроенных территорий с потенциальной опасностью развития карстово-суффозионных процессов. В заключении отмечается необходимость системного подхода к изучению и учету техногенных изменений режима подземных вод, в том числе: организации гидрогеологического мониторинга; включения карты градиента вертикальной фильтрации в состав комплекта гидрогеологических карт; составления гидрогеологических моделей территории города и его административных округов, а также особо опасных и технически сложных объектов (на основе математического, аналогового и физического моделирования); ведения долгосрочного прогнозирования.

**Ключевые слова:** *подземные воды, техногенные изменения режима подземных вод, геоэкологические, инженерно-геологические и гидрогеологические аспекты*

DOI: 10.31857/S0869780922020035

**ВВЕДЕНИЕ**

В спектре перманентно возрастающих техногенных изменений геологической среды особое значение имеют техногенные изменения подземных вод, являющихся ее самой динамичной компонентой. Именно подземные воды наиболее быстро и резко реагируют на многие виды техногенных воздействий.

На актуальность этих вопросов было обращено внимание еще в начале 80-х годов прошлого

века. В декабре 1983 г. секцией литосферы Научного совета АН СССР по проблемам биосферы совместно с секцией гидрогеологии и инженерной геологии Центрального правления Научно-технического геологического общества (НТГО) Центральных районов РФ был проведен семинар “Современные инженерно-геологические и гидрогеологические методы комплексной оценки и прогноза изменений геологической среды под влиянием инженерно-хозяйственной деятельно-

сти человека". В опубликованных материалах этого семинара [13] обсуждались методологические вопросы, задачи и методы комплексной оценки и прогноза изменений геологической среды, особенности этих изменений применительно к разным видам антропогенных воздействий, в том числе при разных видах строительства, а также вопросы определения экономического ущерба, вызываемого техногенными воздействиями на геологическую среду. Однако в то время все эти вопросы еще не рассматривались на уровне важнейшей проблемы, не поднимался вопрос о нарастающей опасности техногенных изменений геологической среды и приоритетности их изучения инженерной геологией и инженерной гидрогеологией, не ставился остро вопрос о предельно допустимых техногенных воздействиях на геологическую среду. Это стало очевидным лишь в начале XXI века [11, 21]. Тем не менее, материалы статей, опубликованных в [13], не потеряли своей актуальности. Особо выделим статью Г.А. Голодковской и Л.М. Демидюк [4], в которой обсуждалась необходимость создания моделей геологической среды в составе природно-технических систем, выделения типов изменения геологической среды и оценки степени ее изменения, определения уровня допустимой техногенной нагрузки на разные типы геологической среды, разработки критериев для оценки инженерно-геологической устойчивости территории и сравнения различных инженерно-геологических обстановок. Высказанные в данной работе положения в полной мере справедливы и применительно к комплексным исследованиям техногенного изменения режима подземных вод на освоенных территориях.

Рассматривая проблему трансформации гидрогеологических условий в современную эпоху, в широком смысле правомерно говорить о техногенном изменении режима подземных вод (т.е. изменении со временем их качественных и количественных характеристик), существенно влияющем на все компоненты геологической среды и развивающиеся в ее границах геодинамические процессы, в том числе инженерно-геологические.

Следует подчеркнуть существенную роль каждого из параметров подземных вод: химический и минеральный составы, температура, уровни проявления и установления, величины напора, градиенты горизонтальной и вертикальной фильтрации, скорость движения и расходы, бальнеологические и другие характеристики.

В общем случае необходимо учитывать геоэкологические, инженерно-геологические и гидрогеологические последствия техногенного изменения режима подземных вод. Среди наиболее значимых отметим ряд из них.

*Геоэкологические:*

– оседание поверхности территорий мегаполисов, расположенных вблизи морских аквато-

рий, в связи с повышением уровня мирового океана, и опасностью их затопления;

– загрязнение подземных вод (химическое, тепловое, радиационное, биологическое), в том числе артезианских;

– загрязнение почв и грунтов при инфильтрации бытовых и промышленных стоков;

– попадание загрязненных подземных вод в поверхностные воды;

– негативное влияние на биосферу в границах влияния геологической среды.

*Инженерно-геологические:*

– оседание застроенных территорий под влиянием мощных водозаборов (что может приводить к развитию дополнительных осадков и кренов зданий и сооружений, превышающих допустимые значения);

– локальные повышения сейсмичности территории (в том числе "наведенная сейсмичность" в зоне крупных водохранилищ с высотными плотинами);

– проявление потенциально возможных опасных геологических процессов (например, карсто-суффозионных);

– повышение интенсивности и масштаба распространения ряда инженерно-геологических процессов;

– изменение физико-механических свойств грунтов;

– изменение напряженно-деформированного состояния массива грунтов, повышение его влияния на конструкции подземных сооружений.

*Гидрогеологические:*

– нарушение естественного режима подземных вод и регионального баланса гидросферы в границах и зоне влияния застроенных территорий;

– проявление локальных сочетанных процессов затопления и подтопления застроенных территорий в зоне влияния крупных естественных и техногенных акваторий, а также в зонах регулярных наводнений.

Следует учитывать, что отмеченные процессы приводят к изменению характеристик ряда факторов, определяющих сложность инженерно-геологических условий строительства. Некоторые из параметров режима подземных вод часто не учитываются в должной мере. Это относится, в частности к температуре подземных вод. Между тем, по данным Б.Л. Горловского и Л.М. Шехтмана, на площадках эксплуатируемых тепловых и атомных электростанций в грунтовых водах температура повышается в среднем на 20°C (локально до 60°C), а межпластовых на 10°C [6]. Не случайно Харьковское отделение АЭП проводило (после известных проблем на Ровенской АЭС) специальные исследования для оценки влияния повы-

шения температуры подземных вод на возможность интенсификации карстовых процессов. Следует заметить, что и на территории городов температура подземных вод повышается (например, в Москве были зафиксированы локальные повышения температуры грунтовых вод до 30°C).

Техногенные изменения геологической среды, в том числе подземных вод, развиваются постепенно, в основном достаточно медленно, но в отдельных случаях могут носить скачкообразный характер (например, при сверхмощных взрывах, авариях на крупных промышленных и энергетических объектах, при особо интенсивном ведении строительных работ/реконструкции в условиях плотной городской застройки территорий). С инженерно-геологических позиций необходимо устанавливать предельно допустимые техногенные изменения геологической среды и категории опасности этих изменений [11]. В полной мере это относится и к техногенным изменениям режима подземных вод.

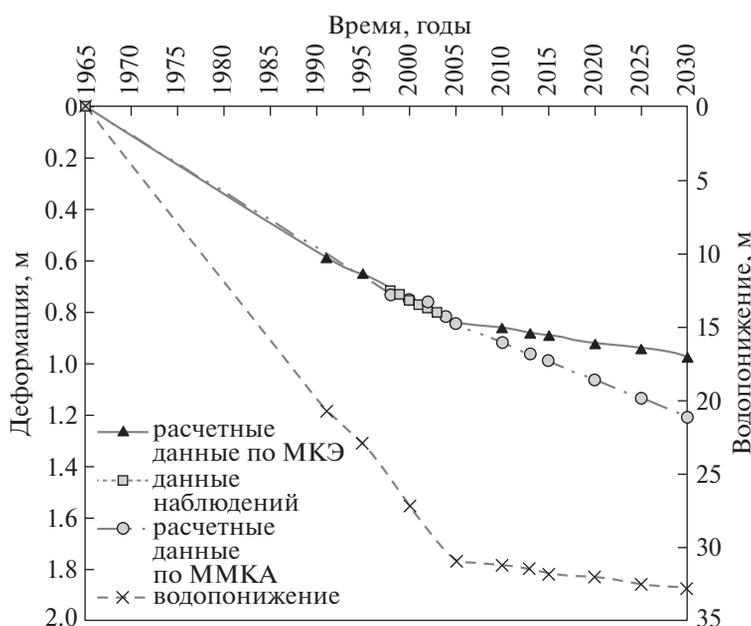
Остановимся несколько подробнее на некоторых опасных последствиях техногенных изменений режима подземных вод.

#### ВЛИЯНИЕ ОТКАЧЕК ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ОСЕДАНИЕ ТЕРРИТОРИЙ МЕГАПОЛИСОВ

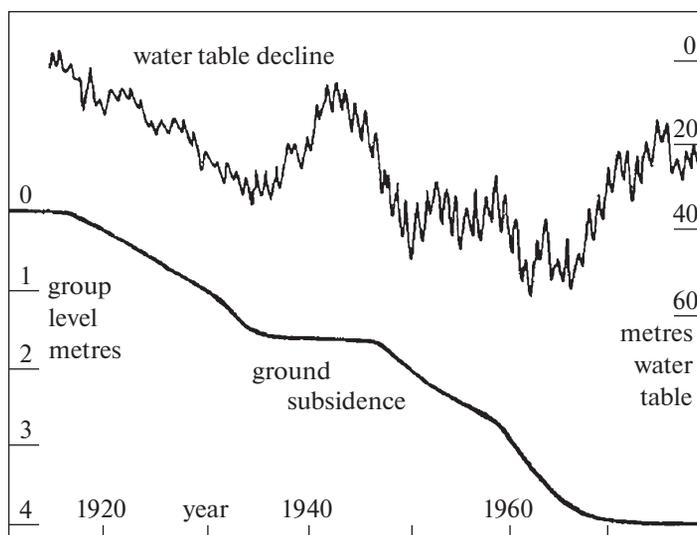
Ученые ряда стран, на территории которых зафиксированы значительные по размерам площади и глубине оседания городов, отмечают, что это

явление связано, главным образом, с мощными и длительными водозаборами подземных вод [18, 20, 22–24, 27 и др.]. На территории Китая в г. Сиань оседание поверхности на величину более 100 мм за период с 1950 по 2005 г. затронуло около 150 км<sup>2</sup>, при этом максимальные значения оседания достигали 2800 мм, в г. Шанхае оседание поверхности на величину более 200 мм за период с 1921 по 2005 г. затронуло около 10000 км<sup>2</sup>, а максимальные значения оседания достигали 2900 мм [26]. На территории г. Ханой площадью около 3325 км<sup>2</sup>, в результате активного водопотребления на нужды города (более 1 млн м<sup>3</sup>/сут), образовались многочисленные депрессионные воронки и произошли оседания поверхности: на станции, Тханьконг оседание поверхности составило 323 мм (1996–2004 гг.), Фапван – 189.14 мм (1996–2005 гг.), Хайдинь – 131.83 мм (1997–2004 гг.) (рис. 1) [18]. В долине Санта-Клара (Калифорния) снижение уровня подземных вод хорошо коррелировало с проседанием массива грунта (рис. 2) [25]. Таким образом, отмечается близость зависимостей водоотбора и оседания земной поверхности в разных странах и регионах. Оседание поверхности территории особенно опасно для прибрежных городов в связи с “наступлением” акватории на сушу.

На территории России в результате активного водоотбора сформировались региональные области депрессии подземных вод, максимальные понижения уровней подземных вод в которых превышают 50 м (по состоянию на 2019 г.) (табл. 1),



**Рис. 1.** Оседание земной поверхности в связи с добычей подземных вод на станции Хайдинь (Ханой, Вьетнам) [18]. В условных обозначениях: МКЭ – метод конечных элементов, ММКА – метод многофакторного корреляционного анализа.



**Рис. 2.** Характер снижения уровня подземных (water table decline) (м, по вертикальной оси справа) и оседания поверхности массива грунта (ground subsidence) (м, по вертикальной оси слева) в долине Санта-Клара (Калифорния) во времени (year) [25].

что безусловно отражается на всех компонентах геологической среды и развивающихся в ее границах геодинамических процессах.

### ДОЛГОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОДТОПЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ МЕГАПОЛИСОВ

Непрерывно развивающиеся и нарастающие техногенные изменения режима подземных вод, как и геологической среды в целом [10], обуславливают необходимость составления долгосрочных прогнозов для оценки их опасности, риска негативного проявления и принятия своевременных управляющих решений.

В полной мере это относится и к долгосрочному прогнозированию подтопления застроенных

территорий, которому, несмотря на изученность данного процесса [6–8, 17], пока не уделяется должного внимания. В этом направлении в начале 2000-х гг. на кафедре инженерной геологии и геоэкологии Московского государственного строительного университета (МГСУ) для студентов ряда факультетов читался специальный курс “Инженерная защита от затопления и подтопления территорий”, проводились теоретические и аналитические исследования [9], в том числе в рамках научно-исследовательских работ студентов. Для долгосрочного прогнозирования подтопления территории Москвы в качестве исходных базовых данных были приняты материалы, приведенные в статье В.И. Осипова [17] и монографии “Москва: геология и город” [16], и разработана следующая методическая последовательность решения поставленной задачи:

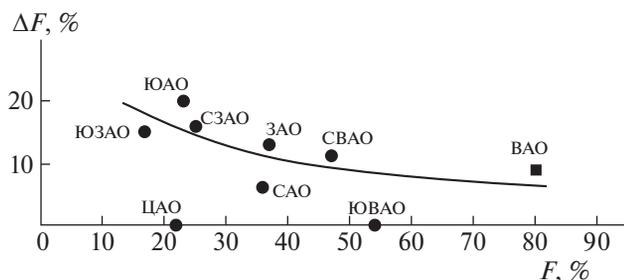
1. Установление распределения площадей административных районов города по степени фактической пораженности подтоплением на известный период времени (в данном случае 1992 г.);

2. Выявление закономерности приращения площади подтопления территорий за последующий период (на 2010 г. по данным прогноза, приведенного в [17]) в зависимости от ее пораженности этим процессом в 1992 г. Было установлено, что с увеличением исходной площади ( $F$ ) территории, пораженной подтоплением, величина дальнейшего приращения подтопления ( $\Delta F$ ) снижается (рис. 3).

3. Составление типовых моделей геологической среды г. Москвы по степени подверженности подтоплению на основе анализа разработанной Г.А. Голодковской типизации геологической

**Таблица 1.** Понижение уровня некоторых областей депрессии территории России (по данным Мониторинга подземных вод на территории РФ. Интерактивная карта по состоянию на 19.08.21 г. Электронный ресурс: <http://geomonitoring.ru:13158/>)

Наименование области депрессии подземных вод	Максимальное понижение уровня подземных вод, м
Курская	99.7
Московская	90.0
Кропоткинско-Краснодарская	88.9
Брянская	75.7
Ленинградская	66.2
Тульская	52.5



**Рис. 3.** Зависимость прогноза [17] приращения площади подтопления территории административных округов г. Москвы (аббревиатура на графике) в 2010 г. от зафиксированной в 1992 г. (по [3]).

среды города с выделением в его старых границах 12-ти инженерно-геологических районов [5, 16]. Было составлено 5 типов моделей геологической среды города, существенно различающихся по условиям потенциального подтопления (рис. 4). При этом не рассматривалась возможность подтопления за счет межпластовых вод в случаях увеличения их напоров и прорыва в строительные котлованы и подземные выработки глубокого заложения;

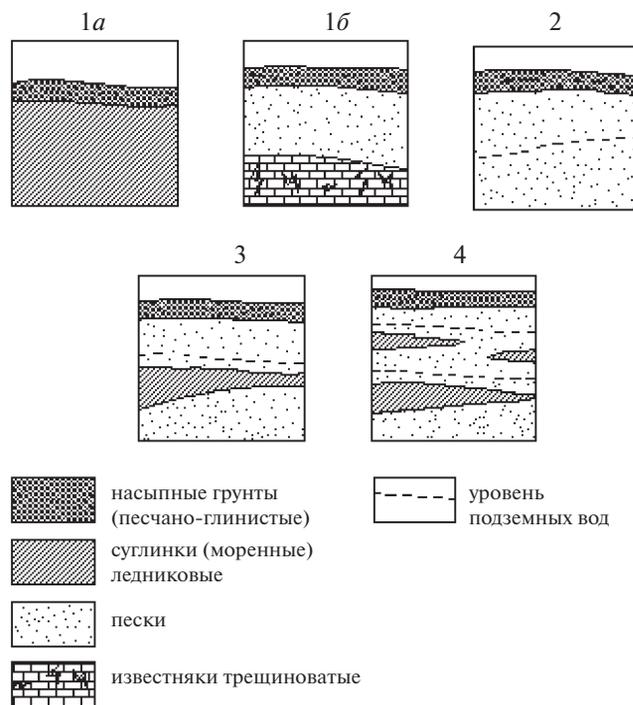
4. Расчет соотношения площадей инженерно-геологических районов Москвы, входящих в границы административных округов города, в том числе с учетом составленных типовых моделей геологической среды с разной степенью подверженности подтоплению;

5. Прогнозирование подтопления территорий административных округов города на отдаленный период (2025 г.) с учетом выявленных закономерностей в динамике этого процесса и различной степени подверженности этому процессу геологической среды, занимаемой административными округами;

6. Установление категории опасности территорий административных округов г. Москва по степени пораженности их площади (F) подтоплением с учетом положений действовавшего в то время СНиП 22-01-95, разработанного под руководством А.Л. Рагозина в 1994–1995 гг., который позднее был актуализирован<sup>1</sup>. При этом в дополнение к категориям опасности подтопления, установленным А.Л. Рагозиным (умеренно опасные – F менее 50%, опасные – 50–75% и весьма опасные – более 75%), были выделены потенциально опасные (F от 40% до 50%) и потенциально весьма опасные территории (F от 60% до 75%);

7. Оценка, с учетом выполненных прогнозов, динамики развития техногенного подтопления за период 1992–2025 гг.

<sup>1</sup> СП 115.13330.2016 Свод правил. Геофизика опасных природных воздействий. Актуализированная редакция СНиП 22-01-95. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054202>



**Рис. 4.** Типовые модели геологической среды Москвы по подверженности подтоплению [10]: 1 – не подтапливаемая в связи со значительной мощностью глинистых грунтов в верхней части разреза (1а) или в связи с хорошей дренированностью верхних слоев песчаных грунтов (1б); 2 – с низким потенциалом подтопления в связи с весьма глубоким залеганием грунтовых вод, подтопление возможно только на участках залегания тонкозернистых песков; 3 – со средним потенциалом подтопления в связи с достаточно большой глубиной залегания грунтовых вод; 4 – с высоким потенциалом подтопления в связи с неглубоким залеганием уровня грунтовых вод.

Все многочисленные аналитические расчеты и графические построения выполнены Р.Т. Бутаевым в 2004 г., итоговые результаты исследований были доложены им в 2005 г. на конференции по итогам НИРС студентов МГСУ. Они были также отражены в докладе на конференции МГУ 2007 г. [10] и частично опубликованы в 2008 г. в сборнике трудов МГСУ “Денисовские чтения” [3].

Общее представление о фактическом (1992 г.) и прогнозируемом подтоплении территории Москвы в 2005, 2010 и на 2025 годы дают табл. 2 и рис. 5.

Проведенные аналитические исследования показали, что подтопление территорий г. Москвы носит прогрессирующий характер. По данным прогноза (табл. 2), видно непрерывное повышение со временем размера площади поражения подтоплением практически во всех административных округах города. По всей территории города подтопленные площади увеличились в 1.1–2.4 раза

**Таблица 2.** Сводные данные по зафиксированному на 1992 г. и прогнозируемому на последующие годы подтоплению территорий административных округов г. Москвы [3, 17]

Административный округ	Площадь подтопления, %			
	1992 г.	2005 г.	2010 г.	2025 г.
ЦАО	22	22	22	25
ЮЗАО	17	28	32	40
СЗАО	25	36	41	45
САО	36	40	42	45
ЮАО	23	37	43	50
ЗАО	37	46	50	55
ЮВАО	54	54	54	60
СВАО	47	55	58	65
ВАО	80	86	89	92

(с 17–80% в 1992 г. до ожидаемых 25–92% к 2025 г.).

Вместе с тем, что не менее важно, одновременно возрастает категория опасности подтопления. Так, по сравнению с 1992 г., к 2025 г. ожидается увеличение числа административных округов Москвы, относимых по подтоплению к категории “опасное” с одного (ЮВАО) до четырех (СВАО, ЮВАО, ЗАО и ЮАО, при этом ЮВАО и СВАО оцениваются как “потенциально весьма опасные”), при сохранении категории “весьма опасное” у ВАО и условного отнесения к категории “потенциально опасное” САО.

Следует заметить, что на рубеже XX и XXI вв. трудно было предположить те высочайшие темпы строительства и реконструкции на территории Москвы, включая огромные объемы возведения подземных сооружений значительного заглубления, которые были реализованы в последние десятилетия и могли заметно сказаться на характере подтопления городских территорий. Поэтому указанный прогноз безусловно нуждается в проверке и уточнении на базе анализа накопившихся фондовых материалов. Вместе с тем есть основания утверждать, что реализованная методика долгосрочного прогнозирования динамики техногенного подтопления мегаполиса является обоснованной и может использоваться при составлении дальнейших прогнозов.

#### ИЗМЕНЕНИЕ ГРАДИЕНТА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПОД ВЛИЯНИЕМ ТЕХНОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ИХ РЕЖИМА

Необходимо подробнее остановиться на таком важном аспекте техногенных изменений режима подземных вод, как изменение градиента верти-

кальной фильтрации ( $i_v$ ) – параметр, который часто недооценивается, и в оценке значимости которого не существует единого мнения. Это во многом объясняется тем, что ранее не обращали внимание на вероятность существенного возрастания его величины под влиянием техногенных факторов. Именно по этой причине градиент вертикальной фильтрации имеет существенное значение для территорий, подверженных карсту и карстово-суффозионным процессам, так как при достижении критических значений  $i_v$  может произойти разрыв слоя верхнего водоупора межпластовых напорных вод (в том числе регионально-го) с последующим развитием карстово-суффозионного процесса.

Для таких территорий опасные возрастания величины градиента вертикальной фильтрации могут быть вызваны повышением уровня грунтовых вод при подтоплении застроенной территории и снижением пьезометрического уровня межпластовых напорных вод (водовмещающими породами которых являются закарстованные известняки, доломиты и мел) в связи с мощными водозаборами для технического и питьевого водоснабжения. Часто наблюдается сочетанное изменение уровней этих водоносных горизонтов. В ряде случаев сказываются и длительные откачки подземных вод при строительстве и эксплуатации подземных сооружений, в первую очередь метрополитена.

Как известно, вычисление значения градиента вертикальной фильтрации выполняется по формуле  $i_v = \Delta H/m$ , где:  $\Delta H$  – величина напора – расстояние между уровнем грунтовых вод (УГВ) и пьезометрическим уровнем установления напорных вод (ПУНВ), а  $m$  – мощность водоупорного слоя глин.

Считается, что при  $i_v > 3$  развивается карстово-суффозионный процесс, так как при таких его значениях возможен разрыв водоупорного слоя глин, во всяком случае существует высокая вероятность развития данного процесса [1, 2, 12, 15, 19].

Рассмотрим ряд возможных и характерных ситуаций, представленных на рис. 6. На схеме рис. 6а показаны исходные природные условия, в которых на территории карстово-суффозионные процессы не развиваются в связи с низким значением градиента вертикальной фильтрации (в данном примере  $i_v = 1$ ).

При техногенном подтоплении рассматриваемой территории (см. рис. 6б) величина градиента вертикальной фильтрации возрастает, но в условиях неизменного пьезометрического уровня остается недостаточной для развития карстово-суффозионного процесса (в данном примере  $i_v = 2$ ). Соответственно, территория считается не опасной в карстово-суффозионном отношении, как и в первом случае.

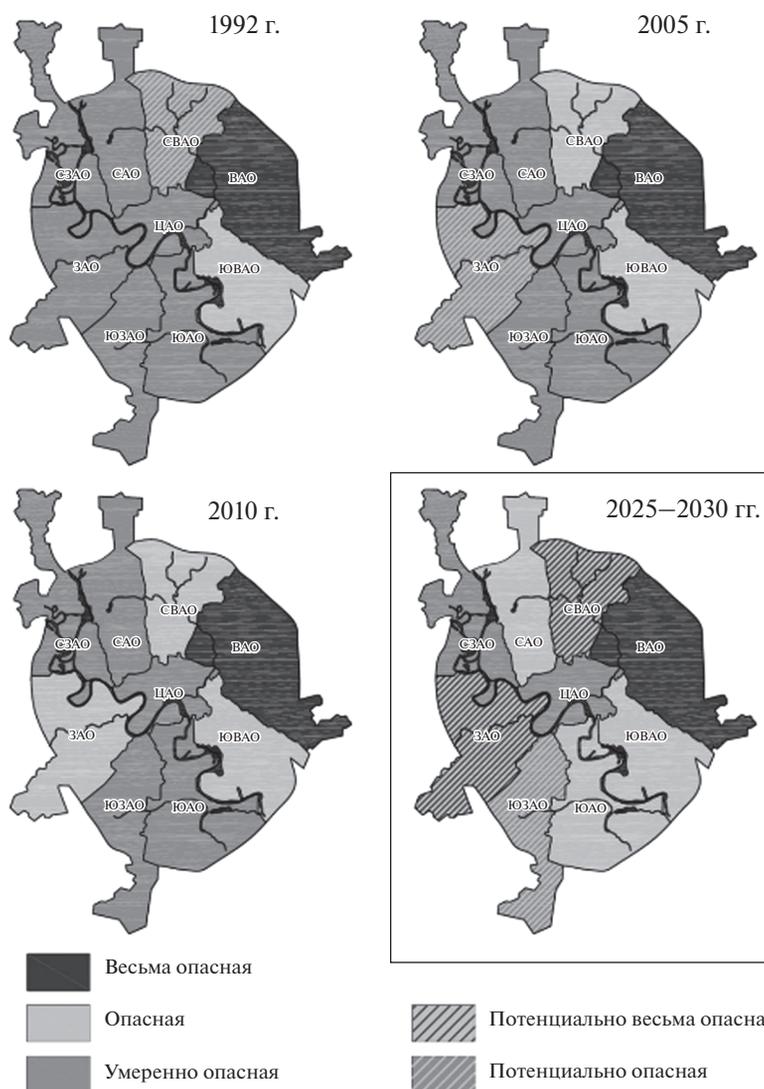


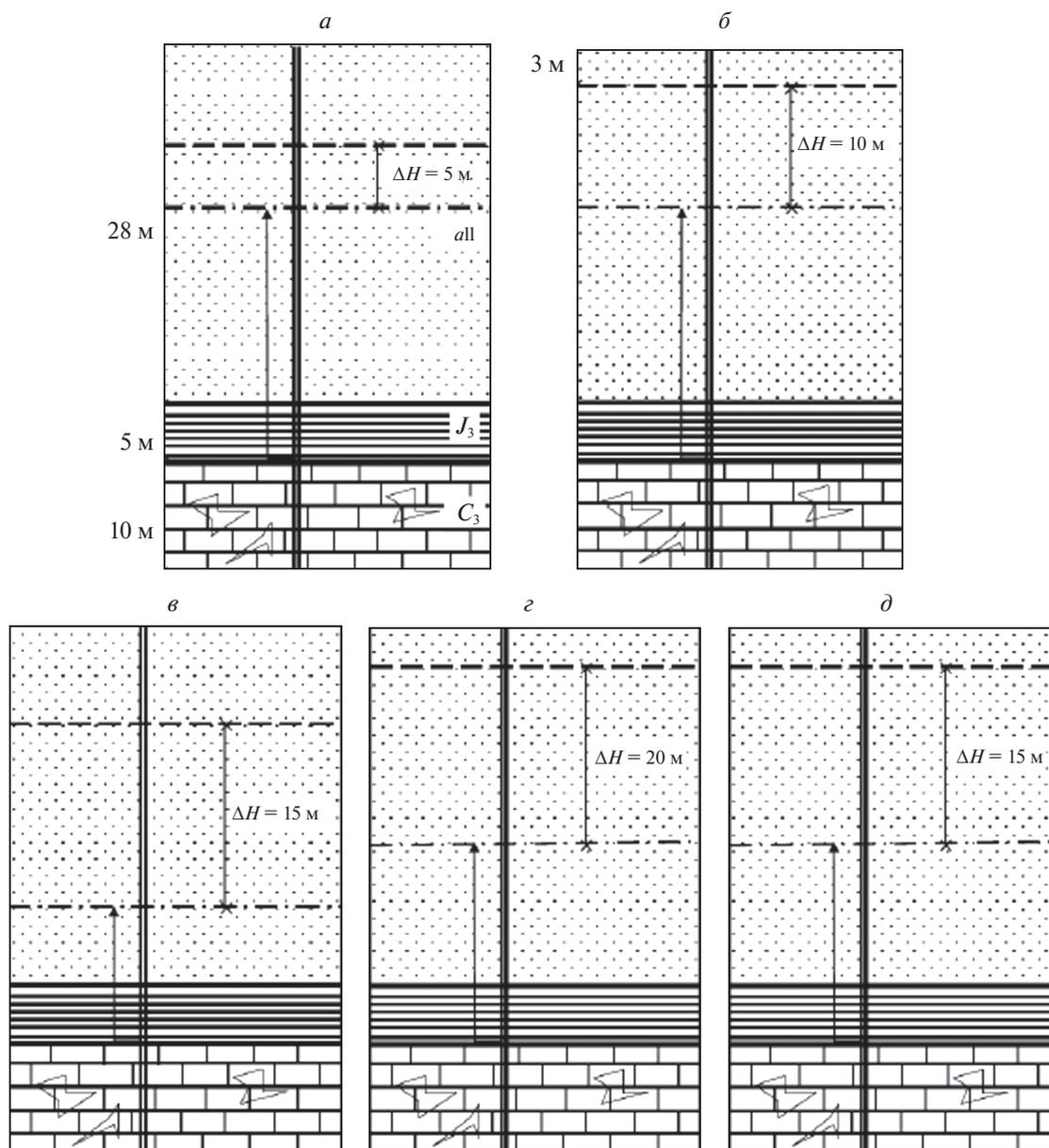
Рис. 5. Прогноз динамики изменения категории опасности подтопления территорий административных округов Москвы в период с 1992 по 2025 гг. [3].

При техногенной сработке (срезке) ПУНВ, происходящей под влиянием значительной откачки напорных вод для технического и/или питьевого водоснабжения (см. рис. 6а), градиент вертикальной фильтрации может существенно возрасти даже в отсутствии подтопления территории (в данном примере  $i_v = 3$ , т.е. до критической величины).

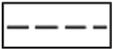
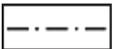
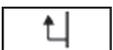
В этом случае территория переходит в категорию потенциально опасной в карстово-суффозионном отношении, и могут потребоваться превентивные мероприятия, исключающие возможность возникновения этого опасного процесса. Например, ограничение скорости сработки ПУНВ до допустимого предела. Подобная рекомендация целесообразна в аналогичных и некоторых иных случаях. Необходимость такого меро-

приятия была обоснована, например, в научно-техническом отчете МГСУ по результатам натурных и лабораторных исследований для проектировавшейся Ново-Воронежской АЭС. Исследования проводились МГСУ по договору с АЭП группой ученых и специалистов, в том числе А.В. Аникеевым, Н.Г. Анисимовой В.А. Болтуновым, И.В. Дудлером (научн. руков. и отв. исп.), И.А. Кожевниковой, А.В. Кольцовой, В.М. Кутеповым, В.П. Хоменко.

На рис. 6б показана ситуация техногенного изменения режима подземных вод с сочетанным проявлением на застроенной территории процессов подтопления и сработки/срезки ПУНВ. В данном примере  $i_v = 4$ , т.е. величина градиента вертикальной фильтрации превышает критическое значение, и поэтому развитие карстово-суфф-



Условные обозначения

	Песок		Уровень грунтовых вод
	Глина		Пьезометрический уровень напорных вод
	Известняк закарстованный		Величина напора вод каменноугольного водоносного горизонта

**Рис. 6.** Динамика изменения величины градиента вертикальной фильтрации при техногенном изменении режима подземных вод (на примере территории распространения карста): *a* – в природном состоянии, до развития подтопления и сработки ПУНВ каменноугольного водоносного горизонта ( $i_v = 1$ ); *б* – при развитии техногенного подтопления территории ( $i_v = 2$ ); *в* – в отсутствии подтопления территории при срезке ПУНВ ( $i_v = 3$ ); *г* – при одновременном подтоплении территории и срезке ПУНВ ( $i_v = 4$ ); *д* – при частичном восстановлении ПУНВ на подтопленной территории ( $i_v = 3$ ).

фозионного процесса становится возможным, весьма вероятным. В связи с этим эту территорию следует относить к безусловно опасным в карсто-

во-суффозионном отношении, и требуется расчет риска проявления данного процесса и разработка мероприятий по его предотвращению.

На некоторых подтопленных территориях может происходить частичное восстановление ПУНВ, (например, при временном прекращении откачек или ликвидации промышленных объектов с водоснабжением на базе подземных напорных вод). В таких условиях величина градиента вертикальной фильтрации также частично снижается (в примере на рис. 6 до  $i_v = 3$ ), однако надо учитывать, что еще до этого снижения могли произойти частичные деформации водоупорного слоя глин, и даже начаться суффозия песков в карстовые полости. Кроме того, водоупорный слой глин мог быть нарушен многочисленными глубокими инженерно-геологическими скважинами, при ликвидации которых их кольматаж был выполнен не качественно или не осуществлялся. В таком случае сохраняется опасность развития карстово-суффозионных процессов, поэтому необходимы специальные исследования, мониторинг и, возможно, реализация системы мероприятий инженерной защиты строительных объектов и застроенной (реконструируемой) территории.

В связи с указанной значимостью данных о величинах  $i_v$ , их изменении со временем и распределении в границах изучаемой территории, представляется необходимым при проведении инженерных изысканий предусматривать включение в комплект гидрогеологических карт и карту градиентов вертикальной фильтрации, что особенно актуально для территорий распространения пород, подверженных карсту и карстово-суффозионным процессам. Как подчеркивали В.М. Кутепов и В.Н. Кожевникова, в этих условиях сопоставление карты градиентов вертикальной фильтрации с геологическими картами “*позволяет провести инженерно-геологическое районирование территории по интенсивности развития рассматриваемых процессов на данный момент и построить прогнозные карты на любой момент времени, если известны закономерности изменения уровней грунтовых и карстовых вод во времени*” [14, с. 82]. Очевидно также, что в отчетной документации должны указываться не только сведения о периоде времени замеров уровней подземных вод, использованных при составлении карты градиентов вертикальной фильтрации, и дате выпуска карты, но и рекомендуемый срок пользования ею без дополнительной корректировки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенные выше соображения и приведенные данные свидетельствуют о необходимости системного подхода к изучению и учету техногенных изменений режима подземных вод на застроенных территориях, прежде всего мегаполисов, где негативные последствия геоэкологического, инженерно-геологического и гидрогеологиче-

ского характера могут проявляться наиболее интенсивно. В частности, необходимы введение понятия о категориях опасности техногенного изменения режима подземных вод и разработки критериев для установления этих категорий, организация гидрогеологического мониторинга на застроенных территориях, разработка методики и составление долгосрочных гидрогеологических прогнозов, включение карты градиента вертикальной фильтрации в состав комплекта гидрогеологических карт, составление на основе математического, аналогового и физического моделирования динамических гидрогеологических моделей территории города и его административных округов, а также особо опасных и технически сложных объектов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аникеев А.В.* Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. М.: РУДН, 2017. 325 с.
2. *Аникеев А.В.* Провалы и оседания земной поверхности в карстовых районах: моделирование и прогноз: автореф. дис. ... докт. геол.-мин.н. М.: ИГЭ РАН, 2014. 47 с.
3. *Бутаев Р.Т.* К вопросу о долгосрочном прогнозировании техногенного подтопления мегаполисов // В сб. IV Денисовские чтения. “Проблемы обеспечения экологической безопасности строительства”. М.: МГСУ, 2008. С. 138–140.
4. *Голодковская Г.А., Демидюк Л.М.* Некоторые методологические вопросы оценки техногенных изменений геологической среды // Комплексные оценка и прогноз техногенных изменений геологической среды: [Материалы семинара, дек. 1983 г.] / Отв. ред. В.Т. Трофимов. М.: Наука, 1985. С. 11–17.
5. *Голодковская Г.А., Лебедева Н.И.* Инженерно-геологическое районирование территории Москвы // Инженерная геология. 1984. № 3. С. 87–102.
6. *Горловский Б.Л., Шехтман Л.М.* Техногенное подтопление площадок АЭС и ТЭС // Энергетика и электрофикация: обзорная информация. Вып. 3. Серия 3. Атомные электростанции. М.: Информ-энерго, 1986. 58 с.
7. *Дзекцер Е.С.* Концепция защиты исторического города от подтопления (на примере г. Ростова Велик.). М.: ГУП ЦПП, 1999. 52 с.
8. *Дзекцер Е.С., Пырченко В.А.* Технология обеспечения устойчивого развития урбанизированных территорий в условиях воздействия природных опасностей. М.: ЗАО “ДАР/ВОДГЕО”, 2004. 166 с.
9. *Дудлер И.В.* Классификация застраиваемых и застроенных территорий по подтоплению // I Денисовские чтения. М.: МГСУ, 2000. С. 42–49.
10. *Дудлер И.В., Воронцов Е.А., Бутаев Р.Т.* Литотехнический мониторинг на городских территориях: концепция, методика, принципы, направления использования // Мониторинг геологических, литотехнических и эколого-геологических систем:

- тр. междунар. научн. конф. / Под ред. В.Т. Трофимова, В.А. Королева. М.: МГУ, 2007. С. 47–48.
11. Дудлер И.В., Фуникова В.В. Геологическая среда в современную эпоху: приоритеты изучения и оценки с позиций инженерной и экологической геологии // Новые идеи и теоретические аспекты инженерной геологии: тр. междунар. научн. конф. / Под ред. В.Т. Трофимова и В.А. Королева, М.: ООО “Сам Полиграфист”, 2021. С. 108–113.
  12. Козлякова И.В., Кутепов В.М., Анисимова Н.Г., Кожевникова И.А. Оценка карстово-суффозионной опасности в Москве для управления карстовым риском в масштабах города // Управление рисками чрезвычайных ситуаций: сб. трудов конф. (доклады и выступления). 2001. С. 205–207.
  13. Комплексная оценка и прогноз техногенных изменений геологической среды: [Материалы семинара, дек. 1983 г.] / Отв. ред. В. Т. Трофимов. М.: Наука, 1985. 103 с.
  14. Кутепов В.М., Кожевникова В.Н. Комплексная оценка устойчивости массивов пород в карстовых районах при техногенном воздействии / Комплексная оценка и прогноз техногенных изменений геологической среды: [Материалы семинара, дек. 1983 г.] / Отв. ред. В. Т. Трофимов. М.: Наука, 1985. С. 79–85.
  15. Кутепов В.М., Козлякова И.В., Анисимова Н.Г., Еремина О.Н., Кожевникова И.А. Оценка карстовой и карстово-суффозионной опасности в проекте крупномасштабного геологического картирования г. Москвы // Геоэкология. 2011. № 3. С. 215–226.
  16. Москва: геология и город / Под ред. В.И. Осипова и О.П. Медведева М.: Московские учебники и картография, 1997. 400 с.
  17. Осипов В.И. Зоны геологического риска на территории г. Москвы // Вестник РАН. 1994. Т. 64. № 1. С. 32–45.
  18. Фи Х.Т., Строчкова Л.А. Карты прогноза оседания земной поверхности в результате извлечения подземных вод в городе Ханое (Вьетнам) // Геоэкология. 2016. № 6. С. 543–556.
  19. Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов: автореф. дис. ... докт. геол.-мин. н.: М., 2004. 38 с.
  20. Cabral-Cano E., Dixon T.H., Miralles-Wilhelm F., Diaz-Molina O., et al. Space geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City // Geological Society of America Bulletin. 2008. V. 120 (11). P. 1556–1666.
  21. Doudler I.V., Vorontsov E.A., Liarski S.P. Engineering geology priorities in XXI century / Global View of Engineering Geology and the Environment. Proc. Of the Intern. Simp. and 9<sup>th</sup> Asian Reg. Conf. of IAEG. 2013. P. 575–580.
  22. Phien-wej N., Giao P.H., Nutalaya P. Land subsidence in Bangkok, Thailand // Engineering Geology. 2006. V. 82. Is. 4. P. 187–201.
  23. Pirouzi A., Eslami A. Ground subsidence in plains around Tehran: site survey, records compilation and analysis // Int. Journal of Geo-Engineering. 2017. V. 8 (1). P. 1–21.
  24. Sato C., Haga M., Nishino J. Land subsidence and groundwater management in Tokyo // Int. Review for Environmental Strategies. 2006. V. 6. № 2. P. 403–424.
  25. Waltham T. Sinking cities – Feature // Geology Today. 2002. V. 18 (3). P. 95–100. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2451.2002.00341.x>
  26. Xu Y., Shen S.-L., Cai Z.-Y., Zhou G.-Y. The state of land subsidence and prediction approaches due to groundwater withdrawal in China // Natural Hazards. 2008. V. 45 (1). P. 123–135. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9168-4>
  27. Zhu L., Gong H., Li X., Wang R., Chen B., Dai Z., Teatini P. Land subsidence due to groundwater withdrawal in the northern Beijing plain, China // Engineering Geology. 2015. V. 193. P. 243–255. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.04.020>

## TECHNOGENIC CHANGES IN THE GROUND WATER REGIME IN THE BUILT-UP AREAS (GEOECOLOGICAL, ENGINEERING GEOLOGICAL AND HYDROGEOLOGICAL ASPECTS)

V. V. Funikova<sup>a,#</sup>, I. V. Dudler<sup>b,##</sup>, and R. T. Butaev<sup>c,###</sup>

<sup>a</sup> Geological Faculty, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, Moscow, 119234 Russia

<sup>b</sup> Scientific Council RAS on the problems in environmental geoscience, engineering geology and hydrogeology, Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia

<sup>c</sup> Alterkasa LLC, Moscow, 1st Truzhnikov per., 17 A, 119121 Russia

<sup>#</sup>E-mail: funikova@geol.msu.ru

<sup>##</sup>E-mail: div-33@yandex.ru

<sup>###</sup>E-mail: butaev.r.t@gmail.com

The groundwater regime changes permanently under technogenic impact in the built-up areas, with groundwater being the most dynamic component of the geological environment. Attention is drawn to the complex changes in groundwater regime, resulting in a number of undesired geoecological, engineering geological and hydrogeological consequences, which control the difficulty of engineering geological conditions for construction. We assume certain cycles in technogenic changes in the groundwater regime and the geological en-

vironment as a whole, complying with the technological progress and the urban development level. The article covers briefly the surface subsidence in megacities typical for the XX and early XXI centuries caused by intense and long-term water intake for drinking and technical water supply. The importance of long-term predicting technogenic changes in the groundwater regime is emphasized, in particular, long-term flooding forecasts in Moscow. The special importance of monitoring and control over the vertical filtration gradient in built-up areas with a potential karst-suffusion hazard is shown. It is proposed to include a map of vertical filtration gradients in the set of hydrogeological maps for engineering survey. In conclusion, the need for a systematic approach to the study and consideration of technogenic changes in the groundwater regime is noted, including the arrangement of hydrogeological monitoring; inclusion of the vertical filtration gradient map in the set of hydrogeological maps; compilation of hydrogeological models of the city and its municipal districts, as well as especially hazardous and technologically complex engineering structures (based on mathematical, analogue and physical modeling); and long-term forecasting.

**Keywords:** *groundwater, technogenic changes in the groundwater regime, geocological, engineering geological and hydrogeological aspects*

## REFERENCES

- Anikeev, A.V. *Provaly i voronki osedaniya v karstovykh rayonakh: mekhanizmy obrazovaniya, prognoz i otsenka riska* [Collapses and subsidence sinkholes in karst areas: formation mechanisms, forecast and risk assessment]. Moscow, RUDN Publ., 2017, 325 p. (in Russian)
- Anikeev, A.V. *Provaly i osedaniya zemnoi poverkhnosti v karstovykh raionakh: modelirovanie i prognoz* [Collapses and subsidence of the day surface in karst areas: modeling and forecast]. Extended abstract Doct. (Geol.-Min. Sci.) dissertation, Moscow, IEG RAS, 2014, 47 p. (in Russian)
- Butaev, R.T. *K voprosu o dolgosrochnom prognozirovanii tekhnogennogo podtopleniya megapolisov* [About long-term forecasting of technogenic flooding in megacities]. IV *Denisovskie chteniya "Problemy obespecheniya ekologicheskoi bezopasnosti stroitel'stva"* [The 4th Conference in commemoration of N.Ya Denisov "Problems of ensuring environmental safety in construction"]. Moscow, MGSU Publ., 2008, pp. 138–140. (in Russian)
- Golodkovskaya, G.A., Demidyuk, L.M. *Nekotorye metodologicheskie voprosy otsenki tekhnogennykh izmenenii geologicheskoi sredy* [Some methodological issues in assessing human-induced changes in geological environment] // *Kompleksnye otsenka i prognoz tekhnogennykh izmenenii geologicheskoi sredy. Mater. Seminara, dek. 1983* [Combined assessment and prediction of human-induced changes in geological environment. Workshop Proc., Dec. 1983]. V.T. Trofimov, Ed.-in-chief, Moscow, Nauka Publ., 1985, p. 11–17.
- Golodkovskaya, G.A., Lebedeva, N.I. *Inzhenerno-geologicheskoe raionirovanie territorii Moskvy* [Engineering geological zoning of the Moscow territory]. *Inzhenernaya geologiya*, 1984, no. 3, pp. 87–102. (in Russian)
- Gorlovskii, B.L., Shekhtman, L.M. *Tekhnogennoe podtoplenie ploshchadok AES i TES* [Technogenic flooding of NPP and Thermal power plant sites]. *Energetika i elektrofikatsiya: obzornaya informatsiya* [Energy and electrification: overview]. Issue 3, series 3. Nuclear power plants. Moscow, Informenergo Publ., 1986. 58 p. (in Russian)
- Dzektser, E.S. *Kontseptsiya zashchity istoricheskogo goroda ot podtopleniya: (Na primere g. Rostova Velik.)* [The concept of protecting a historical town from flooding (by the example of Rostov the Great). Moscow, GUP CPP, 1999. 52 p. (in Russian)
- Dzektser, E.S., Pyrchenko, V.A. *Tekhnologiya obespecheniya ustoichivogo razvitiya urbanizirovannykh territorii v usloviyakh vozdeistviya prirodnykh opasnostei* [Technology for ensuring sustainable development of urbanized territories under the influence of natural hazards]. Moscow, ZAO DAR/VODGEO Publ., 2004, 166 p. (in Russian)
- Dudler, I.V. *Klassifikatsiya zastraivaemykh i zastroyemykh territorii po podtopleniyu* [Classification of built-up areas and areas under development according to flooding]. I *Denisovskie chteniya* [Proc. of the first conference in commemoration of N.Ya. Denisov]. Moscow, MGSU, 2000, pp. 42–49. (in Russian)
- Dudler, I.V., Vorontsov, E.A., Butaev, R.T. *Litotekhnicheskii monitoring na gorodskikh territoriyakh: kontseptsiya, metodika, printsipy, napravleniya ispol'zovaniya* [Lithotechnical monitoring in urban areas: the concept, methods, principles, and ways of application] *Monitoring geologicheskikh, litotekhnicheskikh i ekologo-geologicheskikh system: Tr. Mezhd. nauchnoi konf.* [Monitoring of geological, lithotechnical and ecological and geological systems. Proc. Int. Sci. Conf.]. V.T. Trofimov, V.A. Korolev, Eds., Moscow, MSU Publ., 2007, pp. 47–48. (in Russian)
- Dudler, I.V., Funikova, V.V. *Geologicheskaya sreda v sovremennuyu epokhu: priority izucheniya i otsenki s pozitsii inzhenernoi i ekologicheskoi geologii* [Geological environment in the modern era: priorities of study and evaluation from the standpoint of engineering and environmental geology]. Proc. Int. Sci. Conf. "New ideas and theoretical aspects of engineering geology". V.T. Trofimov, V.A. Korolev, Eds., Moscow, Sam Poligrafist Publ., 2021, pp. 108–113. (in Russian)
- Kozlyakova, I.V., Kutepov, V.M., Anisimova, N.G., Kozhevnikova, I.A. *Otsenka karstovo-suffuzionnoi opasnosti v Moskve dlya upravleniya karstovym riskom v masshtabakh goroda* [Assessment of karst-suffusion hazard in Moscow to manage karst risk on a city level]. *Upravlenie riskami chrezvychaynykh situatsii. Doklady i vystupleniya* [Emergency risk management. Proc. of the Conf. reports and speeches]. 2001, pp. 205–207. (in Russian)

13. *Kompleksnyye otsenka i prognoz tekhnogennykh izmenenii geologicheskoi sredy. Mater. Seminara, dek. 1983* [Combined assessment and prediction of human-induced changes in geological environment. Workshop Proc., Dec. 1983]. V. T. Trofimov, Ed.-in-chief, Moscow, Nauka Publ., 1985, 103 p.
14. Kutepov, V.M., Kozhevnikova, V.N. *Kompleksnaya otsenka ustoichivosti massivov porod v karstovykh raionakh pri tekhnogennom vozdeistvii* [Combined assessment of rock massif stability in karst-prone areas upon human impact]// *Kompleksnyye otsenka i prognoz tekhnogennykh izmenenii geologicheskoi sredy. Mater. Seminara, dek. 1983* [Combined assessment and prediction of human-induced changes in geological environment. Workshop Proc., Dec. 1983]. V.T. Trofimov, Ed.-in-chief, Moscow, Nauka Publ., 1985, p. 79–85.
15. Kutepov, V.M., Kozlyakova, I.V., Anisimova, N.G., Eremina, O.N., Kozhevnikova, I.A. *Otsenka karstovoi i karstovo-suffozionnoi opasnosti v proekte krupnomasshtabnogo geologicheskogo kartirovaniya g. Moskvy* [Assessment of karst and karst-suffusion hazards in the project of large-scale geological mapping of Moscow]. *Geoekologiya*, 2011, no. 3, pp. 215–226. (in Russian)
16. *Moskva. Geologiya i gorod* [Moscow. Geology and the city]. V.I. Osipov, O.P. Medvedev, Eds., Moscow, *Moskovskie uchebniki i Kartolitografiya*, 1997, 400 p. (in Russian)
17. Osipov, V.I. *Zony geologicheskogo riska na territorii g. Moskvy* [Geological risk zones in the territory of Moscow]. *Vestnik RAN*, 1994, vol. 64, no. 1, pp. 32–45. (in Russian)
18. Fi, Kh.T., Strokovaya, L.A. *Karty prognoza osedaniya zemnoi poverkhnosti v rezul'tate izvlecheniya podzemnykh vod v gorode Khanoe (V'etnam)* [Maps of subsidence forecast on the day surface as a result of groundwater extraction in Hanoi (Vietnam)]. *Geoekologiya*, 2016, no. 6, pp. 543–556. (in Russian)
19. Khomenko, V.P. *Zakonomernosti i prognoz suffuzionnykh protsessov* [Regularities and forecast of suffusion processes]. Extended abstract Doct. (Geol.-Min. Sci.) dissertation, Moscow, 2004, 38 p. (in Russian)
20. Cabral-Cano, E., Dixon, T. H., Miralles-Wilhelm, F., Diaz-Molina, et al. Space geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City. *Geological Society of America Bulletin*, 2008, vol. 120, no. 11, pp. 1556–1666.
21. Doudler, I.V., Vorontsov, E.A., Liarski, S.P. Engineering geology priorities in XXI century. In: *Global View of Engineering Geology and the Environment. Proc. of the Intern. Simp. and 9<sup>th</sup> Asian Reg. Conf. of IAEG*, 2013, pp. 575–580.
22. Phien-wej, N., Giao, P.H., Nutalaya, P. Land subsidence in Bangkok, Thailand. *Engineering Geology*, 2006, vol. 82, no. 4, pp. 187–201.
23. Pirouzi, A., Eslami, A. Ground subsidence in plains around Tehran: site survey, records compilation and analysis. *Int. Journal of Geo-Engineering*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 1–21.
24. Sato, C., Haga, M., Nishino, J. Land subsidence and groundwater management in Tokyo. *International Review for Environmental Strategies*, 2006, vol. 6, no. 2, pp. 403–424.
25. Waltham, T. Sinking cities – Feature. *Geology Today*, 2002, vol. 18, no. 3, pp. 95–100. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2451.2002.00341.x>
26. Xu, Y., Shen, S.-L., Cai, Z.-Y., Zhou, G.-Y. The state of land subsidence and prediction approaches due to groundwater withdrawal in China. *Natural Hazards*, 2008, vol. 45 (1), pp. 123–135.
27. Zhu, L., Gong, H., Li, X., Wang, R., Chen, B., Dai, Z., Teatini, P. Land subsidence due to groundwater withdrawal in the northern Beijing plain, China. *Engineering Geology*, 2015, vol. 193, pp. 243–255. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.04.020>

---

---

**ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ  
ПРОЦЕССЫ**

---

---

УДК 551.4.042 (470.57)

**ВИДЫ И СОВРЕМЕННАЯ АКТИВНОСТЬ РАЗВИТИЯ  
ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ЮЖНОМ УРАЛЕ  
И В ПРЕДУРАЛЬЕ**© 2022 г. А. И. Смирнов<sup>1,\*</sup><sup>1</sup> *Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН,  
Ул. Карла Маркса, д. 16/2, Уфа, 450077 Россия**\*E-mail: smail@mail.ru*

Поступила в редакцию 06.12.2021 г.

После доработки 15.12.2021 г.

Принята к публикации 13.01.2022 г.

Опасные геологические процессы – геологические процессы, отрицательно воздействующие и которые потенциально могут негативно воздействовать на объекты экономики, вызывать чрезвычайные ситуации и обстоятельства, неблагоприятно сказывающиеся на жизнедеятельности человека. Установлены наиболее распространенные и опасные по причиняемому ущербу виды геологических процессов региона: боковая эрозия рек, карст и оползневой процесс. Для каждого процесса произведена оценка современной активности их развития за период 2000–2020 гг. Скорость размыва берегов в целом по региону оценена как слабая (со скоростью размыва до 0.5 м/год) и средняя (0.5–1.0 м/год) при наибольшей активности в Предуралье и предгорьях Южного Урала. Высокие скорости размыва берегов (1.1–3.0 м/год) зафиксированы в 2012–2014 и 2017 гг., отличавшиеся в ряду наблюдений повышенной многоводностью. Современная активность развития карста и оползневого процесса оценена по частоте образования новых крупных карстовых провалов и значительных новых оползневых смещений. Средняя активность провалообразования в целом по региону в 2000–2020 гг. составила 1.7 провала в год и связана с карстом в гипсах кунгурского яруса нижнего отдела пермской системы. Наибольшая частота образования провалов зафиксирована в 2016 г. в Предуралье на территории городских агломераций, где к природным факторам развития карста добавляются антропогенные, главным образом, утечки из водонесущих коммуникаций. Активность развития оползневого процесса в целом по региону слабая и чаще всего, наряду с метеофакторами, обусловлена техногенезом – искусственной подрезкой склонов.

**Ключевые слова:** боковая эрозия рек, карст, оползневой процесс, активность развития, Южный Урал, Предуралье, Республика Башкортостан

**DOI:** 10.31857/S0869780922020084**ВВЕДЕНИЕ**

Южный Урал и Предуралье охватывают территорию семи субъектов Российской Федерации (РФ). Основная часть рассматриваемого региона целиком занимает территорию Республики Башкортостан и лишь частично затрагивает сопредельные с ней субъекты РФ.

На Южном Урале и Предуралье, как и в других регионах, геологические процессы представлены процессами эндогенного и экзогенного генезиса.

Процессы эндогенного генезиса (ЭнГП), вызывавшие разрушение или деформацию зданий и сооружений, в последние 50 лет в рассматриваемом регионе не фиксировались. Согласно общему сейсмическому районированию территории РФ (СП 14.13330.2018) на Южном Урале и в его предгорьях 34 населенных пункта (0.7% от всех

пунктов Башкортостана) расположены в районах с расчетной сейсмической интенсивностью 6 баллов (по шкале MSK-64) и степенью сейсмической опасности 1–5% в течение 50 лет [19, с. 60]. Современные тектонические движения, влияющие на активность развития экзогенных геологических процессов, обуславливают общий, хотя и неравномерный подъем территории Республики Башкортостан (РБ). В Предуралье скорости подъема достигают 4.5–5.0 мм/год, в Предуральском прогибе – 2.8–4.8 мм/год и на Урале 5.5–6.5 мм/год [17].

Весьма разнообразны геолого-геоморфологические и гидрогеологические условия Южного Урала и Предуралья предопределили развитие генетически различных видов экзогенных геологических процессов (ЭкГП), характерных как для равнинных, так и для горных областей. Наиболее

распространены в регионе процессы, связанные с деятельностью: гравитационных сил (курумообразование, осыпной, обвальный и оползневой процессы), поверхностных вод (абразия, речная и овражная эрозия) и преимущественно подземных вод (карст, суффозия). Установлено, что наибольшее воздействие на населенные пункты республики оказывают речная боковая эрозия и карст, значительно в меньшей степени – оползневой процесс, а отрицательное воздействие других видов ЭКГП проявляется эпизодически и локально [24].

Каждый четвертый населенный пункт Башкортостана подвержен или может быть подвержен отрицательному (с прямым материальным ущербом) воздействию ЭКГП [25].

Согласно Своду Правил (СП 115.13330.2016) “Геофизика опасных природных воздействий” [20], указанные ЭКГП относятся к опасным геологическим процессам (ОГП), под которыми автор понимает геологические процессы, отрицательно воздействующие или, которые потенциально могут негативно воздействовать на объекты экономики, вызывать чрезвычайные ситуации и другие обстановки природной среды, неблагоприятно сказывающиеся на жизнедеятельности человека.

Актуальность исследований. Современная активность развития ОГП является важным показателем для принятия управленческих решений по предотвращению негативного их воздействия на объекты экономики и безопасности населения. Сводные данные о современной активности их развития по региону приводятся впервые.

Цель исследования – определение современной активности наиболее распространенных и опасных видов экзогенных геологических процессов Южного Урала и Предуралья.

Исходными данными для исследований послужили производственные геологические отчеты ПГО “Башкиргеология” по изучению ЭКГП и составлению (по методике ВСЕГИНГЕО [16]) карт пораженности территории РБ проявлениями ЭКГП и подверженности населенных пунктов республики их воздействию масштаба 1:200 000 (Смирнов, Ткачев, 1986 г., Смирнов, Нагуманов, Ткачев, 1989 г., Смирнов, 1994 г.). Они послужили основой для определения видов ОГП, характеру их распространения и активности развития.

Современная активность развития речной боковой эрозии оценена методом сравнения материалов дешифрирования аэрофотоснимков 1953–1955 гг. залета с современными (2018–2019 гг.) космоснимками на основе ГИС SAS.Planet (<http://www.sasgis.org/sasplaneta>). Результаты этого сравнения заверены данными ведения мониторинга состояния берегов водных объектов, который осуществлялся по госконтрактам Министер-

ства природопользования и экологии Республики Башкортостан (Минэкологии РБ) с ГУП “Башгеолцентр” (2009–2011 гг.), Научно-исследовательским институтом Безопасности жизнедеятельности Республики Башкортостан (2012–2018 гг., НИИ БЖД РБ) и ООО “Институт эколого-географических исследований” (2019–2020 гг., ООО ИЭГИ). Результаты ведения мониторинга состояния речных берегов отражены в ежегодных Государственных докладах о состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан Минэкологии РБ [2, с. 276–279; 3, с. 309; 4, с. 281–286; 5, с. 306–309; 6, с. 286–288; 7, с. 261–266; 8, с. 262–266; 9, с. 273–278; 10, с. 247–250; 11, с. 253–257; 12, с. 256–257].

Современная активность развития карста и оползневого процесса оценена по частоте образования карстовых провалов [22, 25, 26] и оползней в 2000–2020 гг. на основе их оперативного обследования автором совместно с О.В. Садыковой (Отделение мониторинга по РБ Филиала “Приволжский Региональный центр ГМСН”) и В.Г. Камаловым (ООО “Архстройизыскания”).

## БОКОВАЯ ЭРОЗИЯ РЕК

Вполне естественно, что в количественном отношении речная эрозия в сравнении с другими видами ЭКГП, оказывает наибольшее воздействие на хозяйственные объекты, поскольку подавляющая часть населенных пунктов расположена вдоль рек. В каждом седьмом населенном пункте республики (13.7% от всех населенных пунктов Башкортостана) имеются селитебные территории подверженные или, которые могут быть подвержены боковой эрозии рек, проявляющейся в подмыве и разрушении берегов. Основной ущерб от боковой эрозии рек заключается в сокращении площадей приусадебных участков. Однако, были зафиксированы случаи, когда из-за размыва речных берегов переносились на новое место жилые дома и части приречных улиц (д. Верхнеиткулово, Ишимбайский район РБ, правый берег р. Селеук).

Развитие речной боковой эрозии вынуждает ежегодно проводить строительство инженерных сооружений берегоукрепления и проведения русловыпрямительных работ на участках размыва берегов. Так, в 2019 г. они проведены на участках размыва берегов на р. Янаулка в г. Янаул; на р. Инзер у дд. Узунларово, Усть-Басу, Узунларово в Архангельском районе РБ [11]. В 2020 г. их строительство начато на р. Мал. Кизил в с. Баимово и д. Туишево; на р. Бол. Кизил в д. Исаково и с. Целинное в Абзелиловском районе; на р. Ай в дд. Гумерово, Новомещерово, Новояушево, Старомещерово, Тимиряково и Юнусово в Мечетлинском районе РБ. По данным Минэкологии РБ на строительство инженерных сооружений бере-

**Таблица 1.** Скорость размыва речных берегов Республики Башкортостан [по 23, 27, 31] (актуализирована на 01.01.2021)

Реки в пределах орографических районов	Диапазон скоростей размыва берегов, м/год
Прибельская равнина:	
р. Белая в меридиональном течении (от г. Мелеуз до устья р. Сим)	0.5–3.0 (аномально до 5.0)
р. Белая в субмеридиональном течении (от устья р. Сим до западной границы РБ)	0.2–2.0 (аномально до 3.0)
левые притоки р. Белая	0.3–3.0 (аномально до 5.0)
правые притоки р. Белая	< 1.0 (аномально до 1.5)
Бугульмино-Белебеевская возвышенность	< 1.0 (аномально до 2.0)
Общий Сырт	0.1–1.5 (аномально до 2.5)
Уфимское плато	<0.5 (аномально до 1.0)
Приайская равнина:	
р. Ай и ее левые притоки	0.6–3.0 (аномально до 5.0)
р. Ай и ее правые притоки	0.2–2.0 (аномально до 3.0)
р. Юрюзань и ее притоки	<1.0 (аномально до 1.0)
Белокатайское плато	<1.0 (аномально до 1.5)
Хребет Уралтау, низко- и среднегорья западного и восточного склона Урала	0.2–1.0 (аномально до 2.0)
Западные и восточные предгорья Урала	0.2–2.5 (аномально до 5.0)
Южно-Уральское плоскогорье	0.1–1.0 (аномально до 1.5)
Сакмаро-Таналыкская равнина	0.2–2.0 (аномально до 3.0)
Кизило-Уртазымская равнина	0.3–3.0 (аномально до 4.0)

гоукрепления и проведения русловыпрямительных работ ежегодно затрачивается десятки миллионов рублей. Так, в 2017–2019 гг. на берегоукрепительные мероприятия на р. Белой (главной водной артерии региона) только в г. Уфа по федеральной целевой программе “Развитие водохозяйственного комплекса РФ в 2012–2020 гг.” из всех источников финансирования затрачено 2.3 млрд руб. [9–11].

Общеизвестно, что наивысшая скорость размыва берегов характерна для берегов, сложенных рыхлыми нелитифицированными отложениями, наиболее податливыми разрушению в периоды прохождений по рекам максимальных руслоформирующих расходов (весеннее половодье и летние паводки) на крутых поворотах русел рек, а также на зауженных участках долин рек, где вся живая сила водного потока сосредотачивается в их днищах.

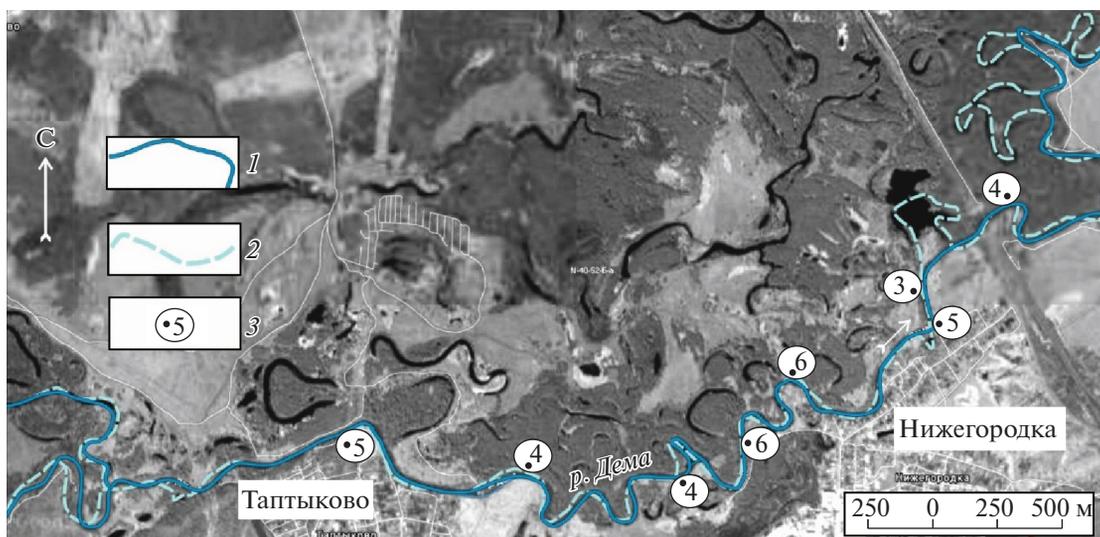
По данным полевого обследования населенных пунктов, подверженных воздействию боковой эрозии рек при изучении ЭкГП в 1983–1994 гг. (Смирнов, Ткачев, 1986 г., Смирнов, Нагуманов, Ткачев, 1989 г., Смирнов, 1994 г.), оценена скорость размыва речных берегов региона, которая актуализирована методом сравнения конфигурации русел рек на аэрофотоснимках 1953–1955 гг. залета с таковыми на современных космоснимках 2017–2019 гг. (табл. 1, рис. 1).

Активность развития речной боковой эрозии рек в последнее десятилетие оценена по данным ведения мониторинга состояния берегов рек на наблюдательных участках, на которых ежегодно определялась скорость размыва речных берегов по грунтовым реперам вышеуказанными организациями. На 01.01.2021 наблюдательная сеть за режимом размыва речных берегов на территории РБ состоит из 29 участков (рис. 2).

На начало ведения мониторинга берегов (2009 г.) наблюдательные участки были определены на основе карт подверженности населенных пунктов воздействию ЭкГП, на которых боковая эрозия рек непосредственно угрожала объектам экономики.

Следует отметить, что на отрезках рек, где размыв берегов происходил наиболее интенсивно, еще до начала ведения мониторинга берегов рек были проведены берегоукрепительные мероприятия, и они не были включены в наблюдательную сеть.

В процессе ведения мониторинга наблюдательная сеть подвергалась корректировке. Участки, где размыв речных берегов практически не наблюдался или на которых в период ведения мониторинга состояния берегов были созданы берегоукрепительные сооружения, закрывались, а вместо них открывались новые, где фиксировался активный размыв берегов рек. Вследствие это-



**Рис. 1.** Изменение конфигурации русла р. Дема. Контур русла реки: 1 – современный; 2 – на аэрофотоснимках 1953 г. залета; 3 – высота подмываемого берега, м.

го, количество наблюдательных участков от года к году колебалось от 26 до 36, но в целом структура наблюдательной сети оставалась неизменной.

На основе зафиксированных значений скоростей размыва речных берегов на наблюдательных участках они были ранжированы на 4 категории: низкая (скорость размыва менее 0.5 м/год), средняя (0.6–1.0 м/год), высокая (1.1–3.0 м/год) и очень высокая (более 3.0 м/год) [2–12].

Согласно СП 115.13330.2016 отрезки рек со скоростями размыва берегов более 3.0 м/год, 1.0–3.0 м/год и 0.1–1.0 м/год относятся к территориям соответственно: весьма опасным, опасным и умеренно опасным (см. сноску 2 [20]).

Низкие скорости размыва речных берегов практически не оказывают отрицательного воздействия на объекты экономики, а средние – для рассматриваемого региона являются обычными. Очень высокая скорость размыва речных берегов в 10-летнем ряду наблюдений зафиксирована в 2013 г. на р. Ай (4.0 м), где подмыву подвержены уступы I надпойменной террасы, сложенные песками и супесями. Высокая скорость размыва речных берегов наблюдалась в 2013 и 2014 гг., отличавшихся в ряду наблюдений наибольшей многоводностью [2–12]. Так, в 2013 г. она достигала на реках: Бол. Сурень – 2.4 м, Белая – 2.2 м, Сьунь – 1.6 м, Бол. Инзер – 1.2 м [5].

В последние 5 лет (2016–2020 гг.) скорость размыва речных берегов по всему рассматриваемому региону оценивается как низкая и обусловлена маловодностью этого периода в ряду наблюдений [8–12] (рис. 3).

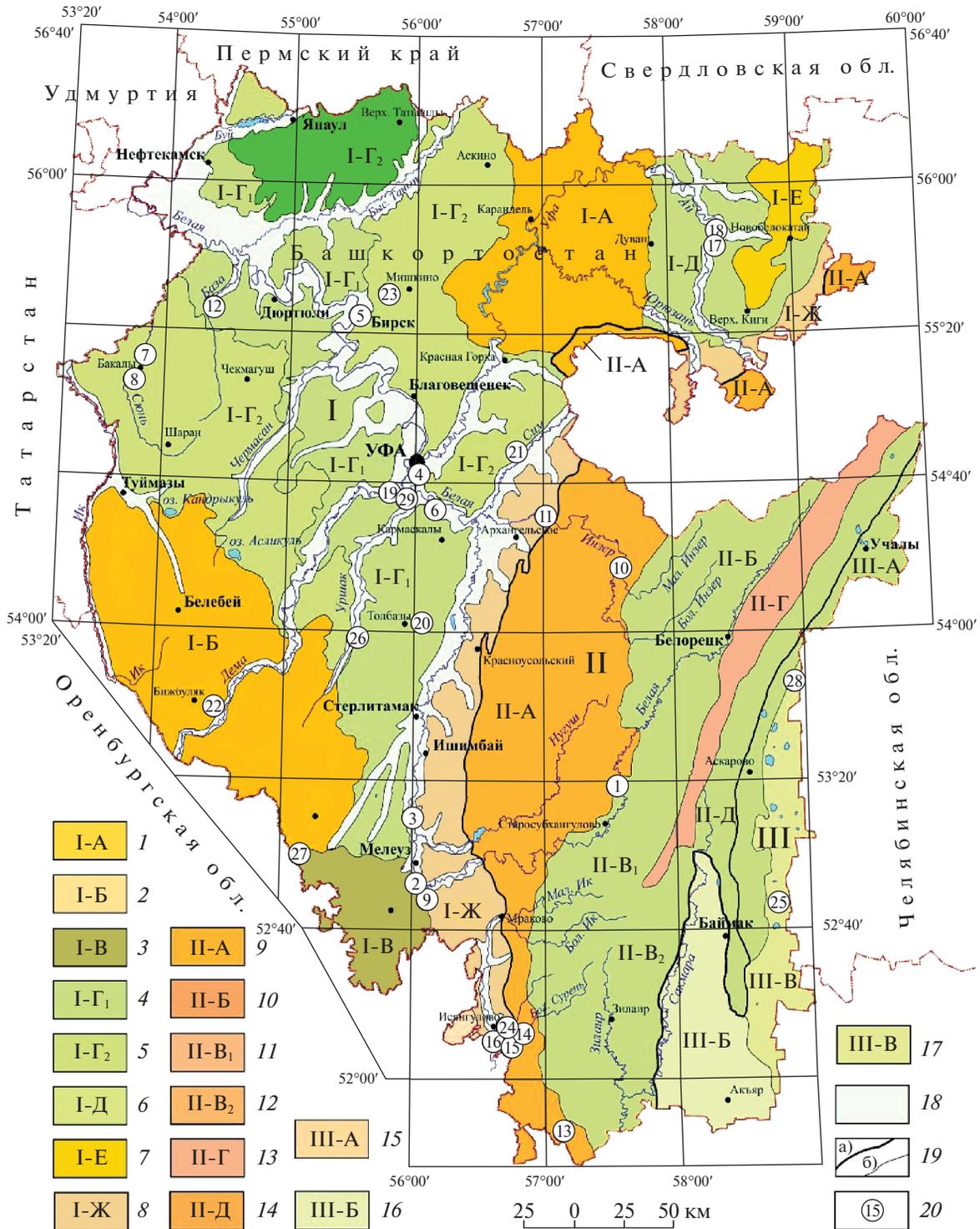
## КАРСТ

Карст – экзогенный геологический процесс, обусловленный растворяющей и эродирующей деятельностью природных и техногенных вод, циркулирующих в относительно легкорастворимых горных породах, в результате которой образуются подземные и поверхностные карстовые формы (карстопроявления). Типизация карста региона отражена на рис. 4.

В большинстве случаев, за исключением развития карста в условиях открытого (голового или средиземноморского) его типа, а также в пещерах, карстовый процесс скрыт от непосредственного исследования, поэтому очень часто об интенсивности и активности его развития судят по карстопроявлениям, особенно на первых этапах изысканий.

Если условия развития карста для рассматриваемой территории, как и для других карстовых регионов, одинаковы, то факторы интенсивности распространения его форм и активности их развития зависят от конкретных природных условий, которые представлены двумя их основными группами: геолого-геоморфологической и климато-гидрогеологической [35]. На современном этапе к ним присоединилась группа техногенных факторов, которая определяется степенью антропогенной нагрузки на геологическую среду. Природные и техногенные факторы могут как замедлять, так и ускорять развитие карста и часто влияют на него в совокупности друг с другом [34, 35].

В силу большей скорости растворения сульфатов в сравнении с карбонатами интенсивность распространения карстопоявлений в районах развития первого до 5 раз выше, чем второго. По-



**Рис. 2.** Наблюдательная сеть мониторинга берегов водных объектов (ГУП “Башгеолцентр”, НИИ БЖД РБ, ООО “ИЭГИ”) на карте орографических областей и районов Республики Башкортостан по [23] на 01.01.2021.

Условные обозначения: I. Область Русской равнины (Предуралье). Районы: 1 – Уфимское плато, 2 – Бугульмино-Белебеевская возвышенность, 3 – Общий Сырт (возвышенность); Прибельская равнина (I-Г): 4 – пологоволнистая и 5 – холмисто-увалистая; 6 – Приайская равнина; 7 – Белокатайское плато; 8 – холмисто-увалистые предгорья западного склона Урала.

II. Область горного Урала. Районы: 9 – низкогорные хребты западного склона Урала, 10 – среднегорные хребты западного склона Урала; Южно-Уральское плоскогорье (II-B): 11 – Зилаирское плато, 12 – плато Уралтау; 13 – Хребет Уралтау; 14 – низкогорные хребты восточного склона Урала.

III. Область Западно-Сибирской равнины (Зауралье). Районы: 15 – грядово-мелкосопочные предгорья восточного склона Урала, 16 – Сакмаро-Таналыкская высокая равнина, 17 – Кизило-Уртазымская равнина.

18 – террасы крупных речных долин. 19 – границы: а – областей, б – районов. 20 – наблюдательные участки (номер в кружке): 1 – д. Байназарово, р. Белая; 2 – с. Ир, р. Белая; 3 – с. Зирган, р. Белая; 4 – г. Уфа (район Мелькомбината), р. Белая; 5 – г. Бирск, р. Белая; 6 – д. Старые Киешки, р. Белая; 7 – с. Бакалы, р. Сюнь; 8 – д. Пенькозавода, р. Сюнь; 9 – д. Худайбердино, р. Кривля; 10 – с. Усмангали, р. Бол. Инзер; 11 – с. Узунларово, р. Инзер; 12 – с. Юнны, р. База; 13 – д. Утягулово, р. Касмарка; 14 – с. Тазларово, р. Мал. Сурень; 15 – д. Ниж. Сарабиль, р. Бол. Сурень; 16 – д. Биккужа, р. Бол. Сурень; 17 – д. Новомешерево, Ай; 18 – д. Старомешерево, р. Ай; 19 – с. Нижегородка, р. Дема; 20 – д. Новоиткеево, р. Аургазы; 21 – с. Иглино, р. Белекес; 22 – с. Менеузтамак, р. Менеуз; 23 – д. Чебыково, р. Шадды; 24 – с. Исянгулово, р. Ташла; 25 – г. Сибай, р. Камышлы-Узяк; 26 – с. Турумбетово, р. Уршак; 27 – с. Кирышкино, р. Ашкар; 28 – с. Баимово, Мал. Кизил; 29 – с. Зубово, р. Берсувань.

раженность карстовыми формами рельефа, связанными с развитием сульфатного карста, достигает 25% (иногда и выше), тогда как карбонатного – не превышает 5% и обычно составляет менее 1%. В Южном Предуралье максимальная закарстованность сульфатного карста наблюдается на участках, сложенных белыми сахаровидными (без примесей) гипсами, а для карбонатного карста – наиболее чистыми по составу органогенными известняками [24, 35].

Максимальное распространение поверхностных карстопоявлений наблюдается на участках сульфатного открытого карста. В районах его развития плотность поверхностных карстопоявлений (воронок, колодцев) достигает 400 (долина р. Аургазы) [24] и даже 1100 шт. (долина р. Селеук) на 1 км<sup>2</sup> площади карстовых полей [30]. При одинаковом составе покрывающих сульфатные карстующиеся породы отложений пораженностью поверхностными карстопоявлениями обратно пропорциональна их мощности. При одинаковой мощности покрывающих карстующиеся породы отложений она увеличивается от крепких в физико-механическом отношении пород к более слабым и от водонепроницаемых пород к водопроницаемым по трещинам, при наибольшей пораженности ими покровных отложений, водопроницаемость которых обусловлена их пористостью.

Повсеместно поверхностная закарстованность закономерно уменьшается от древних форм рельефа к молодым [28] и увеличивается от осей отрицательных неотектонических структур к сводам положительных [1].

Наиболее часты и многообразны формы сульфатного карста на коренных склонах долин (карст речных долин). При этом на высоких склонах в обстановке активного водообмена карстовые формы более разнообразны и многочисленны, чем на низких и пологих, где водообмен затруднен [34, 35].

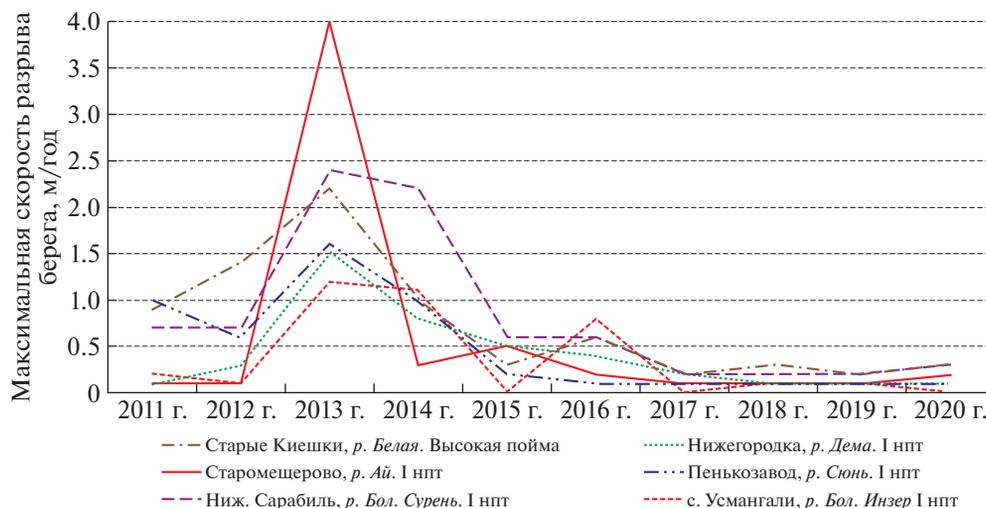
Многолетними (~40 лет) мониторинговыми наблюдениями за карстопоявлениями в г. Уфе установлено, что в условиях интенсивного водообмена карстовых вод образуются в среднем два новых, хотя и малых (в поперечнике до 3 м и глубиной не более 1.5 м) провала в год, тогда как в условиях затрудненного водообмена трещинно-карстовых вод возникновение их крайне редко.

Кроме того, установлено, что наиболее часто провалы образуются весной, а в многолетнем ряду – в годы с повышенным количеством атмосферных осадков [21, 26].

Наиболее представительным показателем современной активности развития карста является частота возникновения свежих карстовых провалов. Она опосредованно свидетельствует не только о скорости растворения и выщелачивания карстующихся пород, но вбирает в себя и все факторы, способствующие образованию современных карстопоявлений, а активность провалообразования является важным показателем карстоопасности территории и регламентирован СП 115.13330.2016 [20].

В 90 населенных пунктах Башкортостана карст активно проявляется на поверхности в виде провалов и воронок, а около 340 пунктов находятся на территориях возможного их образования (8.2% от всех населенных пунктов РБ). Вновь образующиеся карстовые провалы вызывают возникновение чрезвычайных ситуаций различного характера – от полного разрушения или деформаций зданий и сооружений до негативного морально-психологического воздействия на население, проживающее в районах их возникновения [27]. Только в Уфе с 1963 по 2020 г. зафиксировано не менее 40 случаев деформаций зданий (в том числе многоэтажных) и инженерных сооружений (автомобильные и железнодорожные пути сообщения, ЛЭП и др.), обусловленных карстом [14]. Яркий пример – пятиэтажное здание Центра социальной защиты населения, возведенное в 1977 г., из-за деформации фундамента и самого здания, вызванной карстом, даже после принятия мер противокарстовой защиты в 1982 г., было признано аварийным, а позже снесено [15]. Свежий пример – деформация 9-этажного жилого дома в Уфе по ул. Интернациональной, 193/2. Она обусловлена образованием 25.11.2016 рядом с домом карстового провала диаметром 5 м и глубиной 10 м, в котором исчез автомобиль Лада-Калина, что широко освещалось местными СМИ.

Провал, образовавшийся весной 2000 г. в Демском районе Уфы (Чебоксарский переулоч, 15), на проезжей части дороги вынудил жителей ближайших домов покинуть их более чем на сутки, что было обусловлено активным увеличением его



**Рис. 3.** Максимальные скорости размыва речных берегов на типичных наблюдательных участках, м/год. Примечание: нпт – надпойменная терраса.

размеров, которое сопровождалось содроганием грунта и излиянием из провала подземных вод [27].

Из фондовых и архивных источников автором собраны сведения по ~330 значительным (с поперечником и глубиной более 3 м) карстовым провалам, образовавшимся в регионе за последние 100 лет (1920–2020 гг.). Несомненно, что количество карстовых провалов в регионе значительно больше, но мелкие из них остались, по-видимому, не учтенными особенно вдали от населенных пунктов, тогда как крупные провалы редко остаются незамеченными местным населением. Согласно СП 115.13330.2016 [20], территории, на которых возникают карстовые провалы диаметром 3–20 м относятся к опасным, а диаметром более 20 м – к весьма опасным.

Собранные сведения по провалам с фиксированным временем образования систематизированы автором в базе данных, сформированной в ГИС “Панорама” [26], на основании которой произведена современная оценка развития карста.

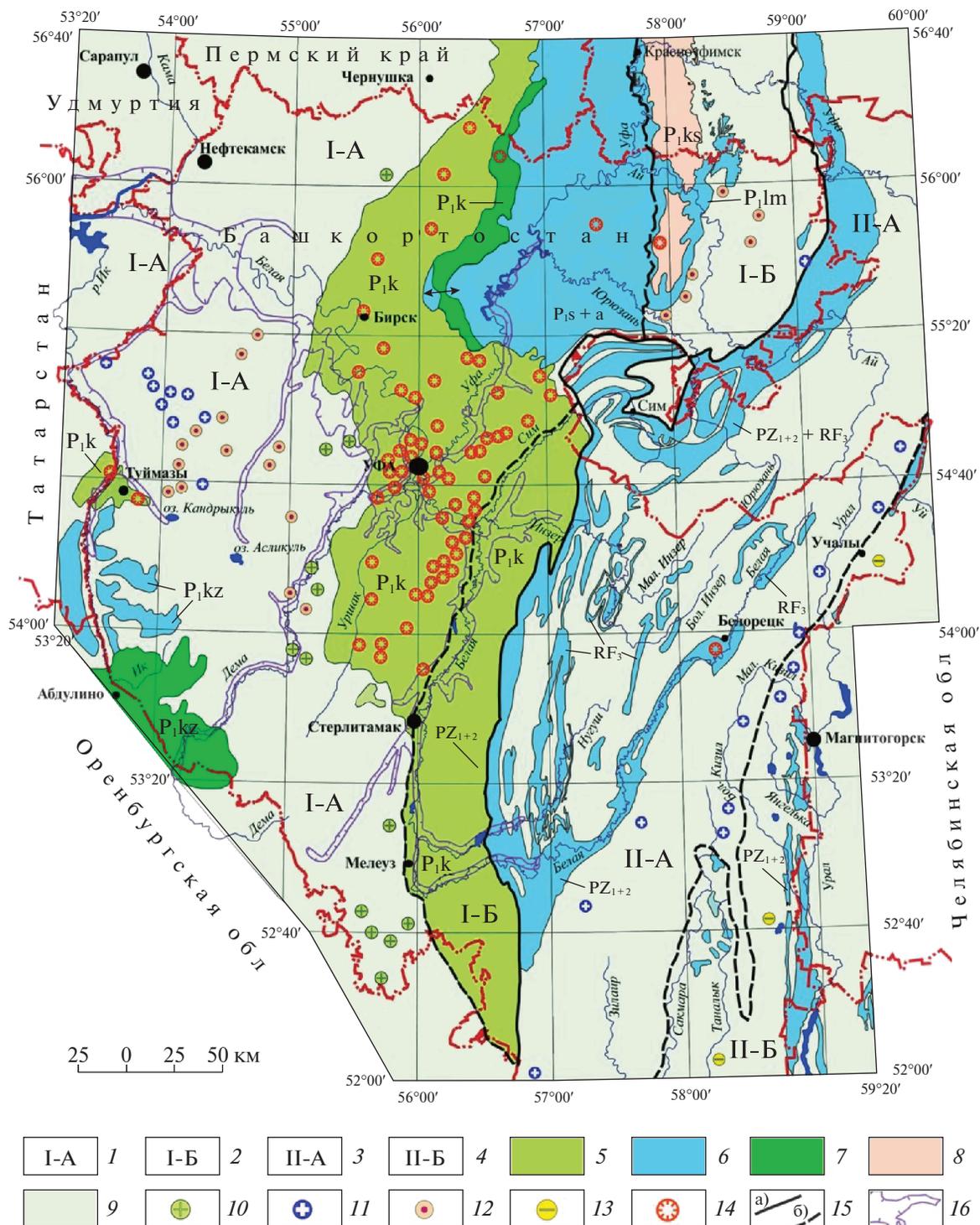
Наиболее часто карстовые провалы возникали в Южном Предуралье и обусловлены развитием карста в нижнепермских гипсах кунгурского яруса. Ежегодно в регионе в районах развития сульфатного карста образуются 2–3 новых карстовых провала, а один раз в 3–5 лет возникают аномально крупные (поперечником до 40 м и глубиной до 20 м) [22]. В районах развития карбонатного и сульфатно-карбонатного карста современные провалы возникали относительно редко. С 1920 по 2020 гг. в районах развития этих типов карста возникло не более 20 значительных карстовых провалов поперечником до 12 м и глубиной до 6 м [26].

Наиболее полные сведения о карстовых провалах собраны автором с 2000 по 2020 гг. За этот

период достоверно установлено образование 34 относительно крупных карстовых провала в поперечнике более 3.0 м (до 40.0 м) и глубиной более 2.0 м (до 20.0 м). Все они возникли в Южном Предуралье и связаны с карстом в гипсах иренского горизонта кунгурского яруса. Наибольшее их количество образовалось в Уфе (12 шт.), где к природным факторам развития карста добавляются техногенные, главные из которых – утечки из водонесущих коммуникаций [35] (рис. 5).

Более половины карстовых провалов образовалось в долинах рек. Основная их часть (12 шт.) возникла в пределах вторых надпойменных террас р. Белая (левобережной) и р. Уфа (правобережной). Все они тяготеют к подножиям современных коренных склонов долин рек или к склонам предкинельских (ранний плейстоцен) палеодолин. На поймах и первых надпойменных террасах долин рек карстовые провалы образовывались значительно реже. Чаще всего они располагаются в тыловых их частях, характеризуются небольшими размерами в плане (не более 10.0 м) и незначительной глубиной (до 3.0 м). На вторых надпойменных террасах глубина чаще- и котлообразных провалов иногда достигает 10.0 м при поперечнике до 20.0 м. На склонах долин-дрен и водораздельных пространствах образовалось по 9 карстовых провалов. На первых они тяготеют к нижним или верхним их частям, а на вторых – к придолинным частям водораздельных пространств [26]. Приуроченность провалов к придолинным частям водораздельных пространств, связана с хорошо известной общей закономерностью усиления развития карста от “ядер” водораздельных пространств к речным долинам [32].

По количеству (15 шт.) и объему (81.7 тыс. м<sup>3</sup>) карстовые провалы наиболее часто образовыва-



**Рис. 4.** Типы карста Южного Урала и Предуралья [26, 33]

Условные обозначения: Карстовая страна Восточно-Европейской равнины (I): 1 – (I-A) равнинный карст в горизонтально и пологозалегающих породах Предуралья; 2 – (I-B) равнинный и предгорный карст Предуралья в пологозалегающих и слабо дислоцированных породах. Уральская карстовая страна (II): 3 – (II-A) горный и предгорный карст в дислоцированных и сильно дислоцированных образованиях Урала; 4 – (II-B) равнинный карст в складчато-глыбовых отложениях Зауралья. Типы карста: 5 – сульфатный в породах кунгурского яруса (P<sub>1k</sub>) нижней перми (I-A); 6 – карбонатный в верхнепермских породах казанского (P<sub>2kz</sub>), уфимского (P<sub>1u</sub>) яруса и лемазинской свиты (P<sub>1lm</sub>) нижней перми (I-A), нижнего, среднего палеозоя (PZ<sub>1+2</sub>) и верхнего рифея (RF<sub>3</sub>) (II-A); 7 – сульфатно-карбонатный в верхне- и нижнепермских породах казанского (P<sub>2kz</sub>) и кунгурского (P<sub>1k</sub>) ярусов (I-A); 8 – кластокарст в породах кунгурского яруса кошелевской свиты (P<sub>1ks</sub>) и уфимского яруса (P<sub>1u</sub>) нижней перми (I-A). Локальные проявления карста: 10 – сульфатного, 11 – карбонатного, 12 – кластокарста, 13 – сульфидного. 14 – крупные карстовые провалы с фиксированным временем образования. 15 – границы: а) – карстовых стран, б) – типов карста по характеру рельефа и условиям залегания горных пород. 16 – контур палеодолин, откартированных Н.Н. Толстуновой в масштабе 1:500 000 (1994 г.) по данным государственной геологической съемки масштаба 1:200 000.



**Рис. 5.** Техногенный провал над ливневым коллектором в Уфе, ул. Цюрупа, 38: а – общий вид провала, б – свод коллектора в борту провала. Дата образования 02.07.2021. Фото А.И. Смирнова.

лись в условиях закрытого (русского) типа карста, где красующиеся гипсы кунгурского яруса залегают под скальными и полускальными отложениями уфимского яруса с трещинной водопроницаемостью. Чуть реже они возникали в районах развития перекрытого (подаллювиального или камского) типа карста (14 шт. объемом 22.7 тыс. м<sup>3</sup>), в условиях перекрытия гипсов кунгура аллювиальными плейстоценовыми образованиями с поровой водопроницаемостью. Наименьшее же количество карстовых провалов произошло в условиях покрытия карстующихся гипсов суглинисто-глинистыми неоген-четвертичными слабоводопроницаемыми отложениями (2 шт. объемом 0.6 тыс. м<sup>3</sup>) [26].

Общим для всех современных карстовых провалов (в любых условиях их возникновения) является то, что они образовались на территориях с повышенной пораженностью поверхностными карстопроявлениями, что связано с унаследованностью их образования от развития карста в неоген-четвертичное время, как по территории, так и по направленности. Резко активизировавшись в предкинемское время (время заложения палеодолин рек), что обусловлено увеличением мощности дренированной карстующейся тощи, карст наиболее активно продолжает развиваться в тех же самых местах.

Еще одной общей особенностью образования современных карстовых провалов является их приуроченность к положительным неотектоническим поднятиям, на что указывал еще в конце 1970-х гг. В.Г. Вахрушев [1]. Так, в 2000–2020 гг. наиболее крупные провалы возникли в пределах Рязано-Охлебининского вала на Уршак-Бельском и Уфа-Симском междуречьях, для которого характерны наивысшие скорости подъема современных тектонических движений в Предуралье [22].

Среднее значение образования крупных провалов в 2000–2020 гг. в регионе составило 1.7 провала в год. В последнее десятилетие отмечается общее увеличение образования крупных карстовых провалов с 0.7 провала в год в 2000–2010 гг. до 2.7 провала в год в 2011–2020 гг., а наибольшая частота образования провалов (6 шт.) отмечена в 2016 г., с максимальным их объемом 69.7 тыс. м<sup>3</sup> при среднем значении за 20 лет – 6.3 тыс. м<sup>3</sup>. Причины резкой активизации развития карста в 2016 г. достоверно не установлены, прямой связи ее с метеофакторами не прослеживается.

Согласно СП 115.13330.2016 [20], активность развития карста в 2000–2010 гг. можно оценить, как слабую, в 2011–2020 гг. – как высокую, а в 2016 г. – как очень высокую.

### ОПОЛЗНЕВОЙ ПРОЦЕСС

Оползневой процесс в рассматриваемом регионе пользуется относительно ограниченным распространением, хотя его воздействие на объекты экономики не менее ощутимо, чем от других проявлений ЭкГП. Так, из-за развития в апреле 2007 г. оползневых смещений объемом около 50 тыс. м<sup>3</sup> на правом склоне долины р. Стерля в г. Стерлитамак, под угрозой разрушения оказались 4 коттеджа. В 2013 г. для снижения активности развития оползня в его теле сооружены дренажные колодцы, из которых по трубам грунтовые воды отведены в р. Стерля, по фронту оползня длиной ~200 м воздвигнуты подпорные бетонные стенки, а его цирк засыпан песчано-гравийной смесью [5]. В результате активное развитие оползневой процесса приостановилось.

По механизму образования [13] оползневые смещения в рассматриваемом регионе представлены оползнями сдвига, оползнями скольжения и оползнями потоками. По строению [18] они в

большинстве случаев являются асеквентными и инсеквентными, значительно реже — консеквентными, а по возрасту подразделяются на древние (доголоценовые), образовавшиеся в периоды формирования палеодолин рек, и современные, развитие которых связано с голоценовым врезом эрозионной сети.

Древние оползни распространены, главным образом, в Предуралье на Бугульмино-Белебеевской возвышенности и Прибельской холмисто-увалистой равнине (см. рис. 2). На остальной территории они встречаются крайне редко. Предкинельский врез (глубиной до 200 м) в раннем плиоцене создал благоприятные условия для развития оползней на крутых склонах палеодолин, где они в то время были распространены очень широко. Позже, в крупных долинах рек сползшие в их днища оползневые тела были либо уничтожены речными водами, либо были погребены под плиоцен-четвертичными отложениями. Вследствие этого в современном рельефе древние оползни фиксируются только в верхних течениях рек, а в нижних — сохранились лишь их цирки.

На Бугульмино-Белебеевской возвышенности древние оползневые смещения приурочены к терригенным отложениям казанского яруса ( $P_2kz$ ). По форме они обычно циркуобразные одноярусные. Размеры их достигают 100–250 м по фронту при ширине захвата склона 20–50 м и амплитуде смещения 20–40 м. На Прибельской холмисто-увалистой равнине они распространены значительно в меньшей степени, что связано с ее меньшей энергией рельефа. Приурочены они к толщам переслаивания уфимских песчаников и аргиллитов ( $P_{1u}$ ). Размеры их не превышают 80–120 м по фронту и 20–30 м по ширине захвата, при амплитуде смещения до 10–15 м.

Древние оползневые смещения в настоящее время являются, в основном, стабилизировавшимися. Активизация их наблюдается только на участках, где нарушается состояние равновесия древних оползневых смещений техногенезом (преимущественно подрезкой склонов).

Современные оползни распространены, в основном, в равнинных частях региона и развиты преимущественно в суглинисто-глинистых плейстоценовых и неогеновых отложениях, очень редко в уфимских терригенных породах (консеквентные оползни). По механизму образования они представлены, главным образом, оползнями сдвига и оползнями потоками. Длина по фронту первых обычно составляет 60–80 м (редко до 250 м), ширина захвата — 10–15 м (до 30 м), амплитуда смещения — не более 10 м. У вторых соответственно: 10–15 (иногда до 150) м, 5–15 (редко до 100) м и 1–3 (до 7) м.

Повсеместно преобладают оползни-потоки в виде оплывин, развитие которых связано с раз-

жижением суглинисто-глинистых плиоценовых и четвертичных пород в период их весенне-осеннего увлажнения территории.

В зоне возможного отрицательного воздействия оползневого процесса находятся около 20 населенных пунктов Башкортостана, что составляет всего 0.4% от всех населенных пунктов республики.

По собранным автором сведениям с 2000 г. в рассматриваемом регионе зафиксировано образование 10 значительных (длиной по фронту более 50 м и амплитудой смещения более 2 м) новых оползневых смещений, угрожающих объектам экономики или оказавших на них отрицательное воздействие.

В последние 20 лет самый значительный оползень образовался в апреле 2000 г. в Иглинском районе на юго-западной окраине д. Шакша (Прибельская пологоволнистая равнина). В геоморфологическом отношении он возник на крутом (до  $15^\circ$ – $20^\circ$ ) эрозионном уступе высотой 15–18 м, образованном безымянным ручьем в тыловой части III надпойменной террасы долины р. Уфа. Оползанию подверглись среднеплейстоценовые аллювиальные суглинки и глины. Длина оползния по фронту составила 250 м, ширина захвата 20–75 м и амплитуда смещения — 0.3–3.0 м [26]. По механизму образования это оползень сдвига, по структуре — асеквентный.

В середине 2000-х гг. в д. Хрусталево Альшеевского муниципального района РБ на правом крутом (до  $30^\circ$ ) склоне долины р. Курсак (Бугульминско-Белебеевская возвышенность) в элювиально-делювиальных четвертичных отложениях, представленных песчано-глинистыми отложениями со щебнем и обломками коренных пород (песчаники, известняки, мергели), зафиксировано образование двух оползней-потока. Их параметры: первого — длина по фронту 100 м, ширина захвата — 70 м, амплитуда смещения — 2.5 м, объем — около 17.5 тыс. м<sup>3</sup>; второго — 160 м, 80–100 м, 3–4 м и 48 тыс. м<sup>3</sup> соответственно. В зоне возможного воздействия оползневого процесса оказались 5 жилых домов, располагающихся в 5–10 м от вершины оползния. В настоящее время оползень в стабильном состоянии и угрозы хозяйственным объектам не представляет.

В последнее десятилетие оползневые смещения возникали в виде оплывин в 2013, 2017 и 2019 гг. в г. Уфа и его окрестностях. Установлено [14], что их образование в 2013 г. связано с незарегулированным поверхностным стоком территории в год с повышенной увлажненностью территории. Образование же оползней в 2017, 2019 и 2020 гг. в городе и его окрестностях вызвано искусственной подрезкой склонов (рис. 6).



**Рис. 6.** Общий вид оползня (а) с подпорной стенкой в борту котлована (б) в Уфе (ул. Коммунистическая, д. 106). Дата образования 03.12.2019. Фото А. И. Смирнова.

На остальной территории региона оползни, отрицательно воздействующие на объекты экономики в 2000–2020 гг., не фиксировались.

Таким образом, современную активность развития оползневой процесс в целом по региону можно оценить, как слабую, с наибольшей активностью его развития на урбанизированных территориях, обусловленную техногенезом.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из всех ОГП самым распространенным видом на территории РБ является боковая эрозия рек, которая в количественном отношении оказывает наибольшее воздействие на населенные пункты республики. В многолетнем разрезе активность ее развития в последнее десятилетие по всей территории рассматриваемого региона оценивается как слабая (скорость размыва до 0.5 м в год) и средняя (0.5–1.0 м/год) при наибольшей активности в Предуралье. Высокие скорости размыва берегов (1.1–3.0 м/год) зафиксированы в 2012–2014 и 2017 гг., отличавшиеся в ряду наблюдений наибольшей многоводностью.

Если подмыв и разрушение берегов рек прогнозируемы в пространстве, а при наличии прогноза гидрометеорологических факторов, и во времени, что позволяет заблаговременно осуществлять берегоукрепительные мероприятия, то современные проявления карстового процесса на поверхности во времени неожиданные и не предсказуемы, поэтому карст – самый опасный вид ОГП в регионе. Наивысшая активность его развития характерна для Предуралья в районах распространения сульфатного карста. Современная активность его развития в последние 20 лет, определенная по частоте образования карстовых провалов, в целом по рассматриваемому региону оценивается в образовании 1.7 свежих крупных провала в год. В 2011–

2020 гг. она была выше среднемноголетней при аномально высокой активности провалообразования в 2016 г.

Оползневой процесс на территории РБ развит локально. Активность его развития слабая и наряду с гидрометеорологическими факторами обусловлена в основном техногенезом.

Полученные сведения по активности развития карста и оползневой процесс являются ориентировочными, поскольку достоверные данные о скорости их развития могут быть получены только на основе ведения мониторинга этих видов ЭГП, который в настоящее время в регионе не организован. Наряду с осуществлением мониторинга ОГП, задачей их дальнейшего изучения является геолого-экономическая оценка воздействия отдельных их видов на объекты экономики, что позволит более реально обосновывать затраты на исследования ОГП и борьбу с ними.

*Исследование выполнено в рамках государственной бюджетной темы № FMRS-2022-0010.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вахрушев Г.В. Неотектоника и современные карстовые провалы в Западной Башкирии // Матер. по геоморфологии и новейшей тектонике Урала и Поволжья. Уфа: БФАН СССР, 1969. № 2. С. 128–137.
2. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан в 2010 году. Уфа: Министерство природопользования и экологии Республики Башкортостан, 2011. 343 с.
3. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан в 2011 году. Уфа: Министерство природопользования и экологии Республики Башкортостан, 2012. 367 с.

4. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан в 2012 году. Уфа: Министерство природопользования и экологии Республики Башкортостан, 2013. 319 с.
5. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан в 2013 году. Уфа: Министерство природопользования и экологии Республики Башкортостан, 2014. 336 с.
6. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан в 2014 году. Уфа: Министерство природопользования и экологии Республики Башкортостан, 2015. 325 с.
7. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан в 2015 году. Уфа: Министерство природопользования и экологии Республики Башкортостан, 2016. 309 с.
8. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан в 2016 году. Уфа: Министерство природопользования и экологии Республики Башкортостан, 2017. 314 с.
9. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан в 2017 году. Уфа: Министерство природопользования и экологии Республики Башкортостан, 2018. 329 с.
10. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан в 2018 году. Уфа: Министерство природопользования и экологии Республики Башкортостан, 2019. 275 с.
11. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан в 2019 году. Уфа: Министерство природопользования и экологии Республики Башкортостан, 2020. 286 с.
12. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан в 2020 году. Уфа: Министерство природопользования и экологии Республики Башкортостан, 2021. 287 с.
13. Закономерности оползневоего процесса на европейской территории СССР и его региональный прогноз. М.: Недра, 1980. 213 с.
14. Камалов В.Г., Барышников В.И. Опасные геологические процессы на территории Уфимского “полуострова” (Инженерная геодинамика). Уфа: Информреклама, 2019. 216 с.
15. Мартин В.И., Травкин А.И. Анализ причин аварийных ситуаций (отказов оснований) с сооружениями, возведенными на закарстованных территориях г. Уфы // Карст Башкортостана. Уфа: Информреклама, 2002. С. 216–226.
16. Методические рекомендации по проведению специального инженерно-геологического обследования территории: М.: ВСЕГИНГЕО, 1981. 64 с.
17. Рождественский А.П. Новейшая тектоника и развитие рельефа Южного Приуралья. М.: Наука, 1971. 286 с.
18. Саваренский Ф.П. Инженерная геология. Изд. 2-е, перераб. М.: Л.: ГОНТИ, 1939. 486 с.
19. Свод правил СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81. М.: Стандартинформ, 2018. 115 с.
20. Свод правил СП 115.13330.2016. Геофизика опасных природных воздействий. Актуализированная редакция СНиП 22-01-95. М.: Стандартинформ. Издание официальное, 2018. 31 с.
21. Смирнов А.И. Стационарные наблюдения за карстопроявлениями на Уфимском карстовом косогоре // Инженерная геология. 1992. № 2. С. 50–56.
22. Смирнов А.И. Аномально крупные карстовые провалы Южного Урала и Предуралья // Геологический сборник ИГ УНЦ РАН. 2013. № 10. Уфа: Ди-зайнПресс, С. 50–56.
23. Смирнов А.И. Генетические типы и формы рельефа. Атлас Республики Башкортостан. Уфа: Китап, 2005. 65 с.
24. Смирнов А.И. Открытый сульфатный карст Южного Предуралья // Геологический сборник ИГ УНЦ РАН. 2014. № 11. С. 243–248.
25. Смирнов А.И. Опасные геологические процессы Южного Урала и Предуралья // Анализ, прогноз и управление природными рисками в современном мире (ГЕОРИСК-2015): матер. 9-й междунар. научно-практ. конф. М.: РУДН, 2015. С. 380–386.
26. Смирнов А.И. Современные карстовые провалы на территории Южного Урала и Предуралья (в границах Республики Башкортостан) // Инженерная геология. 2020. Т. XV. № 4. С. 42–53. <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2020-15-4-42-53>
27. Смирнов А.И. Чрезвычайные ситуации, вызванные карстом на Южном Урале и в Предуралье // Вестник Академии Наук РБ. 2020. Т. 37. № 4 (100). 2020. С. 29–39. <https://doi.org/10.24411/1728-5283-2020-1040>
28. Смирнов А.И., Абдрахманов Р.Ф., Дурнаева В.Н. Пораженность рельефа Южного Предуралья формами сульфатного карста // Геоморфология. 2020. № 2. С. 74–84. <https://doi.org/10.31857/S0435428120020078>
29. Смирнов А.И., Бакиева А.Р. Карта карста Уфимского плато (в границах Республики Башкортостан) // Геологический вестник. 2020. № 3. С. 123–136. <https://doi.org/10.31084/2619-0087/2020-3-10>
30. Смирнов А.И., Соколов Ю.В. Ишеевский участок – уникальный карстово-спелеологический объект Южного Предуралья // Известия Русского географического общества. 2021. Т. 153. № 3. С. 63–75. <https://doi.org/10.31857/S086960712103006X>
31. Смирнов А.И., Ткачев В.Ф. Инженерно-геологические условия строительства // Атлас Республики Башкортостан. Уфа: Китап, 2005. С. 66–68.
32. Соколов Д.С. Основные условия развития карста. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 322 с.
33. Шеко А.И., Лехатинов А.М., Максимов М.М. Количественная оценка интенсивности проявления экзогенных геологических процессов при инженер-

- но-геологической съемке // Тр. ВСЕГИНГЕО. Вып. 3. 1971. С. 89–95.
34. *Smirnov A.I.* Clastoclast of the southern Cis-Urals // Proc. of the Int. Conf. “Science and innovations 2021: development directions and priorities”, September 29, 2021. Melbourne, Australia). P. 179–187. <https://doi.org/10.34660/INF.2021.29.35.016>.
35. *Smirnov A.I.* Conditions and factors for karst development in the Southern Urals and Cis-Urals // Proc. of the Int. Conf. “Process Management and Scientific Developments”. Birmingham, United Kingdom, October 13, 2021. Part 1. P. 133–143. <https://doi.org/10.34660/INF.2021.49.94.022>.

## TYPES AND CURRENT ACTIVITY IN DEVELOPMENT OF HAZARDOUS GEOLOGICAL PROCESSES IN THE SOUTHERN URALS AND CISURALS

A. I. Smirnov<sup>a, #</sup>

<sup>a</sup> *Institute of Geology, Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, ul. Karla Marksa, 16/2, Ufa, 450077 Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: smalil@mail.ru*

Hazardous geological processes are those that negatively affect or may potentially affect economic facilities, cause emergency situations and circumstances that adversely affect human life. The most widespread and hazardous types of exogenous geological processes in the region are lateral erosion of rivers, karst and landslides. The greatest impact on economic facilities is exerted by river lateral erosion in the form of bank erosion, which is recorded in every seventh settlement of the region. Surface manifestations of the karst process were recorded in 7% of settlements in the region, and landslide displacements – in 0.4%. Hazardous geological processes of exogenous genesis are most widespread in the plains of the Urals. For each of them, an assessment was made of the current activity of their development for the period 2000–2020. For river erosion of rivers, it was determined on the basis of aerial and satellite images at different times and on the basis of monitoring the state of river banks at 29 observation sites with different natural conditions. The rate of coastal erosion in the region as a whole is estimated as weak (with a rate of erosion of up to 0.5 m per year) and average (0.5–1.0 m/year), with the highest activity in the CisUrals and foothills of the Southern Urals. High rates of coastal erosion (1.1–3.0 m/year) were recorded in 2012–2014 and 2017, differing in the series of observations by increased water content. The current activity of karst and landslides was assessed by the frequency of the formation of new large karst sinkholes and significant new landslide displacements (with a front length of more than 50 m and a displacement amplitude of more than 5 m). Average activity of sinkhole formation was 1.7 sinkholes per year in 2000–2020 and was associated with karst in gypsum of the Kungurian stage of the lower section of the Permian system. An increase in the karst sinkhole formation frequency was established from 0.7 in 2000–2010 up to 2.7 sinkhole per year in 2011–2020. The highest frequency of sinkhole formation was recorded in 2016 in the Cis-Urals on the territory of urban agglomerations, where anthropogenic factors (mainly leaks from water-bearing communications), are added to the natural factors of karst development. The activity of the development of the landslide process in the region as a whole is weak and most often, along with meteorological factors, is due to technogenesis, i.e., artificial cutting of slopes.

**Keywords:** *lateral erosion of rivers, karst, landslide process, development activity, South Urals, Cis-Urals, Republic of Bashkortostan*

### REFERENCES

1. Vakhrushev, G.V. *Neotektonika i sovremennye karstovyye provably v Zapadnoi Bashkirii* [Neotectonics and modern karst sinkholes in Western Bashkiria]. *Materialy po geomorfologii i noveishej tektonike Urala i Povolzh'ya* [Materials on geomorphology and modern tectonics of the Urals and the Volga region]. Ufa, BFAN SSSR, 1969, no. 2, pp. 128–137. (in Russian)
2. *Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii prirodnnykh resursov i okruzhayushchei sredy Respubliki Bashkortostan v 2010 godu* [State report on the state of natural resources and the environment of the Republic of Bashkortostan]. Ufa, Ministerstvo prirodopol'zovaniya i ekologii Respubliki Bashkortostan, 2011, 343 p. (in Russian)
3. *Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii prirodnnykh resursov i okruzhayushchei sredy Respubliki Bashkortostan v 2011 godu* [State report on the state of natural resources and the environment of the Republic of Bashkortostan]. Ufa, Ministerstvo prirodopol'zovaniya i ekologii Respubliki Bashkortostan, 2012, 367 p. (in Russian)
4. *Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii prirodnnykh resursov i okruzhayushchei sredy Respubliki Bashkortostan v 2012 godu* [State report on the state of natural resources and the environment of the Republic of Bashkortostan]. Ufa, Ministerstvo prirodopol'zovaniya i ekologii Respubliki Bashkortostan, 2013, 319 p. (in Russian)
5. *Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii prirodnnykh resursov i okruzhayushchei sredy Respubliki Bashkortostan v 2013 godu* [State report on the state of natural resources and the environment of the Republic of Bashkortostan]. Ufa, Ministerstvo prirodopol'zovaniya i ekologii Respubliki Bashkortostan, 2014, 336 p. (in Russian)

6. *Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii prirodnnykh resursov i okruzhayushchei sredy Respubliki Bashkortostan v 2014 godu* [State report on the state of natural resources and the environment of the Republic of Bashkortostan]. Ufa, Ministerstvo prirodopol'zovaniya i ekologii Respubliki Bashkortostan, 2015, 325 p. (in Russian)
7. *Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii prirodnnykh resursov i okruzhayushchei sredy Respubliki Bashkortostan v 2015 godu* [State report on the state of natural resources and the environment of the Republic of Bashkortostan]. Ufa, Ministerstvo prirodopol'zovaniya i ekologii Respubliki Bashkortostan, 2016, 309 p. (in Russian)
8. *Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii prirodnnykh resursov i okruzhayushchei sredy Respubliki Bashkortostan v 2016 godu* [State report on the state of natural resources and the environment of the Republic of Bashkortostan]. Ufa, Ministerstvo prirodopol'zovaniya i ekologii Respubliki Bashkortostan, 2016, 314 p. (in Russian)
9. *Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii prirodnnykh resursov i okruzhayushchei sredy Respubliki Bashkortostan v 2017 godu* [State report on the state of natural resources and the environment of the Republic of Bashkortostan]. Ufa, Ministerstvo prirodopol'zovaniya i ekologii Respubliki Bashkortostan, 2018, 329 p. (in Russian)
10. *Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii prirodnnykh resursov i okruzhayushchei sredy Respubliki Bashkortostan v 2018 godu* [State report on the state of natural resources and the environment of the Republic of Bashkortostan]. Ufa, Ministerstvo prirodopol'zovaniya i ekologii Respubliki Bashkortostan, 2019, 275 p. (in Russian)
11. *Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii prirodnnykh resursov i okruzhayushchei sredy Respubliki Bashkortostan v 2019 godu* [State report on the state of natural resources and the environment of the Republic of Bashkortostan]. Ufa, Ministerstvo prirodopol'zovaniya i ekologii Respubliki Bashkortostan, 2020, 286 p. (in Russian)
12. *Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii prirodnnykh resursov i okruzhayushchei sredy Respubliki Bashkortostan v 2020 godu* [State report on the state of natural resources and the environment of the Republic of Bashkortostan]. Ufa, Ministerstvo prirodopol'zovaniya i ekologii Respubliki Bashkortostan, 2021, 287 p. (in Russian)
13. *Zakonomernosti opolznevoogo protsesssa na evropeiskoi territorii SSSR i ego regional'nyi prognoz* [Regularities of the landslide process in the European territory of the USSR and its regional forecast]. Moscow, Nauka Publ., 1980, 213 p. (in Russian)
14. Kamalov, V.G., Baryshnikov, V.I. *Inzhenernaya geodinamika territorii Ufimskogo "poluostrova"* [Engineering geodynamics of the territory of the Ufa "peninsula"]. Ufa, Inforeklama Publ., 2019, 216 p. (in Russian)
15. Martin, V.I., Travkin, A.I. *Analiz prichin avariinykh situatsii (otkazov osnovanii) s sooruzheniyami, vozvedennyimi na zakarstovannykh territoriyakh g. Ufy* [Analysis of the causes of emergencies (base failures) with structures erected on the karst territories of Ufa]. Karst of Bashkortostan. Ufa, Inforeklama Publ., 2002. pp. 216–226. (in Russian)
16. *Metodicheskie rekomendatsii po provedeniyu spetsial'nogo inzhenerno-geologicheskogo obsledovaniya territorii* [Methodical recommendations for carrying out a special engineering and geological survey of the territory]. Moscow, VSEGINGEO Publ., 1981, 64 p. (in Russian)
17. Rozhdestvenskii, A.P. *Noveishaya tektonika i razvitie rel'efa Yuzhnogo Priural'ya* [The newest tectonics and development of the relief of the Southern CisUrals]. Moscow, Nauka Publ., 1971, 286 p. (in Russian)
18. Savarenskii, F.P. *Inzhenernaya geologiya* [Engineering geology]. Moscow, St. Petersburg, GONTI Publ., 1939, 486 p. (in Russian)
19. *Svod pravil SP 14.13330.2018. Stroitel'stvo v seismicheskikh raionakh* [Aktualizirovannaya redaktsiya SNIIP II-7-81]. [The set of rules SP 14.13330.2014. Construction in seismic areas]. Moscow: Standartinform, Official edition, 2018, 115 p. (in Russian)
20. *Svod pravil SP 115.13330.2016. Geofizika opasnykh prirodnnykh vozdeistvii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIIP 22-01-95* [Code of rules SP 115.13330.2016. Geophysics of Hazardous Natural Impacts. Updated edition of SNIIP 22-01-95]. Moscow, Standartinform Publ., 2018, 31 p. (in Russian)
21. Smirnov, A.I. *Statsionarnye nablyudeniya za karstoprovyazheniyami na Ufimskom karstovom kosogore* [Stationary observations of karst occurrences at the Ufa karst slope]. *Inzhenernaya geologiya*. 1992, no. 2, pp. 50–56 (in Russian)
22. Smirnov, A.I. *Anomal'no krupnye karstovye provaly Yuzhnogo Urala i Predural'ya* [Abnormally large karst failures of the Southern Urals and Cis-Urals]. *Geologicheskii sbornik IG UNTs RAS, Ufa*, 2013, pp. 50–56. (in Russian)
23. Smirnov, A.I. *Geneticheskie tipy i formy rel'efa* [Genetic types and landforms]. Atlas of the Republic of Bashkortostan. Ufa: Government of the Republic of Bashkortostan, 2005, 65 p. (in Russian)
24. Smirnov, A.I. *Otkrytyi sulfatnyi karst Yuzhnogo Predural'ya* [Open sulfate karst of the Southern Urals]. *Geologicheskii sbornik IG UNTs RAS, Ufa*, 2014, no. 11. pp. 243–248. (in Russian)
25. Smirnov, A.I. *Opasnye geologicheskie protsessy Yuzhnogo Urala i Predural'ya* [Hazardous geological processes in the Southern Urals and the Cis-Urals]. *Materialy 9-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: Analiz, prognoz i upravlenie prirodnyimi riskami v sovremennom mire (GEORISK-2015)*. Moscow: Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology, 2015, pp. 380–386. (in Russian)
26. Smirnov, A.I. *Sovremennye karstovye provaly na territorii Yuzhnogo Urala i Predural'ya (v granitsakh Respubliki Bashkortostan)* [Modern karst sinkholes in the Southern Urals and Cis-Urals (within the borders of the Republic of Bashkortostan)]. *Engineering Geology*, 2020, vol. 15, no. 4. pp. 42–53. (in Russian)
27. Smirnov, A.I. *Chrezvychaynye situatsii, vyzvannye karstom na Yuzhnom Urale i v Predural'e* [Karst-induced emergency situations in the Southern Urals and the Cis-Urals]. *Vestnik Akademii nauk RB*, 2020, vol. 37, no. 4 (100), pp. 29–39. (in Russian)
28. Smirnov, A.I., Abdrakhmanov, R.F., Durnaeva, V.N. *Porazhennost' rel'efa Yuzhnogo Predural'ya formami sulfatnogo karsta* [Sulfate karst landforms in the Southern CisUrals]. *Geomorfologiya*, 2020, no. 2, pp. 74–84. (in Russian)

29. Smirnov, A.I., Bakieva, A.R. *Karta karsta Ufimskogo plato (v granitsakh Respubliki Bashkortostan)* [Karst map of the Ufa plateau (within the boundaries of the Republic of Bashkortostan)]. *Geologicheskii vestnik*, 2020, no. 3, pp. 123–136. (in Russian)
30. Smirnov, A.I., Sokolov, Yu.V. *Isheevskii uchastok – unikal'nyi karstovo-speleologicheskii ob'ekt Yuzhnogo Predural'ya* [Isheevskii site as a unique karstic speleological object in the Southern CisUrals]. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*, 2021, vol. 153, no. 3, pp. 63–75. (in Russian)
31. Smirnov, A.I., Tkachev, V.F. *Inzhenerno-geologicheskie usloviya stroitel'stva* [Engineering geological conditions of construction]. *Atlas of the Republic of Bashkortostan*. Ufa, Government of the Republic of Bashkortostan, 2005, pp. 66–68. (in Russian)
32. Sokolov, D.S. *Osnovnye usloviya razvitiya karsta* [Basic conditions for the development of karst]. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 1962, 322 p. (in Russian)
33. Sheko, A.I., Lekhatinov, A.M., Maksimov, M.M. *Kolichestvennaya otsenka intensivnosti proyavleniya ekzogennykh geologicheskikh protsessov pri inzhenerno-geologicheskoi s'emke* [Quantitative assessment of the intensity of manifestation of exogenous geological processes during engineering-geological survey]. *Trudy VSEGINGEO*, Moscow, VSEGINGEO Publ. 1971, issue, pp. 89–95. (in Russian)
34. Smirnov, A.I. Clastokarst of the southern Cis-Urals. *Proc. of the International Conference “Science and innovations 2021: development directions and priorities”*, September 29, 2021. Melbourne, Australia). pp. 179–187. <https://doi.org/10.34660/INF.2021.29.35.016>.
35. Smirnov, A.I. Conditions and factors for karst development in the Southern Urals and Cis-Urals. *Proc. of the International Conference “Process Management and Scientific Developments”*. Birmingham, United Kingdom, October 13, 2021. Part 1. pp. 133–143. <https://doi.org/10.34660/INF.2021.49.94.022>.

---

---

**ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ  
ПРОЦЕССЫ**

---

---

УДК 551.435.832

**АНАЛИЗ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И  
ИЗМЕНЧИВОСТИ СОСТОЯНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВБЛИЗИ  
ПОВЕРХНОСТНЫХ КАРСТОВЫХ ФОРМ В ОБСТАНОВКАХ РАЗВИТИЯ  
КАРБОНАТНО-СУЛЬФАТНОГО КАРСТА**© 2022 г. **Е. В. Дробинина<sup>1,\*</sup>, Д. Р. Золотарев<sup>2,\*\*</sup>**

<sup>1</sup> *Пермский государственный национальный исследовательский университет, геологический факультет,  
лаборатория прогнозного моделирования в геосистемах,  
ул. Букирева, д. 15, Пермь, 614068 Россия*

<sup>2</sup> *ООО “Противокарстовая и Береговая Защита” (ООО “ПКБЗ”),  
ул. Суцевский вал, д. 5, стр. 3, Москва, 127018 Россия*

*\*E-mail: alenadrobina@yandex.ru*

*\*\*E-mail: zolotarevdr@mail.ru*

Поступила в редакцию 19.10.2021 г.

После доработки 01.02.2022 г.

Принята к публикации 08.02.2022 г.

Статья посвящена изучению инженерно-геологических условий территории развития карбонатно-сульфатного типа карста, характеризующейся широким распространением поверхностных карстовых форм. Детально рассмотрены инженерно-геологические условия района исследований (Добрянский район Пермского края). Выполнена оценка площадной изменчивости состояния грунтов в пределах карстовых полей на основе анализа двумерных облаков точек, характеризующих зависимость исследуемого свойства от плотности карстовых форм. Пристальное внимание уделено участкам, не затронутым напрямую провалообразованием. Разгрузка подземных вод в трещинно-карстовый горизонт на изучаемой территории контролируется карстовыми воронками, причем, чем больше их количество на единицу площади (плотность), тем выше интенсивность инфильтрации и, следовательно, постседиментационных изменений свойств грунтов, связанных с фильтрацией грунтовых вод по направлению к областям разгрузки. Отмечено, что с увеличением плотности карстовых форм непосредственно за их пределами изменчивость свойств первого от поверхности грунтового слоя характеризуется увеличением плотности грунта и снижением коэффициента пористости, естественной влажности и содержания тонкодисперсной фракции. Влажность грунтов по мере увеличения плотности воронок снижается, что обусловлено хорошей инфильтрацией за счет развития трещин и, как следствие, хорошей проницаемостью массива.

**Ключевые слова:** *перекрывающая толща, изменчивость состояния грунтов, физические свойства, гранулометрический состав, карстовые воронки, карбонатно-сульфатный карст*

**DOI:** 10.31857/S0869780922020023

**ВВЕДЕНИЕ**

Территории, в геологическом разрезе которых широко развиты растворимые породы, характеризуются наличием как поверхностных, так и подземных карстовых форм: воронок, карстовых полостей, поноров и т.п. В пределах Российской Федерации крупные провальные формы, в районах развития сульфатного (гипсового [5]), карбонатно-сульфатного (карбонатно-гипсового [5]) типов карста, встречаются на территории Центрально-Европейской части и в Приуралье. Одна из особенностей сульфатного карста – относительно высокая скорость растворения трещиноватых гипсов и ангидритов, в результате чего под

мощной толщей нерастворимых водоупорных отложений при условии доступа агрессивных вод могут сформироваться значительные по размерам карстовые полости.

Вероятность появления карстового и/или карстово-суффозионного провала на земной поверхности как результата растворения карстующихся пород и обрушения пород сводовой части полости (при достижении критического размера) определяется геолого-гидрогеологическими условиями, структурой и напряженным состоянием массива горных пород.

Периоды интенсивного развития карстового процесса совпадают с сезонами высокой гидро-

геологической активности, в то время как сухие сезоны характеризуются низким уровнем грунтовых вод, медленной скоростью их циркуляции в карстовых системах (от двух до пяти раз меньшей, чем в течение сезона высокой гидрологической активности) [25]. Большое значение имеет скорость изменения уровня воды: чем выше ее значение, тем интенсивнее может быть деформация поверхности земли, связанная с карстово-суффозионными процессами [26]. А.И. Печеркиным и В.Е. Закоптеловым [19] при рассмотрении вопроса типизации закарстованных берегов водохранилищ (в том числе Камского) отмечена активизация процесса суффозии вследствие колебания уровней подземных и поверхностных вод в результате сработки и наполнения водохранилища.

Отметим, что максимальное развитие форм подземного карста в массиве приурочено, согласно принципиальной схеме гидродинамической зональности Г.А. Максимовича [16], к зоне периодического колебания уровня карстовых вод (переходной). Эта особенность формирования полостей в растворимых породах массива подтверждена результатами наблюдений за режимом подземных вод, проведенных ВерхнекамГИСИЗом в 1971–1972 гг. (годовой цикл) на территории г. Кунгур Пермского края [6].

Еще одним фактором, влияющим на протекание карстового процесса, является литология растворимых пород. В обстановках карбонатно-сульфатного карста крупные полости, инициирующие провалообразование, часто формируются на контакте сульфатных и перекрывающих их карбонатных отложений вследствие восстановления агрессивности воды по отношению к сульфатам из-за снижения в ней концентрации сульфата кальция при растворении карбонатных пород по мере нисходящего движения воды по массиву. Большинство воронок в карстовых районах Пермского края сформировано под влиянием данного фактора [13, 18].

Вышесказанное доказывает актуальность изучения инженерно-геологических условий карстовых массивов. Невозможность наблюдения за процессом подготовки провалообразования также является одним из главных затруднений при изучении карстовых массивов, поэтому выявление закономерностей в изменении инженерно-геологических условий и состояния дисперсных перекрывающих отложений вблизи поверхностных карстовых форм может быть весьма информативным.

#### ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗУЧАЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ

**Геоморфология и орогидрография.** В административном отношении изучаемая территория

относится к Добрянскому району Пермского края. Участок расположен в 5 км севернее Мыса Стрелка – слияния рек Чусовая и Кама. Местность представлена слабовсхолмленной равниной, nasledующей структуру Верхнекамской впадины, в придолинных частях р. Кама, сильно расчлененной ее притоками. Расчлененность рельефа благоприятно сказывается на инфильтрационной способности карстового массива [24]. Основным рельефообразующим элементом является р. Кама. Долина реки консеквентная, широкая, с террасированными склонами (до 4-х надпойменных террас).

**Тектоническое строение.** Изучаемая территория расположена в пределах северо-восточной части Краснокамско-Полазненского вала (рис. 1). В центральной части он прослеживается по выходам кунгурских отложений, которые выделяются среди сплошного поля развития уфимских пород. Вал протягивается в северо-восточном направлении на 100 км при ширине 10–15 км. Ось вала проходит по линии населенных пунктов: пгт. Полазна – г. Краснокамск – г. Нытва (Пермский край).

Дифференцированные *неотектонические* движения сводово-блокового и блокового характера приурочены к плиоцен-четвертичному этапу, характеризующемуся интенсификацией тектонических движений и, как следствие, формированием новой, глубоко врезанной и разветвленной речной сети современных очертаний.

Четвертичный период характеризуется общим подъемом всего Среднего Прикамья, причем на участке Краснокамско-Полазненского вала движения были более интенсивные [15]. Активность локальных поднятий в областях положительных структур подтверждается развитостью овражной сети, приподнятостью горизонтов с наличием карстовых пустот и пещер над урезом воды [20].

В районе Краснокамско-Полазненского вала скорость поднятия локальных структурных форм уменьшается с северо-востока на юго-запад. Наибольшей активностью характеризуются группа Гайвинских, Полазненского и восточная вершина Северокамского (д. Стряпунята и окрестности) поднятий, наименьшей – Краснокамское. Западная вершина Северокамского поднятия по степени активности занимает промежуточное положение.

**Геологическое строение.** В пределах района работ в геологическом строении приповерхностной части принимают участие породы пермской и четвертичной систем. Сводный геологический разрез по данным архивных скважин сверху вниз следующий.

**Четвертичные отложения (Q)** различного литологического состава развиты повсеместно. На высоких склонах и в долинах рек встречаются элювиально-делювиальные и аллювиальные от-



**Рис. 1.** Фрагмент схемы тектонического районирования масштаба 1: 5 000 000. Лист О-40 [22] с указанием местоположения Краснокамско-Полазненского вала [17].

ложения; водораздельные пространства с поверхности сложены бурыми и серо-коричневыми макропористыми известковистыми суглинками, супесями, супесями, реже глинами, с редкими включениями гальки. Аллювий надпойменных

террас представлен полимиктовыми алевритовыми песками (иногда с галькой и гравием), супесями, реже глинами. В основании преобладают залегающие с размывом на пермских породах разнотеррасные полевошпат-кварцевые пески с

редким гравием. Мощность отложений на левом берегу Камы изменяется от 14,8 м на севере участка (д. Бобки) до 31 м и более на юге (п. Пальники). На правом берегу мощность четвертичных отложений составляет от 3,3 м (д. Скобелевка) до 15,0–20,0 м (д. Заозерье).

*Соликамский горизонт* ( $P_{1sl}$ ) *уфимского яруса нижней перми* вскрыт скважинами на обоих берегах (по архивным данным). В состав отложений соликамского горизонта входят плитчатые мергели, известняки, доломиты, песчаники, алевролиты и аргиллиты. Карбонатные породы с подчиненными прослоями терригенных встречаются преимущественно в основании горизонта, верхняя его часть представлена незакономерным чередованием песчаников, аргиллитов и алевролитов с прослоями известняков. Встречаются включения и линзы гипса и ангидрита. В кровле горизонта встречается выдержанный по простиранию пласт кристаллического гипса мощностью до 2,5 м, в восточной части с высоким содержанием примесей глины.

На левом берегу горизонт представлен глинами и мергелями мощностью 35,7 м, на правом — известняком, доломитом, мергелями мощностью от 5 до 19 м и более (д. Заозерье), и преимущественно аргиллитоподобными глинами с прослоями известняков мощностью от 9,0 м в устье р. Хохловка до 21,2–57,0 м на водораздельных частях (д. Скобелевка).

*Иренский горизонт* ( $P_{1ir}$ ) *кунгурского яруса нижней перми* распространен повсеместно, его подстилают уфимские отложения. На левом берегу, на крутом абразионном склоне долины Камы (Чусовская Стрелка, Чусовской Мыс) встречаются обнажения пород горизонта. Иренский горизонт представлен чередованием гипсово-ангидритовых и карбонатных литологических пачек, в составе последних выделяются преимущественно доломиты с прослоями мергелей, аргиллитов и известняков. В устье Хохловки и в 0,6 км юго-западнее д. Гари вскрытый скважинами иренский горизонт представлен мощной толщей глин с редкими прослоями карбонатных и сульфатных пород. На левом берегу отложения горизонта вскрываются на глубине от 50,5 м, на правом — от 31,0 м (д. Заозерье) и от 30,2–62,0 м (д. Скобелевка); в устье р. Хохловка — на глубине от 14,6 м. Вскрытая мощность на левом берегу 49,6 м, на правом — 17,0–51,0 м.

**Гидрогеологические условия.** Подземные воды в элювиально-делювиальных отложениях безнапорные (грунтовые воды), распространены спорадически, на склонах логов, оврагов, реке на водоразделах. Питание горизонта осуществляется за счет атмосферных осадков, разгрузка — в тальвеговую часть логов и оврагов, карстовые воронки. Коэффициент фильтрации отложений изме-

няется от сотых и до десятых долей м/сут. Водообильность отложений низкая.

Трещинно-карстовый горизонт приурочен к соликамским и иренским отложениям. Отложения обводнены неравномерно: горизонт развит на крыльях Краснокамско-Полазненского вала, породы сводовой части вала обводнены локально. Водообильность горизонта непостоянная, фильтрационные свойства пород не выдержаны по площади; возможно формирование до 2–3 подгоризонтов вследствие широкого развития водопорных прослоев. Воды разлиты в трещиноватых и закарстованных сульфатах и карбонатах. Карбонатные пачки, расположенные близко к уровню местного базиса эрозии, зачастую являются водовмещающими, а подстилающие их сульфатные пачки — водопорными.

**Оценка закарстованности.** Карстующимися породами на участке являются известняки, доломиты, гипсы и ангидриты пермской системы. Согласно СП 11-105-97, ч. II (п. 5.1.5)<sup>1</sup>, известняки и доломиты относятся к труднорастворимым породам, гипсы и ангидриты — к среднерастворимым. По степени обнаженности карстующихся пород и характеру перекрывающей толщи в районе работ развит покрытый тип карста.

В соответствии с прил. Б.5 СП 115.13330.2016<sup>2</sup> изучаемый участок попадает в зону распространения сульфатного, карбонатно-сульфатного карста. Согласно Карты карстовой опасности на территории России масштаба 1:10000000<sup>3</sup>, территория в долинах Камы и Гайвы и на их междуречьях в отношении карста является весьма опасной (учитывая мелкий масштаб карты и возможное смещение границ категорий до 5 км).

## ХАРАКТЕРИСТИКА ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАРСТОВАННОСТИ

Левый берег — участок Чусовского мыса, находится в пределах западной части Полазненского (Полазнинско-Шалашинского) карстового района, характеризующегося развитием карбонатно-сульфатного и сульфатного карста в гипсах и наличием перекрывающих сульфаты плитчатых трещиноватых известняков и доломитов кунгурского яруса общей мощностью до 50 м.

<sup>1</sup> СП 11-105-97. Свод правил “Инженерно-геологические изыскания для строительства”. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200007405>

<sup>2</sup> СП 115.13330.2016. Свод правил “Геофизика опасных природных воздействий”. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054202>

<sup>3</sup> Карта карстовой опасности на территории России в масштабе 1:10 000 000 (Институт геоэкологии РАН, 1993 / Гл. ред. В.И. Осипов, отв. ред. В.М. Кутепов).



**Рис. 2.** Фотографии карстовых воронок: **А** – эрозионно-карстовая воронка № 1 (см. табл. 1), **Б** – эрозионно-карстовая воронка № 4 (см. табл. 1). Фото предоставлено С.В. Шербаковым.

Морфология и плотность карстовых форм на участке Чусовского мыса определяются степенью трещиноватости пород, составом и мощностью покровных образований, рельефом. Наибольшая плотность карстовых форм отмечается на склонах (Чусовской) и присклоновых участках водоразделов, логов, где мощность покровных отложений уменьшается. Поверхностные карстопроявления в большинстве случаев относятся к древним, их диаметры изменяются от 9 до 20 м при глубине до 6 м. При слиянии нескольких воронок образуются котловины диаметром 100 м и более, вытянутые параллельно логам [3, 5]. К склонам приурочена большая часть крупных конусообразных и чашеобразных воронок. У бровок склонов расположены наиболее глубокие, иногда сложные, воронки и котловины. Вниз по склону количество воронок и их размеры уменьшаются. Это явление объясняется тем, что в коренных склонах долин и оврагов увеличивается трещиноватость, главным образом, за счет развития трещин бортового отпора. Кроме того, в верхних частях склонов отме-

чается небольшая мощность и более грубый состав покровных отложений, что при наличии трещин бортового отпора усиливает фильтрацию воды. На ровной поверхности водораздела, где мощность покровных отложений увеличивается, меняются очертания карстовых форм, и снижается их плотность. В условиях равнинного рельефа вынос глинистого материала происходит в замкнутые карстовые понижения, поэтому здесь 85.6% карстовых форм представлены карстовыми блюдцами, озерами и болотами [3].

В пределах изучаемой территории участка Чусовского мыса все воронки являются древними. На космоснимках хорошо дешифрируются воронкообразные формы диаметром 35–50 м в 500–1000 м южнее изучаемого участка (д. Кулигино), часть из них заполнена водой. На рис. 2 представлено фото типовых карстовых воронок, а в табл. 1 характеристика их форм. Упоминания об образовании провальных форм вблизи изучаемого участка относятся к 1948 г. (в 3.5 км южнее участ-

**Таблица 1.** Типовая характеристика карстовых форм, представленных на рис. 2

Номер карстопроявления	Форма		Морфометрические параметры							Условный возраст
	в плане	в профиле	диаметр по наибольшей оси, м	диаметр по наименьшей оси, м	средний диаметр, м	глубина, м	глубинность, д.с.	площадь, м <sup>2</sup>	объем, м <sup>3</sup>	
			$d_{max}$	$d_{min}$	$d$	$h$	$h/d$	$S$	$V$	
1	круг	конус	36.4		36.4	15.0	0.41	1040.1	6240.6	древняя
Эрозионно-карстовая, задернованная, произрастает древесная растительность										
4	эллипс	конус	43.0	38.0	40.5	11.5	0.28	1282.7	5900.4	древняя
Эрозионно-карстовая, задернованная, произрастает древесная растительность										

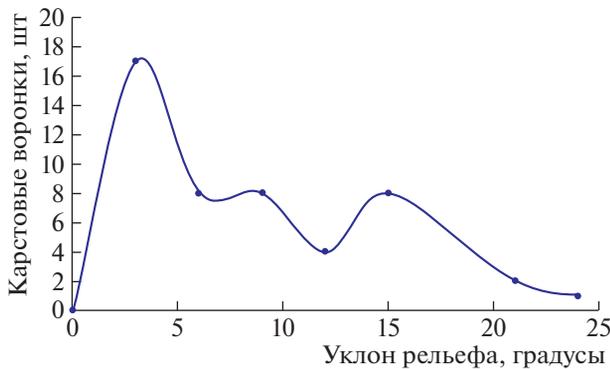


Рис. 3. Распределение поверхностных карстовых форм в зависимости от уклона местности.

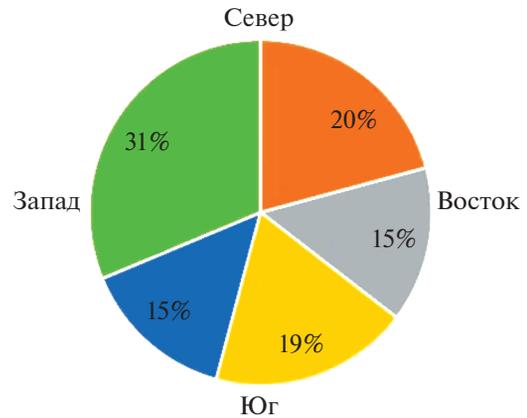


Рис. 4. Распределение поверхностных карстовых форм в зависимости от экспозиции склонов.

ка, восточнее д. Городище [4]), а также к апрелю 1991 г. в том же населенном пункте [7, 21].

Правый берег — территория *Полазненского участка* [3]. Мощность гипсово-ангидритовой толщи на участке достигает 100 м и более, покровные отложения либо отсутствуют, либо имеют незначительную мощность (1–20 м), увеличивающуюся с востока на запад.

Карст типично сульфатный, его развитию способствуют значительная приподнятость территории над местным базисом эрозии и трещиноватость пород. Отличительная черта *Полазненского участка* — высокая закарстованность обоих берегов Камы; средняя плотность — 60 карстовых форм на км<sup>2</sup>. На некоторых площадках на левом берегу она может достигать 1000 шт./км<sup>2</sup>. Большая часть карстовых форм — воронки, встречаются карры, карстовые рвы, котловины, овраги, сухие речки и озера. Все воронки на правом берегу в пределах изучаемой территории *Полазненского участка* также являются древними. Как правило их диаметры имеют значения 2–14 м, на западе встречены единичные формы диаметром 30–67 м, развитые на территории с относительно большей мощностью водоупора.

В результате проведенного морфометрического анализа сделан вывод, что в пределах изучаемой территории карстовые формы преимущественно тяготеют к поверхностям рельефа с незначительным уклоном (рис. 3). Это объясняется тем, что в подобных условиях инфильтрация превалирует над поверхностным стоком. Большая часть карстовых форм приурочена к склонам северо-западной экспозиции (рис. 4).

#### ХАРАКТЕРИСТИКА ПОДЗЕМНОЙ ЗАКАРСТОВАННОСТИ

По данным опубликованных материалов о подземной закарстованности участка *Чусовского мыса* [4, 5, 7], можно сделать вывод, что карстующиеся породы, развитые на левом берегу Камы, характеризуются интенсивной трещиноватостью и наличием большого количества каверн диаметром 2–3 мм. В целом трещиноватость и кавернозность пород способствуют формированию единой гидравлической сети, обеспечивающей движение воды в карстовом массиве [7].

К.А. Горбуновой при описании карстового участка *Чусовского мыса* отмечено, что в 1949 г. под руслом р. Чусовая (около 10 км южнее участка) скважинами были вскрыты карстовые полости высотой до 8 м [5]. Кроме того, характерная полость была вскрыта при образовании *Городищенского провала* [4]. Формирование крупных карстовых полостей под руслами Камы и Чусовой в районе *Чусовского мыса* объясняется тем, что зона активного движения карстовых вод находится ниже отметок русел этих рек. Об этом свидетельствует значительная закарстованность первых террас, где воронки образуются в результате просядок и провалов рыхлых аллювиальных отложений в карстовые полости в гипсах, залегающих ниже русел рек. Под аллювиальными и делювиально-элювиальными отложениями I террасы р. Чусовая вблизи ее устья при бурении скважин обнаружены погребенные карстовые воронки и карстовые полости в гипсах иренского горизонта [4].

Интенсивная подземная закарстованность также была отмечена при проходке карстологических скважин на изучаемой территории обоих берегов Камы. Местоположение скважин, вскрывших карстовые полости, представлено на рис. 5. Высота полостей от 0.1 до 2.9 м, при среднем ее значении 0.3 м, но единичные полости имели высоту и до 5.0 м. Например, при проходке одной скважины в непосредственной близости (около 5 м) от бровки крупной карстовой воронки произошел провал инструмента, а последующий видеокартаж подтвердил существование в сульфатных по-

дальше породы, развитые на левом берегу Камы, характеризуются интенсивной трещиноватостью и наличием большого количества каверн диаметром 2–3 мм. В целом трещиноватость и кавернозность пород способствуют формированию единой гидравлической сети, обеспечивающей движение воды в карстовом массиве [7].

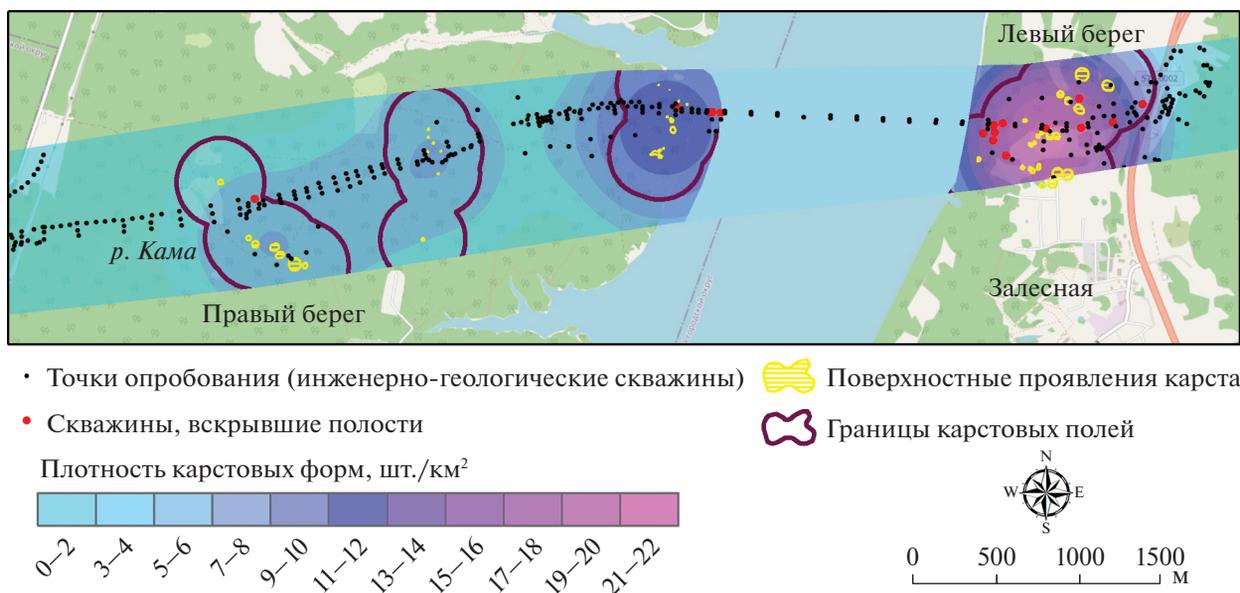


Рис. 5. Плотность поверхностных карстовых форм.

родах на глубине 18.5 м карстовой полости значительной ширины и высотой около 5 м. В той же скважине в интервале глубин 50–64 м было зафиксировано еще 6 провалов бурового инструмента.

#### МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЧИВОСТИ СОСТОЯНИЯ ПОКРОВНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

В качестве объекта исследования выбраны глинистые отложения среднего звена неоплейстоцена, слагающие с поверхности высокие (третью и четвертую) террасы Камы. Отложения развиты повсеместно на изучаемой территории, что обеспечивает достоверность статистического анализа достаточным для его проведения количеством наблюдений. Исследовались следующие свойства покровных отложений: плотность, естественная влажность, коэффициент пористости и суммарное содержание пылевой и глинистой фракций.

Физические свойства и гранулометрический состав (в частности, содержание пылевой и глинистой фракций) определялись посредством лабораторных испытаний монолитов грунтов, отобранных из инженерно-геологических скважин, местоположение которых представлено на рис. 5. Глубина отбора монолитов на правом берегу – от 0.2 до 15.0 м, реже до 20.0 м, на левом – 0.5–11.5 м. Шесть опробованных скважин пройдены на расстоянии 5–10 м от бровки карстовых воронок, остальные – на расстоянии от 15 м.

Цель данного анализа – оценка площадной изменчивости состояния грунтов в пределах кар-

стовых полей на участках, напрямую не затронутых провалообразованием. Под карстовыми полями авторами понимаются участки весьма интенсивного развития поверхностных карстовых форм. Карстовые поля здесь ограничивались буферными зонами от бортов карстовых воронок на удалении в 250 м, что немного больше максимального расстояния между карстовыми формами и скважинами, вскрывшими карстовые полости.

Плотность карстовых воронок в пределах карстовых полей рассчитывалась инструментально в программе ArcGIS с применением метода Kernel Density для получения непрерывной растровой поверхности, характеризующей изменение данного параметра в пределах карстового поля (см. рис. 5). Инструмент Kernel Density вычисляет плотность точек (количество на единицу площади – шт./км<sup>2</sup>) вокруг каждой ячейки выходного растра в пределах заданного радиуса поиска, принятый в данной работе равным 250 м.

Участки высокой плотности карстовых форм представляют собой зоны интенсивной инфильтрации поверхностных вод и разгрузки грунтовых вод в трещинно-карстовый горизонт. К одной из характерных региональных гидрогеологических особенностей изучаемого участка следует отнести отсутствие напора трещинно-карстовых вод или его ограниченное наличие на локальных участках. Специфические черты (сухие русла рек, отсутствие следов заболаченности и переувлажнения на дне воронок), присущие карстовым проявлениям в пределах изучаемых районов, давно отмечены рядом пермских исследователей [5].

**Таблица 2.** Диапазон изменения реальных значений физических свойств суглинков и плотности карстовых форм

Исследуемый параметр	Минимальное значение ( $x_{\min}$ )	Максимальное значение ( $x_{\max}$ )
Левый берег		
<i>Суглинки твердые</i>		
Естественная влажность, %	10.6	29.5
Коэффициент пористости, д.е.	0.330	0.820
Плотность грунта, г/см <sup>3</sup>	1.98	2.25
Содержание пылеватой и глинистой фракций, %	25.6	85.8
Плотность карстовых форм, шт./км <sup>2</sup>	0.7	20.4
<i>Суглинки полутвердые до тугопластичных</i>		
Естественная влажность, %	18.0	33.6
Коэффициент пористости, д.е.	0.510	0.940
Плотность грунта, г/см <sup>3</sup>	1.85	2.12
Содержание пылеватой и глинистой фракций, %	29.1	82.5
Плотность карстовых форм, шт./км <sup>2</sup>	0.7	20.4
Правый берег		
<i>Суглинки твердые</i>		
Естественная влажность, %	10.4	28.9
Коэффициент пористости, д.е.	0.350	0.950
Плотность грунта, г/см <sup>3</sup>	1.66	2.26
Содержание пылеватой и глинистой фракций, %	31.8	93.3
Плотность карстовых форм, шт./км <sup>2</sup>	0.0	10.9
<i>Суглинки полутвердые до тугопластичных</i>		
Естественная влажность, %	15.5	36.6
Коэффициент пористости, д.е.	0.400	1.040
Плотность грунта, г/см <sup>3</sup>	1.80	2.20
Содержание пылеватой и глинистой фракций, %	17.1	91.0
Плотность карстовых форм, шт./км <sup>2</sup>	0.0	11.3

Опробование отложений в непосредственно в бортах самих воронок и их днищах не проводилось, поэтому в рамках данного исследования оценка их свойств не выполнялась.

Изменчивость значений изучаемых инженерно-геологических свойств отложений за пределами воронок оценивалась на основе построения и анализа двумерных облаков точек. Каждая пара значений, характеризующих положение точки на графике, описывалась координатами: ординатой (Y) – значением изучаемого свойства суглинистых отложений в точке опробования; и абсциссой (X) – значением плотности карстовых воронок, извлеченным с растровой поверхности в этой же точке.

Все используемые числовые значения переменных приведены (табл. 2) к одинаковой обла-

сти их изменения посредством нормализации по формуле:

$$x_{ind} = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}},$$

где  $x_{ind}$  – нормированное значение параметра, диапазон изменения которого 0–1 (индексная оценка);  $x_i$  – реальное значение параметра,  $x_{\min}$  – минимальное значение параметра в выборке,  $x_{\max}$  – максимальное значение параметра в выборке.

Цель нормализации – приведение исследуемых параметров разных единиц измерения к единой шкале для совместного аналитического и графического анализа.

На рис. 6 приведены типовые графики, описывающие характер изменения значений исследуе-

мых свойств, выраженных в индексной форме, в зависимости от плотности воронок, также выраженной в индексной форме. Результаты проведенного анализа сведены в табличную форму (табл. 3), где изменчивость состояния исследуемых грунтов в зависимости от плотности карстовых воронок описывается разницей индексных оценок изучаемых свойств на участках с максимальным и минимальным значением плотности воронок ( $x_{ind}(P_{max}) - x_{ind}(P_{min})$ ).

Результаты статистического анализа свидетельствуют о том, что в пределах карстовых полей на участках, не затронутым напрямую провалообразованием, состояние первого от поверхности грунтового слоя, представленного суглинками, с увеличением плотности карстовых форм характеризуется увеличением плотности грунта и снижением коэффициента пористости, естественной влажности и содержания тонкодисперсной фракции.

По мнению авторов, такой характер изменения свойств суглинков может быть связан с тем, что интенсивность инфильтрации на участках с повышенной плотностью карстовых форм выше, следовательно, именно к ним направлено движение фильтрационного потока, содержащего и твердую компоненту. В результате тонкодисперсный материал выносится в зоны разгрузки – карстовые воронки, а мелкий оседает в поровом пространстве покровных отложений. Влажность грунтов по мере увеличения плотности воронок снижается, что обусловлено хорошей инфильтрацией за счет развития трещин и, как следствие, хорошей проницаемостью массива, а также за счет отсутствия напоров вод трещинно-карстового горизонта, способного препятствовать нисходящей фильтрации.

Принимая во внимание древний возраст поверхностных карстовых форм и геологическое строение изучаемого участка, можно сделать вывод, что подобный характер изменчивости значений физических свойств дисперсных грунтов обусловлен длительностью процессов фильтрации грунтовых вод в направлении к областям разгрузки – участкам с высокой плотностью карстовых воронок.

Изучению изменчивости физических и физико-механических свойств грунтов, перекрывающих закарстованные породы, посвящены работы многих исследователей. Если говорить о поведении связных и несвязных грунтов перекрывающей толщи над карстовыми полостями или иными ослабленными зонами в растворимых породах, то следует упомянуть детерминированные модели, разработанные А.В. Аникеевым. При физическом моделировании процессов провалообразования было подтверждено, что основную роль в подготовке деформаций обрушения игра-

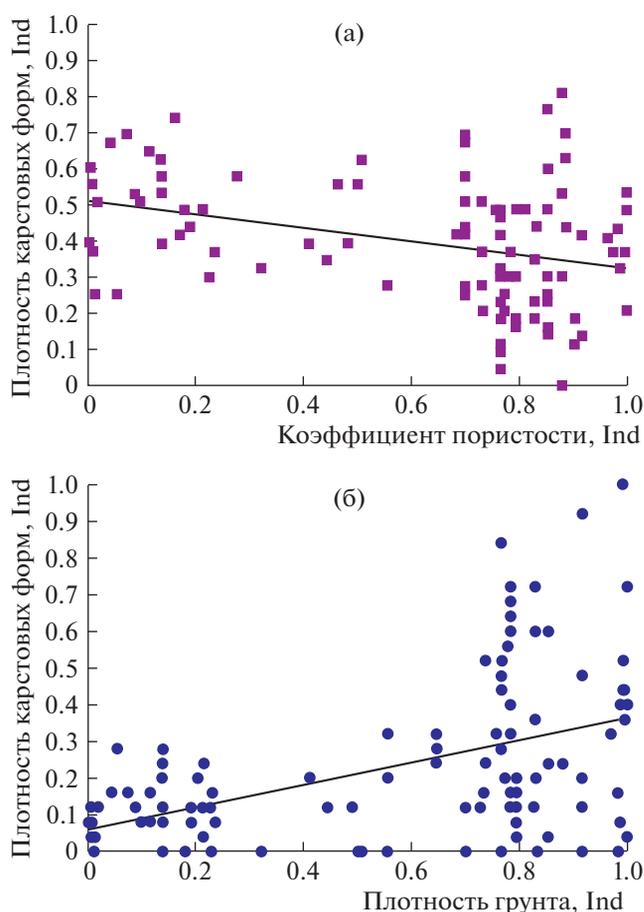


Рис. 6. Зависимость значений коэффициента пористости (а) и плотности грунта (б) от плотности карстовых форм на левом берегу р. Кама.

ют растягивающие напряжения. Очевидно, что уменьшение напряжений в грунтах над сформированной карстовой полостью в массиве приводит к разуплотнению грунтов [1].

Ослабленные зоны в грунтах покровной толщи, формирование которых сопряжено с разрядкой нормальных напряжений в перекрывающих грунтах над карстовой полостью, фиксируются в разрезе при проведении статического или динамического зондирования по падению сопротивления грунтов внедрению конуса зонда. Такие зоны соответствуют участкам развития вторичных парагенетически связанных с карстом суффозионных полостей и полостей обрушения [11]. Эффективность такого подхода доказана В.С. Крашенинниковым и В.П. Хоменко на промплощадке в г. Дзержинск Нижегородской области, где зондирование проводилось в четвертичных аллювиальных грунтах, перекрывающих карбонатно-сульфатную карстующуюся толщу. В ходе зондирования была выявлена ослабленная зона, наличие которой впоследствии было подтверждено результатами бурения.

**Таблица 3.** Итоговая таблица, отражающая изменчивость состояния исследуемых грунтов в зависимости от плотности поверхностных карстовых форм

	Количество значений	Плотность поверхностных карстовых форм $P_{ind}$					Разница индексных оценок ( $x_{ind}(P_{max}) - x_{ind}(P_{min})$ ), %*
		< 0.2	0.2–0.4	0.4–0.6	0.6–0.8	0.8–1.0	
Свойства грунтов, $X_{ind}$		Левый берег					
		<i>Суглинки твердые</i>					
		**					
Естественная влажность							
Плотность грунта	163	0.10	0.11	0.28	0.28	0.33	23.05
Коэффициент пористости	163	0.63	0.64	0.59	0.52	0.55	–8.09
Содержание пылевой и глинистой фракций	82	0.84	0.81	0.78	0.74	0.70	–14.15
Свойства грунтов, $X_{ind}$		<i>Суглинки полутвердые до тугопластичных</i>					
Естественная влажность	110	0.45	0.39	0.36	0.35	0.34	–11.21
Плотность грунта	110	0.50	0.49	0.46	0.50	0.62	12.55
Коэффициент пористости	110	0.50	0.47	0.46	0.39	0.38	–11.62
Содержание пылевой и глинистой фракций	72	0.82	0.77	0.72	0.52	0.48	–34.73
Свойства грунтов, $X_{ind}$		Правый берег					
		<i>Суглинки твердые</i>					
Естественная влажность	110	0.53	0.49	0.42	0.51	0.31	–21.89
Плотность грунта	110	0.61	0.62	0.68	0.67	0.87	25.89
Коэффициент пористости	110	0.42	0.44	0.37	0.36	0.20	–22.19
Содержание пылевой и глинистой фракций	45	0.61	0.60	0.49	0.20	0.20	–40.87
Свойства грунтов, $X_{ind}$		<i>Суглинки полутвердые до тугопластичных</i>					
Естественная влажность	236	0.49	0.44	0.36	0.37	0.34	–15.58
Плотность грунта	236	0.41	0.45	0.55	0.56	0.56	14.47
Коэффициент пористости	236	0.50	0.50	0.35	0.38	0.33	–17.49
Содержание пылевой и глинистой фракций		–**					

\*Знак “–” свидетельствует об обратном характере изменчивости состояния грунтов в зависимости от плотности карстовых форм.

\*\*Характер изменчивости не установлен.

Цветовая гамма отражает изменения индексных оценок в зависимости от плотности поверхностных карстовых форм: насыщенность цвета прямо пропорциональна увеличению значений.

По мнению В.П. Хоменко, под разуплотненными (ослабленными) зонами в покровной толще понимаются участки, подвергшиеся частичному фильтрационному разрушению в начальной стадии развития карстово-суффозионных процессов. В.П. Хоменко экспериментально обосновал, что признаком начала формирования карстового провала может служить наличие разуплотненных зон в геологическом разрезе, где перекрывающая толща пород с бутовой текстурой подстилается трещиноватыми карстующимися породами. Поиск зон разуплотнения можно ве-

сти посредством обработки данных о гранулометрическом составе грунтов [11]. Так, В.С. Крашенинниковым и В.П. Хоменко в модельных условиях детально исследовался гранулометрический состав грунтов в разных точках перекрывающей толщи над карстовой полостью или трещиной в водоупоре. В результате ими выделено три зоны, гранулометрический состав которых различен: в зоне непосредственно над полостью заполнитель практически отсутствует и грунт отличается высокой степенью однородности [12].

При проведении инженерно-геологических изысканий на территории Москвы, где типовой разрез перекрывающей толщи представлен песчаными грунтами с подстилающим их юрским водоупором, на участках нарушения сплошности последнего происходит постепенное снизу вверх разуплотнение песчаных грунтов. Причиной тому служит вынос частиц в закарстованный массив после разрушения грунтов под действием вертикальной фильтрации через нарушение в водоупоре, обусловленной напором трещинно-карстового горизонта [8, 9, 14].

Кроме того, А.Д. Кочевым исследован характер изменчивости юрских глин и сделаны выводы, что по направлению к воронкам увеличиваются пористость, естественная влажность, в массиве и уменьшаются значения плотности грунта, что связано с вероятным формированием разуплотненной зоны в покровной толще в связи с развитием карстово-суффозионного провала. Так же автором отмечается, что такие изменения свойств наблюдаются на незначительных расстояниях от карстово-суффозионных форм: зачастую много меньших, чем расстояния между скважинами [10].

Следует обратить внимание еще на одну работу, в которой обсуждается изменчивость свойств отложений на участках развития карста. А.В. Аникеевым и др. по результатам исследования двух карстовых воронок: древней и молодой, отмечается, что плотность и влажность грунтов, отобранных в бортах древней воронки, выше, чем в ее центральной части. В центральной части отмечается более низкое, чем в бортах, содержание дисперсных частиц (пылеватых и глинистых – степень агрегированности выше). В молодой воронке авторами отмечается инверсия изучаемых свойств на крыльях карстовой формы и в центральной части, которая объясняется тем, что молодая воронка отличается интенсивной инфильтрацией поверхностных вод, которая сопровождается уплотнением пород под действием силы тяжести и вследствие заполнения их порового пространства вымытыми мелкими и тонкими частицами [2].

Принимая во внимание вышесказанное и тот факт, что практически все зафиксированные карстовые полости расположены на расстоянии 30–215 м (кроме одной, зафиксированной в скважине, пробуренной у борта карстовой воронки), можно сделать вывод о верности выдвинутой гипотезы, описывающей изменчивость состояния грунтов в пределах карстовых полей в зависимости от плотности карстовых форм.

Так, участки над карстовыми полостями испытывают разгрузку напряжений, способную привести к их разуплотнению. Дисперсный материал потоком грунтовых вод переносится из областей питания к участкам интенсивного дренирования – карстовым воронкам, и чем выше

плотность последних, тем большее влияние данная область разгрузки оказывает на дренирование территории. Древний возраст форм, развитых в районе исследования, объясняет относительное повышение значений плотности (при низкой пористости) отложений и относительное понижение содержания тонкодисперсной компоненты именно их длительными постседиментационными изменениями на участках провалообразования, связанными с движением грунтовых вод в направлении к областям разгрузки.

Изменения влажности объясняются региональной особенностью территории и тем, что непосредственно район исследования хорошо дренируется логом со значительным количеством отвершков. В бортах лога широко развиты трещины бортового отпора. Подобный характер изменения влажности покровных отложений (правда, при залегании карбонатов на незначительных глубинах) отмечается в работе Чен Х. и др. (Chen X. et al. [23]): над целиковыми зонами грунты характеризуются большим увлажнением за счет слабой инфильтрации. Над выветрелыми зонами в карстующихся породах за счет развития трещин и, как следствие, хорошей проницаемости массива, влага в верхних горизонтах не задерживается и просачивается вглубь массива.

Также следует обратить внимание на консистенцию изучаемых отложений. Для твердых глинистых грунтов процесс изменения напряженно-деформированного состояния, связанный с формированием карстовых форм, будет выражаться в появлении трещин, способствующих повышению интенсивности инфильтрации и инфлюации.

Здесь уместно упомянуть исследования зарубежных коллег, касающиеся морфологии трещин в карбонатных породах и физических свойств заполнителя этих трещины. Так материал заполнителя отличается от грунтов перекрывающей толщи повышенной плотностью, приобретенной вследствие транзита дисперсного материала. Значения пористости и фильтрационных свойств грунтов перекрывающей толщи также выше, чем заполнителя трещины. Содержание песчаной фракции выше в грунтах перекрывающей толщи. Это может быть связано с тем, что тонкодисперсный материал выносится в трещины, тем самым увеличивается поровое пространство и содержание относительно крупной фракции [27].

Из-за отсутствия данных о физических свойствах отложений в пределах самих воронок (борта, дно), утверждать о характере их изменчивости в непосредственной близости к карстовым формам (до 15 м) на основании выполненных исследований невозможно. Но, согласно представлениям о состоянии грунтов на участках развития карстовых воронок и вблизи них, в них должны наблюдаться пониженные значения плотности,

повышенные значения пористости и содержания тонкодисперсных частиц. Вероятно, на расстоянии первые метры до 15 м от карстовых воронок, находится граница их влияния, за пределами которой характер изменчивости свойств меняется на противоположный.

Таким образом, характер изменчивости состояния первого от поверхности слоя дисперсных отложений объясняется наличием на изучаемой территории пермского глинистого водоупора, перекрывающего интенсивно закарстованный карстовый массив. В таких условиях разгрузка подземных вод в трещинно-карстовый горизонт контролируется карстовыми воронками, причем, чем выше их плотность, тем выше интенсивность инфильтрации и, следовательно, постгенетических изменений, связанных с длительным процессом фильтрации в области движения грунтовых вод к зонам разгрузки.

## ВЫВОДЫ

1. Поиск и выявление закономерностей в изменении инженерно-геологических условий и состояния дисперсных перекрывающих отложений вблизи поверхностных карстовых форм могут являться весьма информативными в условиях невозможности прямого наблюдения за процессом подготовки провалообразования.

2. Анализ инженерно-геологических условий вблизи поверхностных карстовых форм в обстановках развития карбонатно-сульфатного карста на побережье р. Кама свидетельствует, что формирование провалов здесь связано со структурно-тектоническим положением территории, обеспечивающим относительно близкое залегание карстующихся пород к поверхности. Хорошая расчлененность рельефа долины Камы ее притоками весьма благоприятствует карстовому процессу, обеспечивая хорошую инфильтрацию и инфильтрацию вод, особенно по трещинам бортового отпора, развитым на эрозионных логах левого берега.

3. Поверхностные проявления карстового процесса на изучаемой территории развиты достаточно хорошо. Размеры воронок на левом берегу Камы больше, чем на правом. Это связано с относительно глубоким залеганием закарстованных сульфатных пород в геологическом разрезе левого берега и с их обнаженностью в цоколе террас (мыс Стрелка), способствующей доступу пресных вод внутрь массива. Относительно мощная толща покровных отложений позволяет сформироваться значительным полостям, разрушение которых по достижении критического размера приводит к образованию крупных провалов на поверхности.

4. Разгрузка подземных вод в трещинно-карстовый горизонт контролируется карстовыми во-

ронками, причем, чем выше их плотность, тем выше интенсивность инфильтрации и, следовательно, постседиментационных изменений, связанных с длительным процессом фильтрации в области движения грунтовых вод к зонам разгрузки.

5. За пределами воронок изменчивость свойств первого от поверхности грунтового слоя с увеличением плотности карстовых форм характеризуется увеличением плотности грунта и снижением коэффициента пористости, естественной влажности и содержания тонкодисперсной фракции. Влажность грунтов по мере увеличения плотности воронок снижается, что обусловлено хорошей инфильтрацией и инфильтрацией за счет развития трещин и, как следствие, хорошей проницаемостью массива.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аникеев А.В.* Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. М.: РУДН, 2017. 328 с.
2. *Аникеев А.В., Сулимова А.Ю., Чумаченко С.А.* Инверсия свойств грунтов, слагающих молодые карстово-суффозионные воронки // Сергеевские чтения. Международный год планеты Земля: задачи геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Вып. 10. М.: ГЕОС, 2008. С. 6–11.
3. *Бутырина К.Г.* Гипсовый карст центральной части Пермской области: дисс. канд. географ. наук. Пермь: Перм. ун-т, 1968. 380 с.
4. *Горбунова К.А.* Карст некоторых районов Молотовской области: дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Молотов (ныне Пермь), 1956. 356 с.
5. *Горбунова К.А., Андрейчук В.Н., Костарев В.П., Максимович Н.Г.* Карст и пещеры Пермской области. Пермь: Перм. гос. ун-т, 1992. 200 с.
6. *Катаев В.Н., Кадебская О.И.* Геология и карст города Кунгура. Пермь: Перм. гос. ун-т; ГИ УрО РАН, 2010. 236 с.
7. *Килин Ю.А., Минькевич И.И.* Карст Чусовского Мыса Камского водохранилища // Инновационный потенциал естественных наук. Т. II. Экология и рациональное природопользование. Управление инновационной деятельностью. Пермь: Перм. ун-т, 2006. С. 91–94.
8. *Кожевникова В.Н.* О роли динамики и режима подземных вод в формировании карстово-суффозионных процессов (на примере некоторых районов г. Москвы) // Инженерные изыскания при строительстве. Вып. 5 (33). Сер. 2. М.: Стройиздат, 1974. С. 22–27.
9. *Кочев А.Д.* Проблема оценки карстово-суффозионной опасности на территории г. Москвы // Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг: матер. первой Общерос. научно-практ. конф. М.: Геомаркетинг, 2017. С. 31–43.
10. *Кочев А.Д.* Факторы и условия развития карстово-суффозионных процессов на территории г. Москвы // Инженерные изыскания. 2019. Т. XIII. № 5–6.

- С. 8–20.  
<https://doi.org/10.25296/1997-8650-2019-13-5-6-8-20>
11. Крашенинников В.С., Хоменко В.П. Изучение порывающей толщи, как один из важнейших компонентов инженерных изысканий в районах открытого карста // Вестник МГСУ. 2011. № 5. С. 113–119.
  12. Крашенинников В.С., Хоменко В.П. Изменение гранулометрического состава несвязных грунтов, предшествующее карстово-суффозионному провалообразованию // Инженерная геология. 2017. № 2. С. 52–62.
  13. Кунгурская ледяная пещера: опыт режимных наблюдений / Под. ред. В. Н. Дублянского. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 376 с.
  14. Кутенов В.М., Березкина Г.М., Зыкова Н.В., Кожевникова В.Н., Краснушкин А.В., Чертков Л.Г. Карстовые процессы и инженерно-геологические свойства глинистых пород // Инженерная геология. 1984. № 4. С. 91–103.
  15. Лунев Б.С. Особенности строения аллювия Камы и Чусовой на участках развития карста // Уч. зап. ПГУ. 1961. Т. XVIII. Вып. 2. С. 13–16.
  16. Максимович Г.А. Основы карстологии. Т. 1. Вопросы морфологии карста, спелеологи и гидрогеологии карста. Пермь: Пермское книжное издательство, 1963. 447 с.
  17. Назаров Н.Н. Карст Прикамья. Физико-географические (геоморфологические) аспекты. Пермь: ПГНИУ, 1996. 95 с.
  18. Печеркин А.И. Геодинамика сульфатного карста. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1986. 172 с.
  19. Печеркин А.И., Закоптелов В.Е. Карст и суффозия на берегах водохранилищ. Пермь: Перм. гос. ун-т, 1982. 88 с.
  20. Печеркин И.А. Геодинамика побережий Камских водохранилищ. Ч. I. Инженерно-геологические условия. Пермь: Перм. гос. ун-т им. А.М. Горького, 1966. 198 с.
  21. Пономарев А.Б., Попов С.Г., Заворохин А.Ф. Карстовый провал в д. Городище // Изучение Уральских пещер: доклады 2-й и 3-й конференций спелеологов Урала. Пермь: [б. и.], 1992. С. 53–54.
  22. Схема тектонического районирования масштаба 1:5000000. Лист О–40 (ФГУП “ВСЕГЕИ”, ООО “Комп”, ОАО “УГЭСЭ”, 2014). URL: <http://geo.mfvsegei.ru/200k/o-40/o-40-10/24/index.html>
  23. Chen X., Zhang Z., Chen X. et al. The impact of land use and land cover changes on soil moisture and hydraulic conductivity along the karst hillslopes of southwest China // Environ Earth Sci. 2009. № 59. P. 811–820. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0077-6>
  24. Fu Z.Y., Chen H.S., Zhang W., Xu Q.X., Wang S., Wang K.L. Subsurface flow in a soil-mantled subtropical dolomite karst slope: a field rainfall simulation study // Geomorphology. 2015. V. 250. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.08.012>
  25. Milanović P. Water resources engineering in karst. Boca Raton, Florida, USA, 2005. 328 p.
  26. Xiao X., Xu M., Ding Q. et al. Experimental study investigating deformation behavior in land overlying a karst cave caused by groundwater level changes // Environ. Earth Sci. 2018. 77 (3). <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7102-y>
  27. Youjin Y., Quanhou D., Li J., Xiangdong W. Geometric morphology and soil properties of shallow karst fissures in an area of karst rocky desertification in SW China // Catena. 2019. V. 174. P. 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.042>

## ANALYSIS OF ENGINEERING GEOLOGICAL CONDITIONS AND VARIABILITY OF FINE-GRAINED DEPOSITS NEAR SINKHOLES IN THE CARBONATE-SULFATE KARST AREAS

E. V. Drobinina<sup>a,#</sup> and D. R. Zolotarev<sup>b,##</sup>

<sup>a</sup> Perm State University, ul. Bukireva, 15, Perm, 614068 Russia

<sup>b</sup> Karst-Control and Bank Protection LLC, ul. Sushchevskii val, 5, str. 3, Moscow, 3127018 Russia

<sup>#</sup>e-mail: alenadrobinina@yandex.ru

<sup>##</sup>e-mail: zolotarevdr@mail.ru

The paper deals with the analysis of engineering geological conditions in the carbonate and sulfate karst region with widespread surface karst landforms. Engineering geological conditions in the study area (Dobryanskii region, Perm krai) are scrutinized in detail. The areal variability of soil state within the karst fields is assessed on the basis of the analysis of two-dimensional point clouds describing the relationship between the considered property and the density of karst landforms. Special attention is paid to the sites not subjected directly to collapses. Groundwater discharge to fractured karstic horizon is controlled by karst sinkholes in the study area. The higher the amount of sinkholes per square unit (density) is, the more intensely infiltration goes, and also the post-sedimentation alteration of soil properties related to groundwater percolation to discharge areas. It is shown that with rising density of karst landforms immediately beyond the limits of these areas, variability of properties of the uppermost soil layer manifests the increasing soil density and decreasing the porosity coefficient, the natural moisture and the fine-grained fraction content. The ground moisture de-

creases with the rising density of sinkholes, which is due to high infiltration by fractures and high ground mass permeability.

**Keywords:** *overlying soil massif, variability of properties, physical properties, grain-size distribution, sinkholes, carbonate and sulfate karst*

## REFERENCES

- Anikeev, A.V. *Provaly i voronki osedaniya v karstovykh raionakh: mekhanizmy obrazovaniya, prognoz i otsenka riska* [Sinkholes and subsidence of the earth's surface in karst areas: mechanisms of formation, forecast and risk assessment]. Moscow, RUDN Publ., 2017, 328 p. (in Russian)
- Anikeev, A.V., Sulimova, A.Yu., Chumachenko, S.A. *Inversiya svoystv gruntov, slagayushchikh molodye karstovo-suffozionnye voronki* [Inversion of soil properties within young karst-suffusion sinkholes]. Sergeev Readings. International year of planet Earth: problems in environmental geoscience, engineering geology and hydrogeology. Moscow, GEOS Publ., 2008, issue 10, pp. 6–11. (in Russian)
- Butyrina, K.G. *Gipsovyi karst tsentral'noi chasti Permskoi oblasti* [Gypsum karst in the central part of the Perm region]. Cand. Sci. (Geogr.) dissertation. Perm, PSU Publ., 1968, 380 p. (in Russian)
- Gorbunova, K.A. *Karst nekotorykh raionov Molotovskoi oblasti* [Karst of some districts of the Molotov region]. Cand. Sci. (Geogr.) dissertation. Molotov (now Perm), 1956, 356 p. (in Russian)
- Gorbunova, K.A., Andreichuk, V.N., Kostarev, V.P., Maksimovich, N.G. *Karst i peshchery Permskoi oblasti* [Karst and caves of the Perm region]. Perm, PSU Publ., 1992, 200 p. (in Russian)
- Kataev, V.N., Kadebskaya, O.I. *Geologiya i karst goroda Kungura* [Geology and karst of Kungur city]. Perm, PSU, GI UrO RAN, 2010, 236 p. (in Russian)
- Kilin, Yu.A., Min'kevich, I.I. *Karst Chusovskogo Mysa Kamskogo vodokhranilishcha* [Karst of Chusovsky Cape of Kamsky reservoir]. *Innovatsionnyi potentsial estestvennykh nauk* [The innovative potential of natural sciences]. Perm, 2006, vol. 2, pp. 91–94. (in Russian)
- Kozhevnikova V.N. *O roli dinamiki i rezhima podzemnykh vod v formirovaniy karstovo-suffozionnykh protsessov (na primere nekotorykh raionov g. Moskvy)* [The role of dynamics and regime of groundwater in the formation of karst-suffusion processes (on the example of some districts of Moscow)]. *Inzhenernye izyskaniya pri stroitel'stve* [Engineering survey during construction], vol. 5(33), series 2, Moscow, 1974, pp. 22–27. (in Russian)
- Kochev, A.D. *Problema otsenki karstovo-suffozionnoi opasnosti na territorii g. Moskvy* [The problem of assessing the karst-suffusion hazard in the territory of Moscow]. *Izuchenie opasnykh prirodnykh protsessov i geotekhnicheskii monitoring* [Hazardous natural processes research and geotechnical monitoring]. Proc. the first All-Russian scientific-practical conference. Moscow, Geomarketing Publ., pp. 31–43. (in Russian)
- Kochev, A.D. *Faktory i usloviya razvitiya karstovo-suffozionnykh protsessov na territorii g. Moskvy* [Factors and conditions for the development of the karst-suffusion processes in Moscow]. *Inzhenernye izyskaniya*, 2019, vol. XIII, no. 5–6, pp. 8–20. <https://doi.org/10.25296/1997-8650-2019-13-5-6-8-20> (in Russian)
- Krasheninnikov, V.S., Khomenko, V.P. *Izuchenie pokryvayushchei tolshchi kak odin iz vazhneishikh komponentov inzhenernykh izyskaniy v raionakh pokrytogo karsta* [The study of overlying massif as one of important components in site investigations in covered karst areas]. *Vestnik MGSU*, no. 5, 2011. pp. 113–119. (in Russian)
- Krasheninnikov, V.S., Khomenko, V.P. *Izmenenie granulometricheskogo sostava nesvyaznykh gruntov, predshestvuyushchee karstovo-suffozionnomu provalooobrazovaniyu* [Changing particle-size distribution in noncohesive soils that precedes karst-suffusion sinkhole formation]. *Inzhenernaya geologiya*, 2017, no. 2, pp. 52–62. (in Russian)
- Kungurskaya ledyanaya peshchera: opyt rezhimnykh nablyudenii [Kungur ice cave: an experience of regime observations]. V.N. Dublyanskii, Ed., Yekaterinburg, 2005, 376 p. (in Russian)
- Kutepov, V.M., Berezkina, G.M., Zykova, N.V., Kozhevnikova, V.N., Krasnushkin, A.V., Chertkov, L.G. *Karstovye protsessy i inzhenerno-geologicheskie svoystva glinistykh porod* [Karst processes and engineering geological properties of clays]. *Inzhenernaya geologiya*, 1984, vol. 4, pp. 91–103. (in Russian)
- Lunev, B.S. *Osobennosti stroeniya allyuviya Kamy i Chusovoi na uchastkakh razvitiya karsta* [Features of the alluvium structure of Kama and Chusovaya rivers in the areas of karst development]. *Uchenye zapiski PGU*, 1961, vol. XVIII, no. 2, pp. 13–16. (in Russian)
- Maksimovich, G.A. *Osnovy karstovedeniya. T. 1: Voprosy morfologii karsta, speleologii i gidrogeologii karsta* [Fundamentals of karst studies. Vol. 1: Issues of karst morphology, speleology and karst hydrogeology]. Perm, 1963, 447 p. (in Russian)
- Nazarov, N.N. *Karst Prikam'ya. Fiziko-geograficheskie (geomorfologicheskie) aspekty* [Karst of the Kama region. Physico-geographical (geomorphological) aspects]. Perm, 1996, 95 p. (in Russian)
- Pecherkin, A.I. *Geodinamika sul'fatnogo karsta* [Geodynamics of sulfate karst]. Irkutsk, 1986. 172 p. (in Russian)
- Pecherkin, A.I., Zakoptelov, V.E. *Karst i suffoziya na beregakh vodokhranilishch* [Karst and suffusion on the banks of reservoirs]. Perm, PSU Publ., 1982, 88 p. (in Russian)
- Pecherkin, I.A. *Geodinamika poberezhii Kamskikh vodokhranilishch*. [Geodynamics of the Kama reservoirs coasts]. Part I. Perm, 1966, 198 p. (in Russian)
- Ponomarev, A.B., Popov, S.G., Zavorokhin, A.F. *Karstovyi proval v d. Gorodishche* [Karst sinkhole in the village of Gorodishche]. *Izuchenie Ural'skikh peshcher*:

- doklady 2i i 3i konf. speleologov Urala* [Exploring the Ural Caves. Reports at the 2nd and 3rd conferences of the Urals speleologists]. Perm, 1992, pp. 53–54. (in Russian)
22. *Skhema tektonicheskogo raionirovaniya masshtaba 1:5 000 000. List O-40.* [Scheme of tectonic zoning scale of 1:5000000. Sheet O-40] Moscow, VSEGEI, LLC Comp, JSC UGSE, 2014. (in Russian)
  23. Chen, X., Zhang, Z., Chen, X. et al. The impact of land use and land cover changes on soil moisture and hydraulic conductivity along the karst hillslopes of southwest China. *Environ. Earth Sci.* 2009, no. 59, pp. 811–820. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0077-6>.
  24. Fu, Z.Y., Chen, H.S., Zhang, W., Xu, Q.X., Wang, S., Wang, K.L., 2015. Subsurface flow in a soil-mantled subtropical dolomite karst slope: a field rainfall simulation study. *Geomorphology*. 2015, vol. 250, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.08.012>.
  25. Milanović, P. Water resources engineering in karst. Boca Raton, Florida, USA, 2005. 328 p.
  26. Xiao, X., Xu, M., Ding, Q. et al. Experimental study investigating deformation behavior in land overlying a karst cave caused by groundwater level changes. *Environ. Earth Sci.*, 2018, no. 77 (3). <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7102-y>.
  27. Youjin, Y., Quanhou, D., Li, J., Xiangdong, W. Geometric morphology and soil properties of shallow karst fissures in an area of karst rocky desertification in SW China. *Catena*, 2019, no. 174, pp. 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.042>.

---

---

## ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

---

---

УДК 504.062

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРИРОДООХРАННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

© 2022 г. Н. С. Рогова<sup>1,\*</sup><sup>1</sup> *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,  
Ярославское шоссе, д. 26, Москва, 129337 Россия**\*e-mail: mos-007@yandex.ru*

Поступила в редакцию 19.10.2021 г.

После доработки 22.11.2021 г.

Принята к публикации 29.11.2021 г.

В статье предпринята попытка раскрыть основные причины неэффективности природоохранных мероприятий по ликвидации последствий загрязнения природной среды в следствии аварийных разливов нефтепродуктов при эксплуатации нефтегазовых месторождений в условиях Среднего Приобья. В последние годы наметилась тенденция сокращения образования новых нефтезагрязненных участков благодаря повышению надежности работы нефтепромыслового оборудования, возросли и темпы восстановления старых ранее нерекультивированных участков. Однако эта тенденция не отражает истинного положения вещей, так как при применении стандартных технологий рекультивации не в полном объеме учитываются особенности конкретного участка, вследствие чего проводимые природоохранные мероприятия малоэффективны. Это проявляется в увеличении сроков восстановления природной среды, и, как правило, приводит к повторному загрязнению прилегающей территории. В статье рассматриваются основные этапы устранения последствий аварийных разливов нефтепродуктов и их попадания на суходолы и водные объекты. На основании рассмотрения основных этапов рекультивации, автор излагает свое видение в повышении эффективности природоохранных мероприятий при проведении рекультивации с учетом физико-географических условий региона и особенностей участка загрязнения.

**Ключевые слова:** *окружающая природная среда, аварийный разлив нефтепродуктов, нефтезагрязненные земли, гидрозатвор, рекультивация*

**DOI:** 10.31857/S0869780922010118

### ВВЕДЕНИЕ

Сибирский нефтегазоносный бассейн – крупнейший нефтегазоносный бассейн мира, расположенный в пределах Западно-Сибирской равнины, на территории которого добывается до 70% российской нефти. При этом нефтяная промышленность России играет значительную роль в социально-экономическом развитии страны и является важнейшим субъектом мирового рынка нефти и газа. Результаты ее деятельности являются основной базой для поддержания курса национальной валюты. Но, несмотря на положительное влияние нефтегазового комплекса на развитие и благосостояние страны, существуют отрицательные стороны его деятельности. В первую очередь они проявляются в негативном воздействии на окружающую природную среду. В настоящее время предпринимается много усилий по его снижению, но остаются слабые места при освоении месторождений, связанные с возникновением аварийных ситуаций на нефтепроводах и выбросом

нефтепродуктов в окружающую природную среду<sup>1,2</sup>. Усугубляются последствия негативного воздействия на окружающую среду климатическими условиями в виде короткого лета, затяжными весной и осенью, в отдельные годы весной, плавно переходящей в осень, и долгой холодной снежной зимой. Кроме этого, основной особенностью территории Среднего Приобья является высокая заболоченность, и при этом во время весеннего половодья территория сильно подтопляется. В этот период движение возможно только по дорогам, построенным на насыпях.

---

<sup>1</sup> ГОСТ 17.5.3.04-83 “Охрана природы. Земли. Общие требования к рекультивации земель”. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003393>

<sup>2</sup> РД 39-00147105-006-97 “Инструкция по рекультивации земель, нарушенных и загрязненных при аварийном и капитальном ремонте нефтепроводов”. Утв. 6.02.1997. <https://files.stroyinf.ru/Data1/9/9913>

## МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отрицательное воздействие на природную среду происходит как при обустройстве месторождений, так при их эксплуатации. Природоохранные мероприятия, разрабатываемые на стадии проектирования, учитывают технологию разработки месторождения, физико-географические особенности территории и опыт освоения близких по природным условиям нефтегазовых месторождений.

К мероприятиям по снижению воздействия на окружающую природную среду относятся: охрана атмосферного воздуха, охрана поверхностных и подземных вод, рациональное использование водных ресурсов, охрана земель и недр, охрана лесов, растительного и животного мира, утилизация и снижение объемов образования отходов производства и потребления, применение современных природоохранных и ресурсосберегающих технологий.

Для контроля изменения состояния окружающей природной среды при проектировании разрабатывается программа производственного экологического мониторинга как на период строительства, так и на период эксплуатации месторождения. Программа мониторинга предусматривает и возможное возникновение аварийных ситуаций, классифицируя их по уровню негативного воздействия на окружающую среду [2].

Однако, если, опираясь на опыт и статистику, есть возможность закладывать природоохранные мероприятия в *проекты освоения* месторождений, то на этапе их эксплуатации невозможно предвидеть возникновение аварийных ситуаций. Практика показывает, что программы мониторинга, разработанной на стадии проекта, недостаточно для осуществления природоохранных мероприятий, так как невозможно в ряде случаев заочно оценить особенности аварии, ее масштаб и уровень воздействия на природную среду. К таким авариям относятся аварии, связанные с разливом нефтепродуктов на склонах и водных объектах, так как в этих случаях нефть может мигрировать на значительные расстояния. Самыми сложными являются аварии, происшедшие на переходах трубопроводов через реки и болота [3, 5]. Зачастую при возникновении аварийной ситуации нефтесодержащие продукты попадают на почву, в реки и водоемы, что приводит к загрязнению среды обитания животного и растительного мира [4]. Зона негативного воздействия в этом случае значительно шире участка загрязнения, и возникает не только сложность восстановления работы трубопровода, но и большие проблемы в устранении последствий разлива нефти.

На рис. 1 представлены фотографии последствий аварийных ситуаций, приведших к загряз-

нению верхового болота, лесного массива с образованием сухостоя и озера. Примером загрязнения реки и ее поймы могут служить фотографии, приведенные на рис. 2.

В зависимости от масштаба аварии, физико-географических условий, времени года, распространения излившихся нефтепродуктов, их попадания в водные объекты применяются различные технологии ликвидации их последствий.

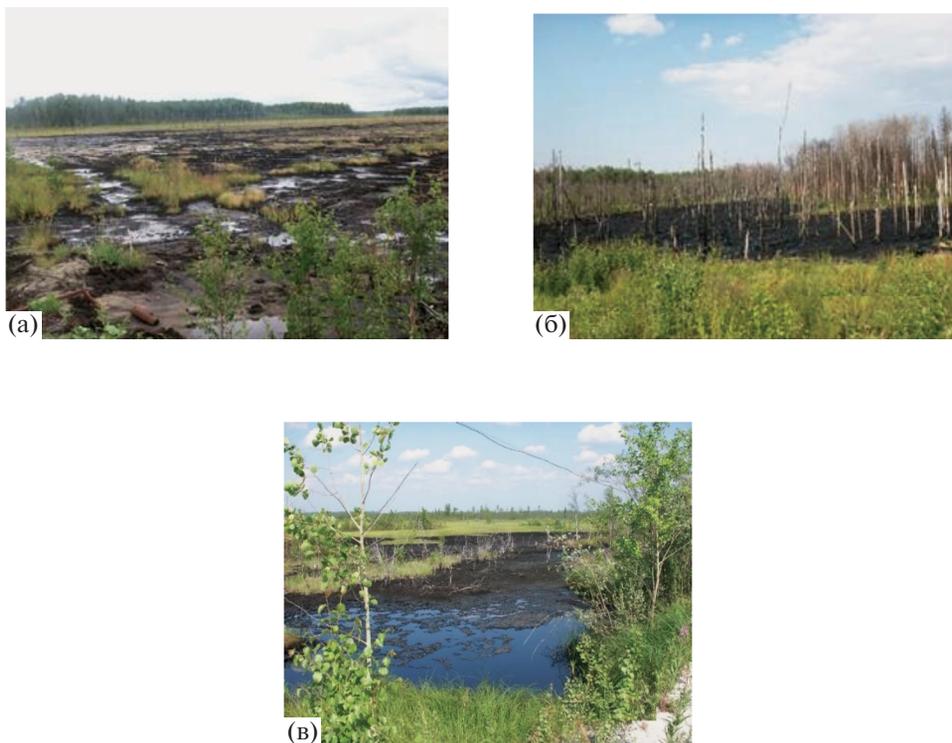
Устранение аварийной ситуации заключается не только в возобновлении работы нефтепромыслового оборудования, но и в восстановлении условий окружающей природной среды, существовавших до аварии. В первую очередь проводятся работы по локализации разлива нефтепродуктов, их распространения по рельефу или водной поверхности озера, реки, болота. Согласно действующих нормативов [1], время локализации разлива нефти и нефтепродуктов не должно превышать 4 ч на воде и 6 ч на грунте.

Одновременно с восстановлением нефтепромыслового оборудования производится аварийный сбор локализованной нефтесодержащей воды. На рис. 3 приведены фото амбара и карьера, построенных в авральном режиме для аварийного сбора нефтесодержащей жидкости, образовавшейся при попадании нефти в природную среду.

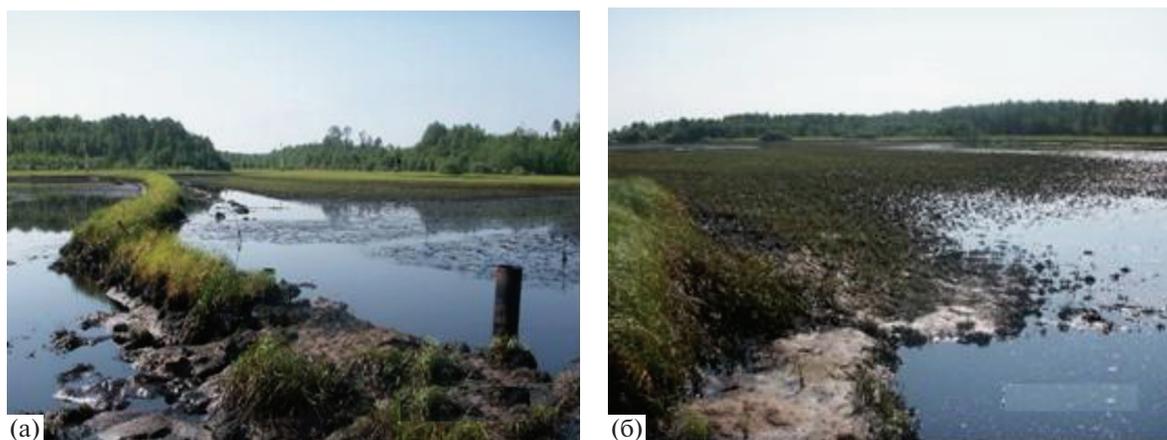
После ремонта трубопровода и аварийного сбора излившихся нефтепродуктов проводятся полевые геодезические работы по определению площади загрязнения, глубины проникновения нефтепродуктов в грунты, дается характеристика растительности, подвергшейся загрязнению и т.д. На основании полевых работ разрабатывается проект рекультивации нефтезагрязненного участка<sup>3</sup>.

Перед недропользователем встает вопрос: что делать с остатками нефтепродуктов и загрязненным грунтом? В данной ситуации рассматриваются два возможных варианта: собрать оставшиеся нефтепродукты и загрязненный грунт и транспортировать их на полигон, если он находится на допустимом расстоянии, или складировать в непосредственной близости, предварительно подготовив для этого соответствующую обвалованную площадку. При устройстве площадки исходят из понимания, что защитные дамбы из грунта можно применять только в течение непродолжительного периода времени в виду того, что будет происходить фильтрация нефти как через дамбу, так и основание площадки. В последнее время, в виду ужесточения требований к охране природы при нефтедобыче, недропользователи стали применять дополнительные природоохранные мероприятия. Примером может служить гидроизоляция

<sup>3</sup> Типовой проект рекультивации нефтезагрязненных земель ОАО «Юганскнефтегаз» 2018 г.



**Рис. 1.** Загрязнение нефтепродуктами верхового болота (а), лесного массива (б) и небольшого озера (в) при аварийном разливе нефти (фото из личного архива автора).



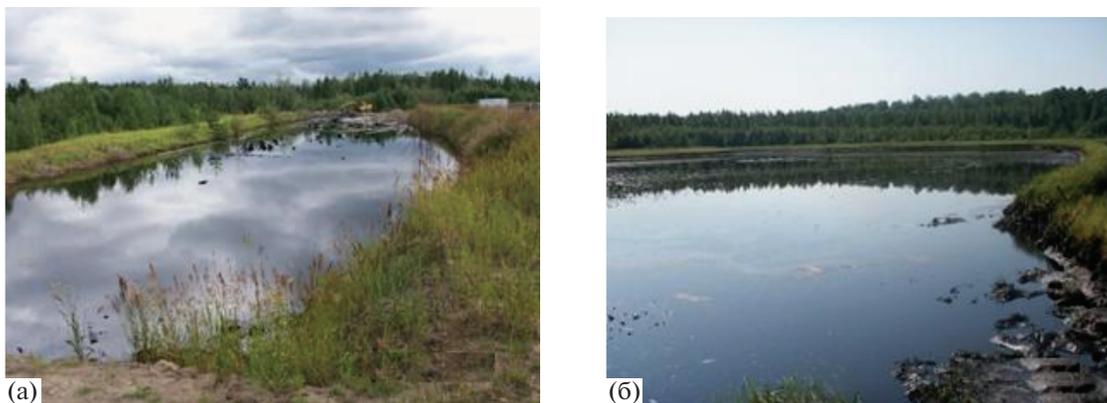
**Рис. 2.** Загрязнение нефтепродуктами акватории реки (а) и ее поймы (б) (фото из личного архива автора).

ция амбара, предназначенного для сбора аварийно собранной нефтесодержащей жидкости (рис. 4).

В тех случаях, когда эти работы выполняют со значительным опозданием, глубина загрязнения в результате фильтрации нефти существенно возрастает, что вызывает увеличение объема загрязненного грунта, усложнение технологии и стоимости его дальнейшей переработки [6]. Наибольшие трудности возникают при загрязнении грунтовых массивов с высоким уровнем грунто-

вых вод. Такие грунты (как правило, на заболоченных участках) обладают низкой несущей способностью и оказываются непроходимыми для землеройной техники.

В дальнейшем для регенерации грунтов и предохранения или очистки грунтовых вод целесообразно применять способ промывки, заключающийся в закладке отсасывающих скважин в пределах контура загрязнения (амбара, котлована или траншеи) и “питающих” за пределами участ-



**Рис 3.** Амбар (а) и искусственно созданный карьер (б) для хранения аварийно собранной нефтесодержащей жидкости (фото из личного архива автора).

ка. Отсасывающие скважины откачивают загрязненную воду в какую-либо емкость, а питающие подают чистую воду, в результате чего происходят промывка грунта и очищение грунтовых вод.

Для сбора нефтесодержащих продуктов с поверхности воды следует построить два амбара или два котлована, соединив их через гидрозатвор. Собранная жидкость подается в один из них, и при ее переливе во второй на гидрозатворе будет происходить отделение чистой воды от нефтесодержащей. Схема сбора нефти, приведенная на рис. 5, очень проста и эффективна как на болотных участках, так и на суходолах и при этом экономически целесообразна. Собранная нефтесодержащая жидкость поступает в амбар, сконцентрированная на поверхности нефть откачивается и направляется в технологическую схему сбора нефти, очищенная вода возвращается в природную среду.

После восстановления работы нефтепромыслового оборудования и сбора разлитых нефтепро-



**Рис 4.** Гидроизоляция амбара, предназначенного для сбора нефтесодержащей жидкости (фото взято из открытых источников).

дуктов (все что можно было собрать сразу же после случившегося разлива) проводится полевое обследование загрязненного участка, оценка масштабов и степени загрязнения. На основании полученных результатов разрабатывается проект рекультивации данного участка. Обобщенная блок-схема основных этапов устранения аварийного разлива нефтепродуктов приведена на рис. 6.

#### *Этапы рекультивации и способы очистки нефтезагрязненных участков*

Аварийные ситуации, приведшие к разливу нефтепродуктов и их попаданию на рельеф и водные объекты, требуют проведения рекультивации и восстановления продуктивности природной среды. Рекультивация нефтезагрязненных земель проводится по следующему алгоритму (этапам). Выделяют следующие этапы рекультивации:

- *подготовительный* связан с разработкой проекта рекультивации на основе инженерных изысканий и соответствующий требованиям природоохранного законодательства;

- *технический*, связан с ликвидацией последствий аварийной ситуации: сбором и утилизацией нефтепродуктов, восстановлением и функционированием нарушенной геосистемы;

- *биологический* – завершающая часть проекта рекультивации, которая включает биологическую очистку почв, направленную на восстановление процессов почвообразования и завершение формирования ландшафта озеленения.

Особо негативное воздействие на окружающую природную среду проявляется при загрязнении водных объектов. Локализация, сбор и удаление нефти с водной поверхности на практике сложный и трудоемкий процесс в особенности при попадании в ручьи или реки.

Для локализации распространения нефти и нефтепродуктов по водной поверхности рек и

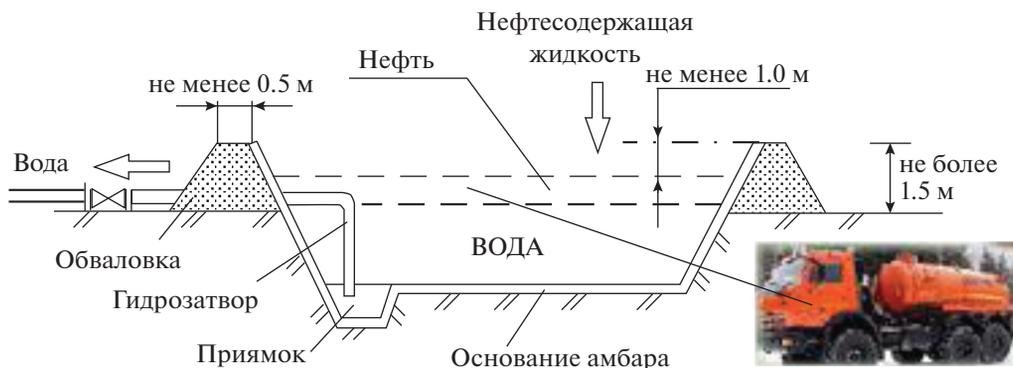


Рис. 5. Схема искусственного сооружения для сбора разлитой нефти<sup>3</sup>.



Рис. 6. Блок-схема проводимых природоохранных мероприятий при аварийном разливе нефтепродуктов<sup>3</sup>.

озер применяют боновые заграждения. Если поверхность озера и ширина реки значительна, то сбор и удаление нефти с поверхности воды осуществляют нефтесборщиками, а с небольших водных поверхностей сбор производят скиммерами (сепараторами) различной конструкции.

Однако сбор нефтесодержащей жидкости с водной поверхности реки осложняется быстрой ее миграцией с водным потоком. Строительство дамбы (см. рис. 2) и сифона на ней (см. рис. 5) задержит распространение нефти по реке, но дамба

должна быть более надежной, чем приведена на фото. Если рекультивацию провести несвоевременно и не уложиться в первый летне-осенний период, то она может быть разрушена осенним дождевым паводком или наверняка весенним, когда уровень воды может подняться на несколько метров. Выходом из данной ситуации может стать создание обводного канала, начало которого должно быть выше аварийного участка. Но на практике к такому решению прибегают только после разрушения дамбы, что приводит к более

сложным последствиям и необоснованным затратам.

Технология сбора нефти с поверхности воды абсорбирующими материалами довольно проста. Абсорбирующий материал разбрасывают в сыпучем виде. Он впитывает нефть и образует “густое” нефтяное пятно на поверхности воды. В качестве абсорбентов применяют пенополиуретан, торф, торфяной мох, опилки, солому и другие вещества, обладающие избирательной абсорбирующей способностью к нефти и нефтепродуктам.

Особые трудности возникают при очистке водоемов с малыми глубинами, особенно на болотах [5]. В этих случаях пятно нефти обычно обвалывают и стараются всеми мерами не допустить его дальнейшего распространения. Применяют все возможные способы сбора, вплоть до ручных с применением ограниченного числа видов техники, специально предназначенных для работ на болотах. Иногда пятно нефти можно отвести на место удобное для сбора, прорыв траншею или котлован. Сбор нефтепродуктов с поверхности болота усложняется тем, что его глубина может быть неоднородной. На практике такая ситуация нередко приводит к неполному сбору разлившихся нефтепродуктов и, как следствие, к образованию долговременного источника загрязнения.

Метод выжигания нефти (“быстрое окисление”) не только опасен в пожарном отношении, но часто невозможен из-за позднего обнаружения пятна, когда нефть уже смешалась с водой. Кроме того, при горении открытых нефтепродуктов происходит загрязнение атмосферы и возможно возникновение пожарной ситуации.

Очень прогрессивным является способ ликвидации загрязнений с помощью бактериальных препаратов, пригодный для очистки как водных поверхностей, так и почвы. Однако, в условиях Западной Сибири с коротким летним периодом применение бактериальных препаратов малоэффективно.

При возникновении аварийной ситуации на нефтесборных сетях или при отказе магистрального нефтепровода, пролегающего по суходолам, происходит загрязнение почвы и произрастающей на ней растительности. В этом случае стараются разлившуюся нефть отвести в естественные понижения местности, защитные амбары, траншеи или оконтуривают земляными дамбами. Эту процедуру выполняют параллельно с основными работами по ликвидации аварии. В настоящее время основным способом восстановления таких грунтов является срезка загрязненного нефтью слоя грунта и замена его привозным.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализировав технологии устранения аварийных разливов нефтесодержащих продуктов, приводящих к загрязнению природной среды, как на этапе возникновения аварии, так и на этапе проведения рекультивации, можно сделать вывод, что они еще далеки от совершенства. Основная проблема при этом заключается в том, что существующие технологии не в полном объеме учитывают, как природные (физико-географические) условия региона, так и геолого-геоморфологические и ландшафтные особенности непосредственно загрязненного участка. Загрязнения, затронувшие водные акватории/потоки, болота или суходолы, нельзя оценивать одинаково. Очевидно, что подход к выбору способов и приемов очистки нефтезагрязненных участков в каждом конкретном случае должен быть индивидуален. Особенно это актуально в сложных природных условиях Среднего Приобья.

Подразумевая под рекультивацией загрязненных нефтью земель снижение ее содержания в почве, грунтах и воде до безопасных концентраций (как минимум) или восстановление первоначального плодородия ранее нарушенных земель (как максимум), следует четко понимать, что устранение аварийной ситуации и аварийный сбор нефти не являются рекультивацией, а лишь ей предшествуют.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голованов А.И., Зимин Ф.М., Сметанин В.И. Рекультивация нарушенных земель / Под ред. А.И. Голованова. М.: КолосС, 2009. 325 с.
2. Григорьева И.Ю. Нефтяное загрязнение грунтов: инженерно-геологический и эколого-геологический аспекты. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2010. 198 с.
3. Григорьева И.Ю., Баранов Д.Ю., Абызова А.М. Особенности рекультивации нефтезагрязненных территорий в условиях Западной Сибири // Инженерные изыскания. 2015. № 13. С. 48–57.
4. Григорьева И.Ю., Шестакова А.Н. Фитотоксичность нефтезагрязненных грунтов // Инженерная геология. 2009. № 1. С. 30–33.
5. Капелькина Л.П., Малышкина Л.А. Рекультивация нарушенных земель на болотах при разработке нефтяных месторождений // Нефтяное хозяйство. 2015. № 9. С. 134–136.
6. Саромотин А.В. Исследование эффективности методов рекультивации // Материалы окружного совещания “Создание комплексной системы предупреждения и ликвидации нефтяных загрязнений и механизмы ее финансирования на территории Ханты-Мансийского автономного округа. 13 марта 1997 г.”.

# IMPROVEMENT OF THE ENVIRONMENTAL PROTECTION MEASURES DURING THE OPERATION OF OIL AND GAS FIELDS

N. S. Rogova<sup>a,#</sup>

<sup>a</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering,  
Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337 Russia

<sup>#</sup>e-mail: mos-007@yandex.ru

An attempt is made to reveal the main reasons for the inefficiency of environmental protection measures to eliminate the consequences of environmental pollution as a result of accidental oil spills during the operation of oil and gas fields in the Middle Ob region. In recent years, the growing reliability of oilfield equipment has resulted in the trend to reduced formation of new oil-contaminated sites and the higher pace of restoration of old previously uncultivated sites. However, this trend does not reflect the true state-of-art, since the application of standard reclamation technologies does not fully take into account the characteristics of a particular site, as a result of which the undertaken nature-protection measures are ineffective. This is manifested in a longer time needed for natural environment restoration, and as a rule, it leads to secondary contamination of the adjacent territory. The main stages of eliminating the consequences of accidental oil spills and their ingress on dry valleys and water bodies are discussed. Proceeding from the main reclamation stages, the author presents his viewpoint on improving the effectiveness of environmental measures during reclamation, taking into account the physical and geographical conditions of the region and the characteristics of the pollution site.

**Keywords:** environment, emergency spill of petroleum products, oil-contaminated lands, hydraulic lock, reclamation

## REFERENCES

1. Golovanov, A.I., Zimin, F.M., Smetanin, V.I. *Rekul'tivatsiya narushennykh zemel'* [Reclamation of disturbed lands]. A.I. Golovanov, Ed., Moscow, KolosS Publ., 2009, 325 p. (in Russian)
2. Grigorieva, I.Yu. *Neftyanoe zagryaznenie gruntov: inzhenerno-geologicheskii i ekologo-geologicheskii aspekt* [Oil pollution of soils: engineering-geological and ecological-geological aspects]. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2010, 198 p. (in Russian)
3. Grigorieva, I.Yu., Baranov, D.Yu., Abyzova, A.M. *Osobennosti rekul'tivatsii neftezagryaznennykh territorii v usloviyakh Zapadnoi Sibiri* [Features of remediation of oil-contaminated areas in Western Siberia]. *Inzhenernye izyskaniya*, 2015, no. 13, pp. 48–57. (in Russian)
4. Grigorieva, I.Yu., Shestakova, A.N. *Fitotoksichnost' neftezagryaznennykh gruntov* [Phytotoxicity of oil-contaminated soils]. *Inzhenernaya geologiya*, 2009, no. 1, pp. 30–33. (in Russian)
5. Kapel'kina, L.P., Malyshkina L.A. *Rekul'tivatsiya narushennykh zemel' na bolotakh pri razrabotke neftyanykh mestorozhdenii* [Reclamation of disturbed lands in swamps during the development of oil fields]. *Neftyanoe khozyastvo*, 2015, no. 9, pp. 134–136. (in Russian)
6. Saromotin, A.V. *Issledovanie effektivnosti metodov rekul'tivatsii* [Study of the effectiveness of remediation techniques]. *Materialy okruzhnogo soveshchaniya "Sozdanie kompleksnoi sistemy preduprezhdeniya i likvidatsii neftyanykh zagryaznenii i mekhanizmy ee finansirovaniya na territorii Khanty-Mansiiskogo avtonomnogo okruga. 13 marta 1997 g.* [Proceedings of the regional workshop. Arrangement of the combined system for prevention and elimination of warning system of oil contamination and its financing mechanisms in Khanty-Mansy autonomous okrug]. Khanty-Mansiysk, 1997". (in Russian)

---

---

**ЗАГРЯЗНЕНИЕ  
ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ**

---

---

УДК 504.054

**МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ  
СОЕДИНЕНИЙ РТУТИ В РЕЧНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ РОССИИ  
ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА**© 2022 г. О. С. Решетняк<sup>1,2,\*</sup><sup>1</sup> ФГБУ “Гидрохимический институт” Росгидромета, пр. Стачки, 198, Ростов-на-Дону, 344090 Россия<sup>2</sup> Южный федеральный университет, Институт наук о Земле, ул. Зорге, 40, Ростов-на-Дону, 344090 Россия

\*E-mail: olgare1@mail.ru

Поступила в редакцию 15.01.2022 г.

После доработки 19.01.2022 г.

Принята к публикации 21.01.2022 г.

В статье рассмотрены проблема глобального загрязнения ртутью окружающей среды, источники поступления, формы нахождения и особенности миграции ртути в поверхностных водах. Ртуть и ее соединения входят в список приоритетных загрязняющих биосферу веществ. За счет глобальных миграционных процессов соединения ртути обнаруживаются в определенных количествах практически во всех средах и в незагрязненных (фоновых) природных экосистемах различных регионов России и во многих странах мира. Представлены данные о содержании ртути в речных водах различных регионов России по данным литературных источников и данным регулярного мониторинга Росгидромета. Выявлена высокая неоднородность содержания соединений ртути в речных водах различных природных зон и высотных поясов России. Значения концентраций колеблются от значений ниже предела обнаружения метода до значений, превышающих ПДК в десятки и сотни раз, что соответствует экстремально высокому уровню загрязнения воды. Самые аномально высокие концентрации отмечены в единичных случаях (реки Амбарная, Норилка, Чумыш, Сусуя и Лютога). Несмотря на это, медианные значения концентраций ртути в воде рек в большинстве случаев находятся на уровне ниже предела обнаружения метода.

**Ключевые слова:** соединения ртути, речные экосистемы, природные зоны, фоновый уровень, кратность превышения ПДК, экстремально высокий уровень загрязнения воды

DOI: 10.31857/S0869780922020060

**ВВЕДЕНИЕ**

Проблема загрязнения окружающей среды ртутью общемировая. По результатам проведенной оценки (Global Mercury Assessment, 2013)<sup>1</sup> показано, “что объемы выбросов этого токсичного металла, связанных с кустарной добычей полезных ископаемых, удвоились по сравнению с 2005 годом...”. В исследованиях ЮНЕП впервые сделана оценка выбросов ртути в реки и озера. За последние 100 лет антропогенные выбросы привели к удвоению содержания ртути в верхнем 100-метровом слое океанов мира. Концентрации в более глубоких водах повысились на величины до 25%. Большая часть воздействия ртути на человека происходит при употреблении загрязненной рыбы, что делает экологию водной среды критически важным звеном для сохранения здоровья человека.

В окружающей среде ртуть и ее соединения распространены повсеместно. Среднее содержание ее в земной коре по данным различных источников от 4.5 до  $8.3 \times 10^{-6}\%$  по массе [16, 17], в донных отложениях  $4.0 \times 10^{-6}\%$  и золе растений  $25.0 \times 10^{-6}\%$  по массе соответственно [4]. Ртуть входит в состав живых организмов, содержится в каменных углях, в золе углеводородов, которые сжигаются в огромных количествах, а также в атмосфере, куда она поступает как природным путем (при извержении вулканов, дегазации Земли), так и в результате хозяйственной деятельности человека (химические технологии, металлургия, медицина, приборостроение, электропромышленность, сельское хозяйство, горное дело и т.д.) [16, 17].

В природные воды соединения ртути могут попадать с атмосферными выпадениями. “Время жизни” ртути в атмосфере примерно 10 суток и из  $1 \text{ м}^3$  дождевой воды на Землю выпадает 200 мкг ртути, за год это составляет более 100 тыс. т., что в

<sup>1</sup> Official site of UNEP – United Nations Environment Program: www.unep.org

15–20 раз больше количества данного металла, добываемого человечеством. Из водной среды растворимые формы ртути выводятся в донные отложения, накапливаясь в глинистых илах с периодом полного удаления  $n \cdot 10^4$  лет. Также ртуть прочно связывается в почвах с гуминовыми кислотами – период полувыведения составляет 250 лет [4].

Учитывая высокую токсичность ртути (особенно органической формы – метилртути), высокую сорбционную способность на взвешенных частицах, способность к биоаккумуляции по пищевой цепи, присутствие в определенных количествах практически во всех средах и в незагрязненных (фоновых) природных экосистемах [8, 9], соединения ртути включены в список приоритетных загрязняющих веществ, обязательных к определению в компонентах окружающей среды во многих странах мира.

При этом важно отметить, что ртуть обладает высокой токсичностью для живых организмов в относительно низких концентрациях. Особенно сильное негативное влияние на водные экосистемы оказывают соединения ртути, поступающие в водную среду из антропогенных источников. Это находит отражение в увеличении их содержания в водной среде, донных отложениях и биоте, что приводит к снижению продуктивности водных экосистем и потенциальной опасности и риску для здоровья человека [8, 27]. Эти обстоятельства и обуславливают актуальность исследований содержания соединений ртути в природных водах.

Работ, посвященных изучению распределения, трансформации и накоплению соединений ртути в природных водах достаточно много, но в большинстве из них рассматриваются озера и водохранилища. Существует даже “ртутная проблема”, которая в той или иной степени возникает практически в любом создаваемом искусственном водоеме. При этом экологическая опасность связана не с возможной угрозой повышения фонового содержания ртути в водной среде, а с трансформацией неорганической ртути в монометилртуть. Отмечается, что повышенное содержание ртути в рыбе типично для недавно созданных водохранилищ [19].

Гораздо меньше публикаций по содержанию и распределению ртути в речных водах. Это связано, с одной стороны, с динамичностью и непостоянством химического состава речных вод, а с другой – с трудностями корректного и надежного определения малых концентраций растворенных форм ртути в воде [13, 24, 25].

Изучение особенностей миграции ртути особенно важно в местах расположения ртутных месторождений. Так, например, выполненные в 1990-х гг. исследования распределения соединений ртути в природных средах в бассейне р. Катунь позволили выявить геохимические особен-

ности миграции соединений ртути и в изменении ее содержания в речных водах [1, 3, 11]. Данные исследования проведены комплексно с учетом гидрологических условий в бассейне, аккумуляции ртути в донных отложениях и возможности ее метилирования. Выявлена локализация ртутного загрязнения на отдельных участках бассейна, приуроченных к местам влияния ртутных месторождений [1].

В работе [3] рассмотрено содержание ртути в почве, воде, взвешенном веществе, донных отложениях и гидробионтах в водных объектах бассейна реки Катунь. Наличие повышенных концентраций ртути в воде приводит не только к ее аккумуляции в донных осадках, но и к осаждению на взвеси органического происхождения, взаимодействию с микроорганизмами, кумуляции фито-, зоопланктоном и далее по трофической пищевой цепи. Показано, что, несмотря на обогащение ртутью коренных пород региона, идентифицировать биогеохимическую кумуляцию этого элемента практически не удалось. Также был сделан вывод о низкой биодоступности соединений ртути, содержащихся в породах, почвах и воде.

Общая закономерность в сезонном распределении соединений ртути в воде заключается в минимальном содержании растворенной ртути в осенне-зимний период, в паводковые периоды повышается содержание растворенной ртути и уменьшается ее концентрация во взвешенном веществе. Установлена достаточно хорошая корреляция содержания ртути в воде с концентрацией растворенного органического вещества [1].

При изучении изменений концентрации ртути в водной среде авторами работы [11] показано, что концентрации соединений ртути в пробах, отобранных через равные интервалы за сравнительно короткий промежуток времени, могут различаться более чем в 10 раз, что подтверждает высказывание о пространственной неоднородности содержания ртути в воде и происходящей ее трансформации.

Существует реальная опасность вторичного загрязнения поверхностных вод соединениями ртути в старых золотодобывающих районах, где ранее при добыче золота проводили его извлечение способом амальгамации. Несмотря на запрет применения ртути для этих целей, проблема ртутного загрязнения компонентов окружающей среды таких территорий остается [5], что еще раз подтверждает неослабевающий интерес к изучению миграции ртути в различных средах (водная среда, донные отложения, почвы и др.).

Важным аспектом в исследовании распределения ртути в водных экосистемах является изучение ее миграции по руслу реки [11–13] и содержания в устьевых экосистемах [6, 20, 21, 23]. При изучении сезонной динамики переноса ртути в

р. Катунь Т.С. Папиной с соавторами, показано, что максимальный сток ртути приходится на весенний паводок и связан преимущественно с транспортом взвешенного вещества (67–88%) [11, 12]. Аналогично и для южных рек около 70–80% соединений ртути переносится взвешенным веществом, количество и качество которого зависит от гидрологического режима и времени года. Наибольшее содержание соединений ртути в воде приходится на холодное время года [6].

Особенности распределения, миграции и трансформации ртути в водах устьевой области р. Северная Двина рассмотрены в работах [20, 21]. Показана четкая взаимосвязь концентрации ртути в воде с физико-химическими параметрами воды (температура, рН, Eh, содержание кислорода и соленость), и выявлено, что в отличие от рек юга России в реках Севера ЕТР ртуть мигрирует преимущественно в растворенной форме (в виде фульватных комплексов).

В ряде работ рассмотрено содержание, накопление, распределение и миграция соединений ртути в природных водах отдельных рек Дальнего Востока [2, 22–24]. Авторами работы [24] установлено, что концентрации растворенных форм ртути в реках Приморья соответствуют уровню незагрязненных рек мира (0.5–2.9 нг/дм<sup>3</sup>). При этом концентрация ртути в речной взвеси колеблется от 0.05–0.06 мкг/г в малозагрязненных и крупных реках до 0.24–0.71 мкг/г в реках с интенсивной антропогенной нагрузкой. Таким образом, авторами делается вывод о возможности использования в качестве индикатора антропогенного загрязнения данных о концентрации ртути на речной взвеси.

Содержание ртути в органах и тканях рыб широко используется в качестве индикатора уровня загрязнения вод. Даже очень низкие концентрации ртути в рыбе считаются потенциально опасными для человека [7], особенно если происходит увеличение скорости накопления ртути в налиме обитающем в бассейне р. Маккензи (Канада) [26].

Ряд авторов отмечают, что в условиях климатических изменений и таяния многолетней мерзлоты существует вероятность ртутного загрязнения арктических экосистем и увеличения выноса соединений ртути в Северный ледовитый океан [28, 29].

Из всего вышесказанного становится очевидным актуальность исследований по изучению уровней содержания ртути, форм нахождения и закономерностей миграции в объектах окружающей среды.

Цель данного исследования заключалась в обобщении многолетней информации о содержании соединений ртути в речных экосистемах разных природных зон и высотных поясов России и выявлении особенностей многолетней изменчивости концентраций соединений ртути в речных

водах. Присутствие ртути и ее соединений в речных экосистемах не только снижает качество воды, но и ухудшает состояние водных экосистем и нарушает функционирование гидробионтов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки изменчивости содержания соединений ртути в водной среде речных экосистем использована многолетняя (1990–2014 гг.) режимная гидрохимическая информация Государственной наблюдательной сети (ГНС) Росгидромета<sup>2</sup>. Объекты исследования – речные экосистемы различных природных зон и высотных поясов России, воды которых имеют весьма сложный многокомпонентный химический состав, изменяющийся во времени и пространстве. Для изучения содержания и распределения соединений ртути в поверхностных водах суши выбраны более сорока речных экосистем (участков рек), функционирующих в различных природно-климатических условиях.

Выбор речных экосистем проводили из большого перечня водных объектов, включенных в ГНС. В перечень исследуемых объектов вошли реки или их участки, в водной среде которых определяется концентрация соединений ртути. Таким образом, в работе использована информация о химическом составе воды в 44 пунктах наблюдений на 39 реках, в том числе в 4 пунктах наблюдений на 4 реках в зонах тундры и лесотундры, 12 пунктах наблюдений на 12 реках в зоне тайги, 2 пунктах наблюдений на 2 реках в зоне смешанных и широколиственных лесов, 15 пунктах наблюдений на 14 реках в зоне лесостепей и 5 пунктах наблюдений на 3 реках в зонах степей, полупустынь и пустынь, также 6 пунктах наблюдений на 4 реках, расположенных в различных высотных поясах России.

Многолетняя изменчивость содержания соединений ртути показана по таким характеристикам, как диапазон колебания концентрации (минимальное и максимальное значение), медианное значение концентрации и частота превышения ПДК за исследуемый многолетний период.

Уровень загрязнения речных вод соединениями ртути оценивали по кратности превышения ПДК для водных объектов рыбохозяйственного назначения<sup>3</sup> (0.01мкг/дм<sup>3</sup> или 10 нг/дм<sup>3</sup>) и по критериям высокого (ВЗ) и экстремально высокого

<sup>2</sup> Ежегодники и обзоры. Сайт Гидрохимического института: URL: <https://gidrohim.com/> (дата обращения: 01.10.2021).

<sup>3</sup> Приказ Минсельхоза России от 13 декабря 2016 года N 552 “Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения” (с изменениями на 10 марта 2020 года). URL: <https://docs.cntd.ru/document/420389120>

уровня загрязнения (ЭВЗ) воды<sup>4</sup>. При возникновении случаев ВЗ и ЭВЗ воды учитывается класс опасности веществ. Критерии определения высокого и экстремально высокого уровней загрязненности водных объектов по содержанию соединений ртути (1-го класса опасности) соответствуют диапазону концентраций (0.03–0.05) мкг/дм<sup>3</sup> при ВЗ (3–5 ПДК) и  $\geq 0.05$  мкг/дм<sup>3</sup> при ЭВЗ воды (более 5 ПДК).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Данные по содержанию ртути в природных водах (фоновые уровни, концентрации в незагрязненных водных объектах и т.п.) значительно варьируют по данным разных исследований. Связано это не столько с различием методов определения ртути, сколько (в большей степени) с азональными геохимическими особенностями ландшафтов, разной геохимической обстановкой в различных природных зонах. По данным Дж. Мур, С. Рамамурти [8], концентрации растворенной ртути в незагрязненных пресных водах находятся на уровне 0.02–0.10 мкг/дм<sup>3</sup> (20–100 нг/дм<sup>3</sup>), что значительно выше значений, представленных в докладе международной группы специалистов ООН и ВОЗ (фоновые уровни ртути для водных систем (воды рек и озер) составляют 1–3 нг/дм<sup>3</sup> (0.001–0.003 мкг/дм<sup>3</sup>)) [18]. При этом отмечается, что могут наблюдаться значительные локальные отклонения от этих величин, особенно в прибрежных морских водах, в водах различных рек и озер, где общее содержание ртути значительно зависит от содержания взвешенного вещества.

Для поверхностных вод на территории России фоновые концентрации ртути также значительно варьируют от значений 0.02–0.40 мкг/дм<sup>3</sup> в 1980-х гг. до 0.13–1.76 мкг/дм<sup>3</sup> в поверхностных водах большинства фоновых районов в 2020 г. по данным сети комплексного фонового мониторинга<sup>5</sup>, что значительно выше норматива ПДК<sub>р/х</sub> (0.01 мкг/дм<sup>3</sup> или 10 нг/дм<sup>3</sup>).

Изменчивость концентраций соединений ртути в речных водах различных природных зон и высотных поясов России за многолетний период представлена в табл. 1 (по данным регулярного

мониторинга). Диапазон концентраций соединений ртути в воде речных экосистем существенно варьирует от значений ниже определяемого уровня до 16.8 мкг/дм<sup>3</sup> в зонах тундры и лесотундры, 1.62 мкг/дм<sup>3</sup> – зоне тайги, 0.184 мкг/дм<sup>3</sup> – зоне смешанных и широколиственных лесов, 3.15 мкг/дм<sup>3</sup> – зоне лесостепей, 0.40 мкг/дм<sup>3</sup> – зонах степей, полупустынь и пустынь.

В воде исследуемых водных объектов таежного и тундрово-таежного высотных поясов наблюдения за содержанием соединений ртути не проводились. В таежно-, тундрово-таежном и горно-таежном высотных поясах Дальневосточного региона отмечены высокие максимальные значения концентраций ртути в воде рек Сусуя (г. Южно-Сахалинск), Лютога (г. Анива) и Алей (г. Алейск), достигающие значений 1.50–5.16 мкг/дм<sup>3</sup>. Практически для всех исследуемых рек или их участков значения медианы вариационных рядов концентраций соединений ртути ниже предела обнаружения (н.о.) или ниже ПДК (см. табл. 1).

Вместе с тем, количество проб (в %), в которых концентрация ртути превышала ПДК, значительно варьирует в зависимости от широтной зональности. В зонах тундры и лесотундры этот показатель меняется от 7.8% (р. Амбарная) до 53.8% (р. Печенга), зоне тайги – от отсутствия превышения (рр. Тара, Кия и Колыма) до 54–75% (реки Нюдуай, Белая, Нева и Ижора), и зоне лесостепей – от отсутствия превышения до 31–38% (реки Обь, Барнаулка, Чумыш). Практически во всех пробах воды в устьевой части р. Волга соединения ртути присутствовали в концентрациях, превышающих ПДК, и доля этих проб составляла свыше 85%. В речных экосистемах различных высотных поясов частота превышения ПДК по содержанию в воде соединений ртути не высока и составляет в среднем порядка 7–16% (за исключением р. Алей – 34.1%).

В табл. 2 представлена зональная изменчивость содержания соединений ртути в водной среде рек России за многолетний период (1990–2014 гг.). Реки или их участки сгруппированы по пределам изменения концентрации в кратности ПДК. Можно отметить высокую неоднородность в содержании соединений ртути в речных водах. Аномально высокие концентрации отмечены в единичных речных экосистемах в зонах тундры и лесотундры в реках Амбарная (до 1680 ПДК), Норилка (до 1260 ПДК); лесостепей в р. Чумыш (до 315 ПДК) и в таежном и горно-таежном высотных поясах в реках Сусуя (до 216 ПДК) и Лютога (до 516 ПДК). При этом существенно, что частота встречаемости высоких и аномально высоких концентраций соединений ртути в воде небольшая.

Оценить уровень загрязнения речных вод данным экотоксикантом можно с использованием

<sup>4</sup> РД 52.24.643-2002. Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям. СПб.: Гидрометеоздат, 2003. 55 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200039667>

<sup>5</sup> О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2021. 864. URL: [https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye\\_doklady/gosudarstvennyy\\_doklad\\_o\\_sostoyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_mineral\\_no\\_syrevykh\\_resursov\\_2020/](https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineral_no_syrevykh_resursov_2020/)

**Таблица 1.** Содержание соединений ртути в речных водах различных природных зон и высотных поясов России за многолетний период 1990–2014 гг. (составлено автором)

Река – пункт наблюдений	N	Концентрация, мкг/дм <sup>3</sup>		Частота превышения ПДК, %
		диапазон	медиана	
1	2	3	4	5
Зона тундры и лесотундры				
Печенга – п. Корзуново	39	н.о.*–0.09	0.01	53.8
Щучья – г. Норильск	33	н.о.–6.30	н.о.	12.1
Амбарная – устье	51	н.о.–16.8	н.о.	7.8
Норилка – устье	52	н.о.–12.6	н.о.	9.6
Зона тайги				
Роста – г. Мурманск	107	н.о.–0.27	н.о.	42.1
Нюдауй – г. Мончегорск	180	н.о.–0.50	0.014	54.4
Белая – г. Апатиты	119	н.о.–0.25	0.022	56.3
Нева – г. Санкт-Петербург	18	н.о.–1.05	0.195	75.0
Ижора – г. Санкт-Петербург	18	н.о.–0.90	0.300	75.0
Обь – с. Александровское	75	н.о.–0.06	н.о.	14.7
Тартас – с. Северное	45	н.о.–0.06	н.о.	31.1
Тара – с. Кыштовка	26	все н.о.	н.о.	0
Иня – с. Кусмень	135	н.о.–0.06	н.о.	9.6
Кия – г. Мариинск	119	все н.о.	н.о.	0
Томь – г. Томск	85	н.о.–1.62	н.о.	34.1
Колыма – п. Усть-Среднекан	147	все н.о.	н.о.	0
Зона смешанных и широколиственных лесов				
Неман – г. Советск	53	н.о.–0.087	0.007	35.8
Преголя – г. Калининград	53	н.о.–0.184	0.011	52.8
Зона лесостепей				
Дон – г. Донской	47	все н.о.	н.о.	0
Красивая Меча – г. Ефремов	49	все н.о.	н.о.	0
Упа – г. Тула, ниже города	55	все н.о.	н.о.	0
Сок – с. Красный Яр	55	все н.о.	н.о.	0
Самара – г. Самара	260	н.о.–1.56	н.о.	3.8
Большой Кинель – пгт. Тимашево	33	н.о.–0.52	н.о.	3.0
Белая – г. Уфа	121	н.о.–0.70	н.о.	6.6
Инзер – д. Азово	80	все н.о.	н.о.	0
Быстрый Танып – д.Алтаево	79	все н.о.	н.о.	0
Обь – г. Барнаул	106	н.о.–1.50	н.о.	32.1
Обь – г. Новосибирск	105	н.о.–0.06	н.о.	12.4
Барнаулка – г. Барнаул	89	н.о.–1.50	н.о.	38.2
Омь – г. Куйбышев	106	н.о.–0.09	н.о.	17.0
Чумыш – г. Заринск	71	н.о.–3.15	н.о.	31.0
Каргат – с. Здвинск	38	н.о.–0.03	н.о.	13.2
Зона степей				
Чапаевка – г. Чапаевск	261	н.о.–0.32	н.о.	5.0
Омь – г. Омск	142	н.о.–0.09	н.о.	2.1

Таблица 1. Окончание

Река – пункт наблюдений	N	Концентрация, мкг/дм <sup>3</sup>		Частота превышения ПДК, %
		диапазон	медиана	
1	2	3	4	5
Зона полупустынь и пустынь				
Волга – с. Цаган-Аман	14	н.о.–0.08	0.04	92.9
Волга – г. Астрахань, выше города	159	н.о.–0.40	0.04	87.4
Волга – г. Астрахань, ниже города	218	н.о.–0.08	0.04	85.3
Зона тайги и таежный, горно-таежный пояса				
Сусуя – г. Южно-Сахалинск	69	н.о.–2.16	н.о.	11.6
Лютога – г. Анива	68	н.о.–5.16	н.о.	16.2
Амур – г. Благовещенск	300	н.о.–0.06	н.о.	10.0
Амур – г. Хабаровск	121	н.о.–0.25	н.о.	7.4
Амур – г. Амурск	128	н.о.–0.22	н.о.	2.3
Алей – г. Алейск	82	н.о.–1.50	н.о.	34.1

Примечания: Серым цветом выделены случаи, когда медианные концентрации превышают ПДКр/х. N – количество проб (количество измерений); \* н.о. – концентрация ниже предела обнаружения.

Таблица 2. Зональная изменчивость содержания соединений ртути в речных водах России за многолетний период (1990–2014 гг.)

Природная зона или высотный пояс	Обобщенные пределы изменения концентрации (в ПДК)	Реки или их участки
Зоны тундры и лесотундры	0–9.0	Печенга
	0–1680	Норилка, Амбарная, Щучья
Зона тайги	0–6.0	Обь, Тартас, Тара, Иня, Кия, Колыма
	0–50	Роста, Ньюдауй, Белая
	0–105	Нева, Ижора, Томь
Зона смешанных и широколиственных лесов	0–18.4	Преголя, Неман
Зона лесостепей	0–9.0	Дон, Красивая Меча, Упа, Сок, Инзер, Быстрый Танып, Обь (г. Новосибирск), Каргат
	0–150	Самара, Большой Кинель, Белая, Обь (г. Барнаул), Барнаулка
	0–315	Чумыш
Зона степей, полупустынь и полупустынь	0–9.0	Омь, Волга (с. Цаган-Аман, ниже г. Астрахань)
	0–40	Чапаевка, Волга (выше г. Астрахань)
Таежный и тундрово-таежный пояс	0–25	Амур
	0–216	Алей, Сусуя
	0–516	Лютога

критериев ВЗ и ЭВЗ. По соединениям ртути можно отметить, что все максимальные значения концентраций (кроме н.о. – ниже предела обнаружения) соответствуют уровню ЭВЗ для рек всех природных зон и высотных поясов. Уровень высокого загрязнения воды соединениями ртути до-

стигался по медианным значениям в пунктах наблюдения на р. Волга.

При сравнении представленных в таблицах данных с типичными фоновыми уровнями ртути в природных водах превышения наблюдаются только по максимальным значениям concentra-

ций (значениям, имеющим низкую частоту встречаемости в рядах данных и не характерным для экосистем).

В тех случаях, когда имеет место высокая частота встречаемости высоких и аномально высоких концентраций особо опасных токсикантов (в том числе соединений ртути), обуславливающая возникновение случаев ВЗ и ЭВЗ воды, наблюдается ухудшение экологического состояния речных экосистем за счет усиления процессов экологического регресса сообществ водных организмов или гибель биоты за счет токсического эффекта [10]. При этом формируется экологический риск как вероятность ухудшения состояния водной экосистемы и перехода ее в неустойчивое состояние антропогенного экологического или метаболического регресса [14]. В современных условиях многофакторного антропогенного воздействия и нестационарных климатических изменений существует опасность “ртутного загрязнения” речных экосистем. И, несмотря на то, что уровень загрязненности речных вод соединениями ртути только эпизодически достигает экстремально высокого уровня загрязнения воды, необходимо уделять особое внимание изучению динамики содержания ртути в речных водах для предотвращения ухудшения качества воды и деградации водных биоценозов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ литературных данных и обобщение информации многолетних наблюдений за содержанием соединений ртути в воде рек России позволили заключить следующее.

1. Проблема ртутного загрязнения различных компонентов окружающей среды является глобальной и требует комплексного решения. Ртуть и ее соединения включены в международный список приоритетных загрязняющих веществ и являются обязательным показателем в программах мониторинга состояния природных вод во многих странах мира.

2. Соединения ртути обладают высокой сорбционной способностью и высокой биоаккумуляцией по пищевой цепи. Это обуславливает присутствие ртути в определенных количествах практически во всех средах и в незагрязненных (фоновых) природных экосистемах.

3. Ртуть обладает высокой токсичностью (особенно в ее органической форме) для живых организмов в относительно низких концентрациях. Особенно сильное негативное влияние на водные экосистемы оказывают соединения ртути, поступающие из антропогенных источников. Происходит депонирование ртути в донных отложениях и биоте, что формирует определенный риск для здоровья человека.

4. Выявлена высокая неоднородность содержания соединений ртути в речных водах различных природных зон и высотных поясов России. Значения концентраций колеблются от значений ниже предела обнаружения метода до значений, превышающих ПДК в десятки и сотни раз. Такие высокие содержания ртути в воде соответствуют экстремально высокому уровню загрязнения речных экосистем. Самые аномально высокие концентрации отмечены в единичных случаях. Это характерно для речных экосистем в зонах тундры и лесотундры (реки Амбарная и Норилка), лесостепей (р. Чумыш) и таежного и горно-таежного высотных поясов (реки Сусуя и Лютога).

5. Получены новые данные о содержании одного из самых опасных экотоксикантов – ртути – в водной среде речных экосистем России, функционирующих в различных природно-климатических условиях. Уровень загрязненности речных вод соединениями ртути эпизодически достигает экстремально высокого уровня загрязнения воды, что негативно сказывается на биоценозах и экологическом состоянии экосистемы в целом. Необходимо уделять внимание дальнейшему изучению динамики содержания ртути в воде для своевременного реагирования на повышение ее концентраций особенно в условиях климатических изменений.

*Исследование проведено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-05-00144\_a).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вижин В.В., Гоголев А.З., Сагдеев Р.З., Сапрыкин А.В., Фризен Л.Ф.* Изменение концентрации ртути в водах Катуня // Водные ресурсы. 1995. Т. 22. № 1. С. 67–77.
2. *Галатова Е.А.* Накопление и распределение экотоксикантов в речной воде (на примере реки Уй) // Омский научный вестник. 2009. Т. 84. № 1. С. 19–21.
3. *Грошева Е.И.* Ртуть в природных объектах р. Катунь // География и природные ресурсы. 1992. № 2. С. 53–57.
4. *Дмитриев В.В., Фрумин Г.Т.* Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. СПб.: Наука, 2004. 294 с.
5. *Замана Л.В.* Ртуть в поверхностных водах Балей-Тасеевского золотопромышленного узла // Записки Забайкальского отделения РГО. 2012. Вып. 131. С. 83–89.
6. *Козлова С.И., Кулебакина Л.Г., Зелюкова Ю.В.* Содержание ртути в воде, взвешенном веществе и донных отложениях устьевой зоны реки Дунай // Водные ресурсы. 1985. Т. 12. № 1. С. 155–159.
7. *Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А.* Биоаккумуляция ртути в рыбах как индикатор уровня загрязнения вод // Геохимия. 2016. № 6. С. 495–504.

8. Мур Дж., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах: Контроль и оценка влияния: Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 288 с.
9. Никаноров А.М., Жулидов А.В., Покаржевский А.Л. Биомониторинг тяжелых металлов в пресноводных экосистемах. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 144 с.
10. Никаноров А.М., Брызгалов В.А., Решетняк О.С. Реки России в условиях чрезвычайных экологических ситуаций: монография. Ростов-на-Дону: "НОК", 2012. 310 с.
11. Папина Т.С., Артемьева С.С., Темерев С.В. Особенности миграции ртути в бассейне Катуни // Водные ресурсы. 1995. Т. 22. № 1. С. 60–66.
12. Папина Т.С. Транспорт и особенности распределения тяжелых металлов в ряду: вода – взвешенное вещество – донные отложения речных экосистем. Аналит. обзор / ГПНТБ СО РАН; ИВЭП СО РАН. Новосибирск, 2001. 58 с.
13. Папина Т.С. Эколого-аналитическое исследование распределения тяжелых металлов в водных экосистемах бассейна р. Обь: дис. ... док. хим. наук. Барнаул: Институт водных и экологических проблем СО РАН, 2004. 259 с.
14. Решетняк О.С. Оценка эффекта антропогенного воздействия и экологического риска в экосистеме Нижней Волги // Тр. Института биологии внутренних вод. 2018. Вып. 83 (86). С. 23–31.
15. Ровинский Ф.Я., Бурцева Л.В., Петрухин В.А., Черханов Ю.П., Чичева Т.Б. Фоновое содержание свинца, ртути, мышьяка и кадмия в природных средах (по мировым данным) // Мониторинг фонового загрязнения природных сред. Вып. 1 / Под ред. Ю.А. Израэля и Ф.Я. Ровинского. Л.: Гидрометеоздат, 1982. С.14–35.
16. Ртуть. Проблемы геохимии, экологии, аналитики. М.: ИМГРЭ, 2005. 191 с.
17. Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты: матер. Междунар. симпозиума (Москва, 7–9 сентября 2010 г.). М.: ГЕОХИ РАН, 2010. 477 с.
18. Ртуть: экологические аспекты применения. Совместное издание Программы ООН по окружающей среде, Международной организации труда и Всемирной организации здравоохранения. ВОЗ, Женева, 1992. 127 с.  
<https://apps.who.int/iris/handle/10665/137516>
19. Сухенко С.А. Ртуть в водохранилищах: новый аспект биогенного загрязнения биосферы. Аналит. обзор. Новосибирск: СО РАН, 1995. 59 с.
20. Федоров Ю.А., Овсепян А.Э. Ртуть и ее связь с физико-химическими параметрами воды (на примере рек севера ЕТР) // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2006. № 2. С. 82–89.
21. Федоров Ю.А., Овсепян А.Э., Коробов В.Б. Особенности распределения, миграции и трансформации ртути в водах устьевой области р. Северная Двина // Метеорология и гидрология. 2010. № 4. С. 85–92.
22. Шилова Т.М. Химико-экологическая оценка речных вод г. Уссурийска: тяжелые металлы: автореф. ... канд. биол. наук. Уссурийск: Уссурийский государственный педагогический институт, 2000. 24 с.
23. Шулькин В.М. Тяжелые металлы в речных и прибрежно-морских экосистемах. Дис. ... доктора географ. наук. Владивосток: Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, 2007. 298 с.
24. Шулькин В.М., Иевлев Д.И. О содержании ртути в природных водах Приморья // Вестник ДВО РАН. 2013. № 2. С. 98–105.
25. Эйрих А.Н., Третьякова Е.И., Папина Т.С. Аналитический контроль тяжелых металлов в донных отложениях речных экосистем (на примере реки Обь) // Мир науки, культуры, образования. 2009. № 5. С. 11–13.
26. Castello L., Zhulidov A.V., Gurtovaya T.Y., et al. Low and declining mercury in Arctic Russian rivers // Environmental Science and Technology. 2014. V. 48 (1). P. 747–752.
27. Gundersen C. B., Braaten H. F. V., Steindal E. H., et al. Mercury Risk Evaluation, Risk Management and Risk Reduction Measures in the Arctic (ARCRISK) (Interception Report No. REPORT SNO 7489–2020). Norwegian Institute for Water Research, 2020. 43 p.
28. Obrist D., Agnan Y., Jiskra M., et al. Tundra uptake of atmospheric elemental mercury drives Arctic mercury pollution // Nature. 2017. 547 (7662). P. 201–204.
29. Schaefer K., Elshorbany Y., Jafarov E., et al. Potential impacts of mercury released from thawing permafrost // Nature Communications. 2020. 11. P. 6.

## LONG-TERM VARIABILITY IN THE CONTENT OF MERCURY COMPOUNDS IN RIVER ECOSYSTEMS OF RUSSIA ACCORDING TO MONITORING DATA

O. S. Reshetnyak<sup>a,b,#</sup>

<sup>a</sup> Hydrochemical Institute, Roshydromet Federal Service, ul. Stachki, 198, Rostov-on-Don, 344090 Russia

<sup>b</sup> Institute of Geosciences, Southern Federal University, ul. Zorge, 40, Rostov-on-Don, 344090 Russia

<sup>#</sup>e-mail: [olgare1@mail.ru](mailto:olgare1@mail.ru)

The article considers the problem of global mercury pollution of the environment, sources, forms of occurrence and features of mercury migration. Mercury compounds are included in the list of priority substances. Due to global transport processes, mercury compounds are found in almost all media of unpolluted natural ecosystems located all over the world. The objects of research are river ecosystems of various terrestrial ecosystems and altitudinal zones of Russia. The subject of research is the content of mercury compounds in the river waters of Russia. The objective of the study is to reveal the spatial variability in the content of mercury

compounds in river ecosystems over the past years. The long-term (1990–2014) regime hydrochemical data of the Roshydromet were used in this study. The long-term variability of the mercury compounds content is shown. The variability in mercury compounds content in river waters of different regions of Russia is presented according to the reference data and data from the regular monitoring of Roshydromet. A high heterogeneity of mercury compounds content in river water has been revealed. The content of mercury compounds varies widely from the values below the detection limit to  $16.8 \mu\text{g}/\text{dm}^3$  in tundra and forest-tundra ecosystems,  $1.62 \mu\text{g}/\text{dm}^3$  in taiga ecosystems,  $0.184 \mu\text{g}/\text{dm}^3$  in mixed and hardwood forests,  $3.15 \mu\text{g}/\text{dm}^3$  in forest-steppe ecosystems and up to  $0.40 \mu\text{g}/\text{dm}^3$  in steppes, semi-deserts and deserts. The abnormally highest concentrations were noted in some places. When comparing long-term data with background levels of mercury in natural water, excesses are observed only for the anomalous values of concentrations. The median values of mercury concentrations in river water for the most part are below the detection limit. There is a danger of mercury pollution of river ecosystems due to its accumulation in ecosystems in the current circumstances of anthropogenic impact and unstable climatic changes. It is necessary to pay special attention to studying the dynamics of mercury content in river waters to prevent deterioration of water quality and the aquatic ecosystems state.

**Keywords:** mercury compounds, river ecosystems, natural areas, background level, multiplicity of exceeding MPC, extremely high level of water pollution

## REFERENCES

- Vizhin, V.V., Gogolev, A.Z., Sagdeev, R.Z., Saprykin, A.V., Frizen, L.F. *Izmenenie kontsentratsii rtuti v vodakh Katuni* [Changes in the mercury concentration in the Katun River water]. *Vodnye resursy*, 1995, vol. 22, no. 1, pp. 67–77. (in Russian)
- Galatova, E.A. *Nakoplenie i raspredelenie ekotoksikantov v rechnoi vode (na primere reki Ui)* [Accumulation and distribution of ecotoxicants in river water (by the example of the Uy River)]. *Omskii nauchnyi vestnik*, 2009, vol. 84, no. 1, pp. 19–21. (in Russian)
- Grosheva, E.I. *Rtut' v prirodnykh ob'ektakh r. Katun'* [Mercury in natural objects of the Katun River]. *Geografiya i prirodnye resursy*, 1992, no. 2, pp. 53–57. (in Russian)
- Dmitriev, V.V., Frumin, G.T. *Ekologicheskoe normirovanie i istoichivost' prirpodnykh sistem* [Environmental regulation and sustainability of natural systems]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2004, 294 p. (in Russian)
- Zamana, L.V. *Rtut' v poverkhnostnykh vodakh Balei-Taseevskogo zolotopromyshlennogo uzla* [Mercury in the surface waters of the Baley-Taseevsky gold-mining unit]. *Zapiski Zabaikal'skogo otdeleniya RGO*, 2012, issue 131, pp. 83–89. (in Russian)
- Kozlova, S.I., Kulebakina, L.G., Zelyukova, Yu.V. *Soderzhanie rtuti v vode, vzyeshennom veshchestve i donnykh otlozheniyakh ust'evoi zony reki Dunai* [The content of mercury in water, suspended matter and bottom sediments of the estuary zone of the Danube River]. *Vodnye resursy*, 1985, vol. 12, no. 1, pp. 155–159. (in Russian)
- Moiseenko, T.I., Gashkina, N.A. *Bioakkumulyatsiya rtuti v rybkakh kak indikator urovnya zargyazneniya vod* [Bioaccumulation of mercury in fish as an indicator of the water pollution level]. *Geokhimiya*, 2016, no. 6, pp. 495–504. (in Russian)
- Moore, J., Ramamurthy, S. *Tyazhelye metally v prirodnykh vodakh: kontrol' i otsenka vliyaniya* [Heavy metals in natural waters: Control and impact assessment]. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1987, 288 p. (in Russian)
- Nikanorov, A.M., Zhulidov, A.V., Pokarzhievskii, A.L. *Biomonitoring tyazhelykh metallov v presnovodnykh ekosistemakh* [Biomonitoring of heavy metals in freshwater ecosystems]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985, 144 p. (in Russian)
- Nikanorov, A.M., Bryzgalo, V.A., Reshetnyak, O.S. *Reki Rossii v usloviyakh chrezvychainykh ekologicheskikh situatsii* [Rivers of Russia in the conditions of environmental emergencies]. Rostov-on-Don, NOK Publ., 2012, 310 p. (in Russian)
- Papina, T.S., Artem'eva, S.S., Temerev, S.V. *Osobnosti migratsii rtuti v basseine Katuni* [Specifics of mercury migration in the Katun River basin]. *Vodnye resursy*, 1995, vol. 22, no. 1, pp. 60–66. (in Russian)
- Papina, T.S. *Transport i osobennosti raspredeleniya tyazhelykh metallov v ryadu: voda – vzyeshennoe veshchestvo – donnye otlozheniya rechnykh ekosistem* [Transport and distribution specifics of heavy metals in the row: water – suspended matter – bottom sediments of river ecosystems]. Novosibirsk, GPNTB SO RAN, IVEP SO RAN, 2001, 58 p. (in Russian)
- Papina, T.S. *Ekologo-analiticheskoe issledovanie raspredeleniya tyazhelykh metallov v vodnykh ekosistemakh basseina r. Ob'* [Ecological analytical study of the distribution of heavy metals in aquatic ecosystems of the Ob River basin]. Dr.Sci. (Chem.) Dissertation, Barnaul, Institute of Water and Environmental Problems SB RAS, 2004, 259 p. (in Russian)
- Reshetnyak, O.S. *Otsenka efekta antropogennogo vozdeistviya i ekologicheskogo riska v ekosisteme Nizhnei Volgi* [Assessment of the anthropogenic impact effect and environmental risk in the Lower Volga River ecosystem]. *Trudy Instituta biologii vnutrennikh vod* [Proc. of the Institute of Biology of Inland Waters]. 2018, issue 83 (86), pp. 23–31. (in Russian)
- Rovinsky F.Ya., Burtseva L.V., Petrukhin V.A., Cherkhanov Yu.P., Chicheva T.B. *Fonovoe sodержanie svitsa, rtuti, myshyakai kadmiya v pripodnykh sredakh* [Background content of lead, mercury, arsenic and cadmium in natural environments (according to world data)]. Monitoring of background pollution of natural environments. Issue 1. Yu.A. Israel and F.Ya. Rovinsky (Eds). L.: Gidrometeoizdat, 1982, pp. 14–35.

16. *Rtut'. Problemy geokhimii, ekologii, analitiki* [Mercury. Problems of geochemistry, ecology, analytics]. Moscow, IMGRE Publ., 2005, 191 p. (in Russian)
17. *Rtut' v biosfere: ekologo-geokhimicheskie aspekty* [Mercury in the biosphere: ecological and geochemical aspects]. Proc. Intern. Symposium (Moscow, Sept. 7–9, 2010). Moscow, GEOKHI RAN, 2010, 477 p. (in Russian)
18. *Rtut': ekologicheskie aspekt primeneniya* [Mercury: environmental aspects of use]. A joint publication of the United Nations Environment Programme, the International Labor Organization and the World Health Organization. WHO, Geneva, 1992. 127 p. URL: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/137516> (in Russian)
19. Sukhenko, S.A. *Rtut' v vodokhranilishchakh: novyi aspekt biogennoy zagryazneniya biosfery* [Mercury in reservoirs: a new aspect of biogenic pollution of the biosphere]. Analytic. overview. Novosibirsk, SO RAN, 1995, 59 p. (in Russian)
20. Fedorov, Yu.A., Ovsepyan, A.E. *Rtut' i ee svyaz' s fiziko-khimicheskimi parametrami vody (na primere rek severa ETR)* [Mercury and its relationship with the physico-chemical parameters of water (by the example of the rivers in the European territory of Russia)]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Seriya: estestvennyye nauki*, 2006, no. 2, pp. 82–89. (in Russian)
21. Fedorov, Yu.A., Ovsepyan, A.E., Korobov, V.B. *Osobennosti raspredeleniya, migratsii i transformatsii rtuti v vodakh ust'evoy oblasti r. Severnaya Dvina* [Features of the distribution, migration and transformation of mercury in the water of the mouth area of the Severnaya Dvina River]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2010, no. 4, pp. 85–92. (in Russian)
22. Shilova, T.M. *Khimiko-ekologicheskaya otsenka rechnykh vod g. Ussuriyska: tyazhelye metally* [Chemical and ecological assessment of river waters in Ussuriysk: heavy metals]. Extended abstract of Cand. Sci. (Biol.) diss. Ussuriysk, Ussuriysk State Pedagogical Institute, 2000, 24 p. (in Russian)
23. Shul'kin, V.M. *Tyazhelye metally v rechnykh i pribrezhno-morskikh ekosistemakh* [Heavy metals in river and coastal marine ecosystems]. Doctoral Sci. (Geogr.) dissertation. Vladivostok, Pacific Institute of Geography, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, 2007, 298 p. (in Russian)
24. Shul'kin, V.M., Ievlev, D.I. *O sodержanii rtuti v prirodnykh vodakh Primor'ya* [On the content of mercury in natural water of Primorye]. *Vestnik DVO RAN*, 2013, no. 2, pp. 98–105. (in Russian)
25. Eirikh, A.N., Tretyakova, E.I., Papina, T.S. *Analiticheskii kontrol' tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyakh rechnykh ekosistem (na primere reki Ob)* [Analytical control of heavy metals in bottom sediments of river ecosystems (on the example of the Ob river)]. *Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya*, 2009, no. 5, pp. 11–13. (in Russian)
26. Castello, L., Zhulidov, A.V., Gurtovaya, T.Y., et al. *Low and declining mercury in Arctic Russian rivers*. *Environmental Science and Technology*, 2014, vol. 48 (1), pp. 747–752.
27. Gundersen, C.B., Braaten, H.F.V., Steindal, E.H., et al. *Mercury risk evaluation, risk management and risk reduction measures in the Arctic (ARCRISK) (Inception Report No. REPORT SNO 7489-2020)*. Norwegian Institute for Water Research, 2020, p. 43.
28. Obrist, D., Agnan, Y., Jiskra, M., et al. *Tundra uptake of atmospheric elemental mercury drives Arctic mercury pollution*. *Nature*, 2017, no. 547 (7662), pp. 201–204.
29. Schaefer, K., Elshorbany, Y., Jafarov, E., et al. *Potential impacts of mercury released from thawing permafrost*. *Nature Communications*, 2020, no. 11, p. 6.

---

---

## ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

---

---

УДК 624.131.4

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ И ПРОГНОЗА ИХ ИЗМЕНЕНИЯ

© 2022 г. Ф. С. Карпенко<sup>1,\*</sup>, В. Н. Кутергин<sup>1</sup>, Е. О. Дернова<sup>1</sup>, А. А. Осокин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия*

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

Поступила в редакцию 14.01.2022 г.

После доработки 17.01.2022 г.

Принята к публикации 22.01.2022 г.

Мерзлые грунты традиционно рассматриваются как стабильные образования, изменение строения и свойств которых может происходить только при переходе из мерзлого фазового состояния в талое. Однако результаты проведенных в последнее время научных и практических исследований показывают, что эти изменения начинаются уже в мерзлом состоянии и носят латентный характер, что подтверждается современной активизацией экзогенных геологических процессов в криолитозоне под влиянием климатических изменений, происходящих в настоящее время. Постепенное повышение температуры грунтов криолитозоны приводит к изменению ее состояния и строения. Считается, что газовая составляющая не оказывает значительного влияния на свойства грунтов при условии сохранения их мерзлого фазового состояния. В статье показано, что миграция газов в мерзлых грунтах начинается уже в условиях повышенных отрицательных температур. Интенсивность этого процесса оказывает существенное влияние на динамику изменения прочностных свойств мерзлых грунтов при нарушении условий их естественного залегаания в результате температурного воздействия и действия нагрузок. Указано на необходимость разработки и практического применения новых методик определения прочностных свойств мерзлых пород с использованием прямых методов исследований, таких как трехосные и сдвиговые испытания, результаты которых должны служить основой при проектировании и строительстве новых инженерных сооружений, а также адаптации действующих конструкций в регионах распространения многолетнемерзлых пород.

**Ключевые слова:** *криолитозона, мерзлые грунты, газовые включения, газовыделение, исследование свойств мерзлых грунтов методом трехосного сжатия и одноплоскостного среза*

**DOI:** 10.31857/S0869780922020047

#### ВВЕДЕНИЕ

Мерзлые грунты занимают важное место при хозяйственном освоении геологической среды. Они широко распространены на территории России и часто являются грунтами оснований фундаментов сооружений. Все это определяет высокие требования к качеству исследований мерзлых грунтов, результаты которых должны давать не только полную объективную характеристику их свойств, но и прогноз их возможных изменений в результате действий различных факторов. В настоящее время инженерно-геологические исследования мерзлых грунтов не всегда могут дать такую оценку, и в первую очередь это касается изменения свойств мерзлых грунтов в результате температурного воздействия. Происходящее в настоящее время изменение климата, которое вызывает постепенное повышение температуры грунтов криолитозоны, приводящее к закономерному изменению ее состояния и строения, наглядно подтверждает это положение. В результате

этих явлений происходит активизация разнообразных экзогенных геологических процессов, влияющих на безопасность инженерных сооружений в криолитозоне, многие из которых могут иметь негативные, а в ряде случаев и катастрофические последствия, такие как газовые выбросы, воронки взрывов, просадки, деформации фундаментов, береговая, овражная эрозия, склоновые явления, и другие процессы. Характерной современной особенностью этих процессов является то, что их протекание и активизация происходят даже в условиях сохранения мерзлого фазового состояния грунтов, а природа их развития остается до конца не определенной.

Все эти явления требуют ответной реакции, активного вмешательства в их протекание, проведения специальных защитных мероприятий. Такое реагирование на уже произошедшие изменения состояния мерзлых грунтов не может быть эффективным, и не может предвосхитить негативные явления, которые будут протекать в мерз-

лых грунтах при дальнейшем изменении геокриологических условий.

Решить эти проблемы можно на основе изменения подхода к проектированию и строительству новых и адаптации действующих инженерных сооружений к меняющимся свойствам мерзлых грунтов в результате изменения строения криолитозоны. Этот подход должен быть основан на изучении реакции мерзлых грунтов на изменения криологических условий, позволяющим дать полный объективный прогноз изменения их свойств при разных сценариях температурных изменений.

Для проведения таких исследований требуется разработка нового специального методического подхода к инженерно-геологическому изучению мерзлых грунтов. Основные необходимые, на взгляд авторов, принципы такого подхода, связанные с проведением грунтоведческих исследований, определением строения и свойств мерзлых грунтов, изложены в настоящей работе. В основу такого подхода должен быть положен анализ действующих нормативных документов, определяющих направления и требования к изучению строения и свойств мерзлых грунтов, и новых научных и методических разработок, касающихся этих вопросов.

#### ТРЕБОВАНИЯ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ К ПРОВЕДЕНИЮ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ И ПРОЕКТИРОВАНИЮ ОСНОВАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ НА МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

Общие требования к инженерно-геологическим исследованиям мерзлых грунтов и проведению на их основе расчетам оснований и фундаментов инженерных сооружений определяются положениями основных нормативных документов – сводов правил (СП)<sup>1</sup>.

Свод правил СП 47.13330 и разработанный в развитие его положений СП 446.132580 определяют общие требования к проведению основных видов работ и комплексных исследований и требования к инженерно-геологическим изыскани-

ям для подготовки проектной документации на отдельных этапах разных видов инженерных изысканий. Специальный раздел данного документа посвящен условиям проведения инженерно-геокриологических исследований.

В целом, Свод правил СП 446.132580 устанавливает требования к проведению инженерно-геологических изысканий, которые должны давать не только комплексную характеристику инженерно-геологических условий территории изысканий, но и прогноз их возможных изменений, развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов, изменений геокриологических условий и проявлений криогенных процессов и других явлений под влиянием природных факторов и техногенных воздействий. Результаты инженерно-геологических изысканий должны обеспечивать получение необходимых и достаточных материалов для обоснования и планирования градостроительной деятельности и разработки проектных решений. Для получения характеристик свойств грунтов, отвечающих вышеперечисленным требованиям, положениями СП допускается выполнение лабораторных исследований, позволяющих решить эту задачу, виды которых тем не менее не регламентированы этим и другими нормативными документами.

Свод правил СП 22.13330 определяет общие правила разработки проектных решений, в соответствии с которыми при проектировании оснований и фундаментов должны быть предусмотрены решения, обеспечивающие надежность, долговечность и экономичность на всех стадиях строительства и эксплуатации сооружений. Важнейшим положением данного СП является то, что проектирование оснований и фундаментов проводится для всех классов грунтов по двум группам предельных состояний.

Первая группа – это несущая способность грунтов. Несущая способность грунта определяет предельное напряженное состояние, превышение которого приводит к потере устойчивости, вплоть до разрушения, фундаментов и оснований сооружений и их полной непригодности к эксплуатации. Определение несущей способности грунтов проводится расчетным путем на основе результатов определения их свойств.

Вторая группа предельных состояний – деформируемость грунтов. Деформируемость грунта определяет предельное напряженное состояние, превышение которого приводит к развитию недопустимых деформаций фундаментов и оснований сооружений, затрудняющих их нормальное функционирование (осадок, подъемов, прогибов, трещин и т.п.). Определение деформируемости грунтов также проводится расчетным путем на основе результатов определения их свойств.

<sup>1</sup> СП 446.132580.2019 Свод правил. Инженерно-геологические изыскания для строительства. М.: Стандартинформ, 2019. 78 с. СП 47.13330. 2016 Свод правил. Инженерные изыскания для строительства. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96. М.: Стандартинформ, 2017. 90 с. СП 22.13330.2016 Свод правил. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83. М.: Стандартинформ, 2016. 225 с. СП 11-105-97 Свод правил. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть IV. Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2001. 61 с. СП 25.13330.2012 Свод правил. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88. М.: Стандартинформ, 2021. 110 с.

Основными параметрами механических свойств грунтов, определяющими несущую способность оснований и их деформации, являются прочностные и деформационные характеристики грунтов (угол внутреннего трения  $\varphi$ , удельное сцепление  $C$ , предел прочности на одноосное сжатие скальных грунтов  $R_c$ , модуль деформации  $E$  и коэффициент поперечной деформации  $\nu$  грунтов, а также другие характеристики грунтов, определяемые по отдельным программам для нестандартных, в том числе, нелинейных методов расчета оснований).

Строительство и эксплуатация инженерных объектов и сооружений на территориях развития мерзлых грунтов имеет дополнительную специфику. Многолетнемерзлые грунты традиционно рассматриваются как относительно стабильные образования, сложенные в основном минеральными частицами, дополнительно сцементированными льдом при замерзании. Общепринято считать, что изменение свойств мерзлых грунтов происходит при переходе из мерзлого фазового состояния в талое. Такой подход определяет направления исследований свойств мерзлых грунтов при инженерно-геологических изысканиях — испытания проводятся в условиях сохранения естественной температуры и при оттаивании. Эти данные используются для проектных расчетов несущей способности и других свойств грунтов оснований сооружений.

В соответствии с требованиями нормативных документов СП 11-105-97 и СП 25.13330 исследования должны проводиться на основе применения одного из двух принципов: (1) в условиях сохранения естественной температуры грунтов и их мерзлого состояния и (2) в оттаянном или оттаивающем состоянии. При этом считается, что изменение свойств мерзлых грунтов происходит при переходе из мерзлого фазового состояния в талое. В интервалах температур ниже температур замерзания—оттаивания свойства мерзлых грунтов считаются практически неизменными. Это положение не всегда может описать реальное поведение мерзлых грунтов. Изменение их свойств в условиях высоких отрицательных температур носит постепенный характер при том, что в целом сами грунты остаются в мерзлом фазовом состоянии. Причем интенсивность изменения свойств грунтов зависит не только от температурного режима, но и от величины нагрузок, действующих на них.

Определение состава, строения и свойств грунтов является важной частью инженерно-геологических изысканий, и требования к проведению их лабораторных исследований содержат все нормативные документы, регламентирующие проведение инженерно-геологических изысканий и проектных расчетов, в том числе в районах

залегания многолетнемерзлых грунтов. Проведение лабораторных испытаний мерзлых грунтов регламентируются нормативами ГОСТ и включает определение их гранулометрического состава, физических, физико-химических и механических свойств. Приборно-методологическая база исследования механических свойств мерзлых грунтов имеет существенные отличия от немерзлых грунтов других классов. В соответствии с требованиями ГОСТ 12248.7-11<sup>2</sup> и СП 25.13330 для расчетов оснований и фундаментов в мерзлых и оттаивающих грунтах по обеим группам предельных состояний применяются, в первую очередь, результаты изучения отдельных их физических и теплофизических свойств. Показатели механических свойств грунтов, прочности и деформируемости определяются расчетным путем по результатам компрессионных испытаний, испытаний шариковым штампом и сдвига по поверхности смерзания с применением различных коэффициентов, учитывающих изменения температурного режима и теплофизических свойств грунтов.

В 2021 г. был введен в действие новый нормативный документ ГОСТ 59597<sup>3</sup>, регламентирующий испытания мерзлых грунтов методом трехосного сжатия. Этот норматив определяет проведение испытаний мерзлых грунтов в приборах трехосного сжатия (стабилометрах) в различных условиях температурного режима и напряженного состояния для определения показателей их прочности и деформируемости.

Метод трехосного сжатия — прямой метод определения механических свойств грунтов, один из наиболее достоверных, позволяющий получить наиболее полную и объективную характеристику их свойств. Несмотря на свои преимущества, до настоящего времени в практических исследованиях мерзлых грунтов он так и не получил широкого применения. Наиболее широко в практике инженерно-геологических исследований мерзлых грунтов применяются расчетные методы определения их механических свойств. Такие ис-

<sup>2</sup> ГОСТ 12248.7—2020 Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости мерзлых грунтов методом испытания шариковым штампом. М.: Стандартинформ, 2020. 12 с. ГОСТ 12248.8—2020 Грунты. Определение характеристик прочности мерзлых грунтов методом среза по поверхности смерзания. М.: Стандартинформ, 2020. 15 с. ГОСТ 12248.9—2020 Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости мерзлых грунтов методом одноосного сжатия. М.: Стандартинформ, 2020. 22 с. ГОСТ 12248.10—2020 Грунты. Определение характеристик деформируемости мерзлых грунтов методом компрессионного сжатия. М.: Стандартинформ, 2020. 14 с. ГОСТ 12248.11—2020 Грунты. Определение характеристик прочности оттаивающих грунтов методом среза. М.: Стандартинформ, 2020. 14 с.

<sup>3</sup> ГОСТ 59597—2021 Грунты. Метод трехосного сжатия мерзлых грунтов. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 15 с.

следования и основанные на них мониторинговые наблюдения позволяют получить достоверные данные о тепловом и теплофизическом режиме сооружений. При этом полная и объективная характеристика механических свойств грунтов оснований по результатам таких испытаний получена быть не может. Соответственно, достоверность инженерных расчетов в этом случае также снижается и, в целом, такой подход не всегда позволяет дать полную характеристику свойств мерзлых грунтов и достоверно обосновать прогноз их изменения при строительстве и эксплуатации сооружений.

Для решения возникающих вопросов, повышения достоверности и обоснованности определения механических свойств мерзлых грунтов и прогноза их изменения в меняющихся геокриологических условиях и при действии техногенных нагрузок, необходимо изменение методов исследований. Для исследования мерзлых грунтов требуется разработка новых методик лабораторных испытаний, применение которых позволит получить наиболее полную и объективную характеристику их свойств. В основу таких методик должны быть положены испытания методом трехосного сжатия. Наряду с трехосными испытаниями, исследование мерзлых грунтов может проводиться методом одноплоскостного среза, проводимого подобно трехосным испытаниям в различных температурных условиях. Методика испытаний грунтов на срез, описанная ранее [3, 4], была разработана в ИГЭ РАН и принята в качестве стандарта организации<sup>4</sup>.

### ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Основной причиной проблемных вопросов, возникающих при исследованиях мерзлых грунтов, является то, что они имеют, в целом, более сложное строение, чем трактуются положениями нормативно-методических документов. Мерзлые грунты представляют собой многокомпонентные системы, в которых кроме минерального скелета могут находиться такие составляющие, как лед, вода в жидком состоянии (незамерзшая вода), растворенные соли и газовые включения, каждая из которых оказывает специфическое влияние на свойства грунтов. Традиционно основное внимание при изучении мерзлых грунтов уделяется минеральной компоненте и воде в различных формах и агрегатном состоянии. Именно они являются основными составляющими мерзлых грунтов, в наибольшей степени определяющими

их свойства. Влияние солей на свойства мерзлых грунтов в настоящее время также достаточно полно изучено. Состав солей, форма их нахождения, количество, все эти факторы изменяют температуру замерзания—оттаивания грунтов и тем самым оказывают существенное влияние на их свойства.

Роль газовой компоненты на строение и свойства мерзлых грунтов в настоящее время изучена в наименьшей степени. Несмотря на то, что газовая составляющая практически повсеместно присутствует в составе мерзлых грунтов, считается, что она не оказывает значительного влияния на их свойства, и детальное изучение газовых включений и их влияния на строение и свойства мерзлых грунтов началось сравнительно недавно [1, 2, 5–8, 10]. Имеющиеся результаты исследований показывают, что именно наличие газовых включений в мерзлых грунтах и их миграция оказывают существенное влияние на изменение их свойств грунтов при нарушении условий естественного залегания в результате температурного воздействия и действия нагрузок при том, что в целом сам грунт остается в мерзлом агрегатном состоянии.

Представления о том, что мерзлые грунты в одинаковых температурных условиях могут обладать различными свойствами, общепризнаны. Для описания этих различий используются понятия твердомерзлый и пластично-мерзлый грунт, закрепленные в нормативных документах<sup>5</sup>, принимаемые как постоянные характеристики состава и строения грунта, которые всегда присущи ему и могут измениться только при оттаивании. В то же время, накопленные в настоящее время данные показывают, что мерзлый грунт может менять свое состояние в результате температурного воздействия, что обусловлено изменением их строения и приводит к изменению свойств. В наибольшей степени это присуще дисперсным мерзлым грунтам, содержащим в своем составе газовые включения.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для изучения описанных выше научных и практических положений авторами были проведены опытно-экспериментальные исследования прочностных свойств мерзлых грунтов методом трехосного сжатия и одноплоскостного среза в условиях изменения температурного режима и внешних нагрузок. Методика проведения исследований была подробно описана ранее [9].

Проведенные исследования не только подтверждают возможность изменения строения и свойств мерзлых газосодержащих грунтов, но и

<sup>4</sup> Стандарт организации СТО 93.020–2013/7 Лабораторные испытания дисперсных грунтов методом недренированного одноплоскостного среза с замером порового давления [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://geoenv.ru/materials/standards/sto-2013-7\\_section.doc](http://geoenv.ru/materials/standards/sto-2013-7_section.doc)

<sup>5</sup> ГОСТ 25100–2020 Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2020. 41 с.

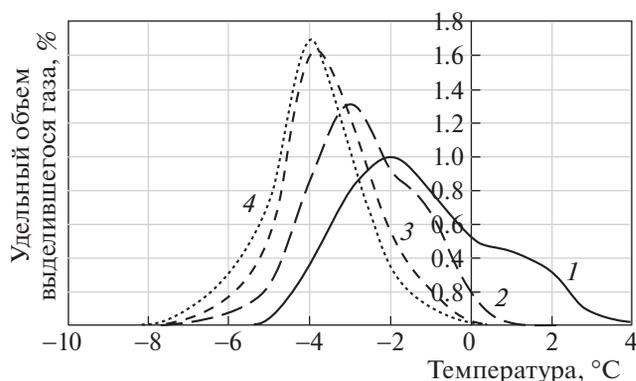
показывают закономерности этих процессов. Исследования проводились для мерзлых дисперсных грунтов, суглинков, супесей и пылеватых песков, наиболее типичных для Арктического региона, для которых характерно содержание газовых включений в количестве от долей процента до 10–15%. Полученные результаты могут быть наглядно продемонстрированы на примере мерзлых суглинков. Грунты исследовались в условиях температур и нагрузок, соответствующих изменяющимся температурным условиям криолитозоны и внешним нагрузкам, возникающим при промышленном и хозяйственном освоении региона.

Исследованные суглинки представлены тугопластичными и полутвердыми разновидностями, суммарная влажность изменяется от 19.0 до 30.3%, плотность – от 1.90 до 2.13 г/см<sup>3</sup>, число пластичности – от 10.7 до 15.5%, показатель текучести – от 0.06 до 0.33 д.е. Характерной особенностью грунтов является неполная водо-(льдо)насыщенность, коэффициент водонасыщения составляет 0.91–0.97, т.е. эти грунты содержат в своем составе газовую компоненту. Температура начала замерзания–оттаивания –1.4°C.

Повышение температуры мерзлых грунтов в области отрицательных значений вызывает выделение содержащегося в них газа. Динамика этого процесса показана на рис. 1. Процесс газовой выделению начинается при температуре грунта –5°C, при повышении температуры продолжается, достигает своего максимума при температуре –2°C, после чего его интенсивность снижается. Температура начала газовой выделению и его пиковой интенсивности зависит от напряженного состояния грунта. Температура начала выделения газа постепенно снижается при увеличении величины объемного сжимающего давления от –7°C при давлении 0.05 МПа до –8°C (при давлении 0.2 МПа). Наибольшая интенсивность газовой выделению при действии нагрузок также наступает при более низких температурах, ниже температуры замерзания–оттаивания грунта: –3°C при давлении 0.05 МПа, –4°C при давлении 0.1 и 0.2 МПа.

Выделение газов в мерзлых грунтах при изменении температуры и напряженного состояния приводит к изменению их строения. В результате газовой выделению при росте температуры под действием сжимающих нагрузок происходит увеличение плотности и степени водо-(льдо)насыщенности и снижение пористости грунтов. Изменение строения грунтов, в свою очередь, вызывает закономерное изменение их прочностных свойств, показанное на рис. 2 (на примере изменения величины угла внутреннего трения).

Изменение прочности мерзлых газосодержащих грунтов под действием температурного фактора происходит закономерно, в соответствии с характером газовой выделению в них. Снижение

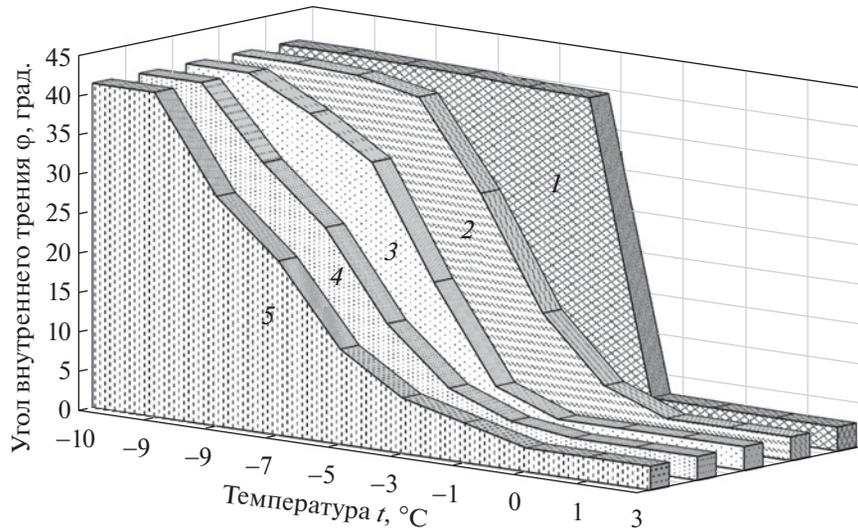


**Рис. 1.** Зависимость удельного объема выделившегося газа от температуры для суглинков при изменении напряженного состояния грунта: 1 – свободное газовыделение; 2–4 – при объемном давлении: 2 – 0.05 МПа; 3 – 0.1 МПа; 4 – 0.2 МПа.

прочностных свойств начинается и протекает при отрицательных температурах, ниже температуры оттаивания, и интенсивность этого процесса зависит от напряженного состояния грунтов при газовой выделению. При свободном газовой выделению снижение прочности начинается при температуре –5°C, и показатели прочности достигают своих минимальных значений при достижении температуры оттаивания. При газовой выделению под действием нагрузок в 0.05–0.2 МПа прочностные свойства начинают снижаться уже при температурах от –8 до –7°C, наиболее активно продолжают до температур от –5 до –4°C и при повышении температуры до –2°C достигают минимальных значений.

Приведенные данные показывают, что снижение прочности мерзлых газосодержащих грунтов происходит при температурах ниже температуры оттаивания, т.е. в условиях, при которых грунт в целом остается в мерзлом состоянии. Процесс газовой выделению, с одной стороны, служит индикатором снижения прочности грунтов, с другой стороны, интенсивность этого тренда зависит от количества газовых включений в грунтах. Последнее утверждение подтверждается данными экспериментальных исследований, результаты которых приведены в табл. 1 и показаны на рис. 3. В одинаковых температурных условиях (температура грунта –5°C) прочностные свойства одного и того же грунта зависят от содержания в них газов. Снижение прочности грунтов начинается уже при 2% содержании газовой компоненты, при его увеличении до 5% интенсивность снижения прочности усиливается и при увеличении содержания газов выше 8% протекает наиболее интенсивно.

Несомненно, такое изменение свойств грунтов обусловлено изменением их строения, происходящим в результате газовой выделению, развиваю-



**Рис. 2.** Изменение величины угла внутреннего трения суглинков при изменении температуры и напряженного состояния грунта: 1 – прогнозное по нормативным методикам по I и II принципу; 2 – реальное при свободном газовыделении; 3–5 – реальное при объемном давлении: 3 – 0.05; 4 – 0.1; 5 – 0.2 МПа.

щегося при высоких отрицательных температурах, что обусловлено изменением состояния и свойств диффузного слоя гидратных пленок глинистых частиц грунта ( $\beta$ -пленок) в этих условиях. Этот процесс был рассмотрен авторами ранее [2], он заключается в том, что при повышении отрицательной температуры, в грунтах происходит оттаивание  $\beta$ -пленок. В результате, при том, что в вода в порах грунта остается в мерзлом состоянии, между глинистыми частицами появляется прослойка воды (гидратные пленки), что оказывает непосредственное влияние на изменение прочностных свойств грунта в целом. Интенсивность этого процесса зависит от количества глинистых минеральных частиц в составе грунта.

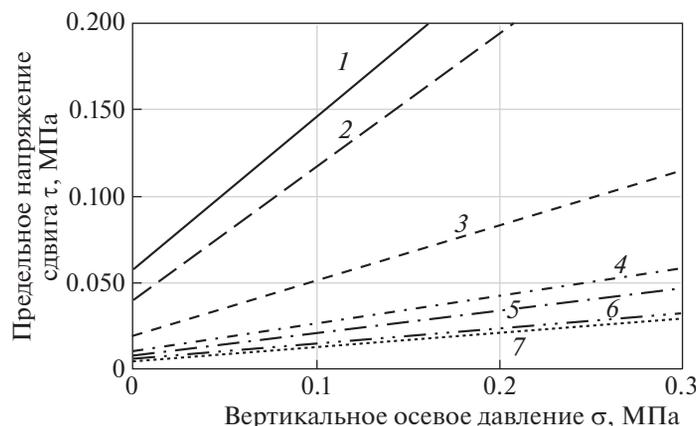
### ВЫВОДЫ

Приведенные данные показывают, что мерзлые грунты, практически повсеместно содержа-

щие газовую компоненту в своем составе, являются многокомпонентными подвижными системами, чутко реагирующими на изменения условий залегания и внешние воздействия. В результате изменения геокриологических условий меняется внутреннее строение мерзлых грунтов, что закономерно приводит к изменению их свойств. Интенсивность таких изменений усиливается при увеличении напряженного состояния грунтов, возникающего в результате возрастания техногенной нагрузки при активизации хозяйственной деятельности в арктическом регионе. Характеристика реакции мерзлых грунтов на изменение состояния криолитозоны не может быть определена при их изучении по стандартным методикам, регламентируемым действующими нормативными документами, и, следовательно, эти данные не могут быть учтены при проектировании и строительстве инженерных сооружений и объектов.

**Таблица 1.** Изменение прочностных свойств мерзлых суглинков при температуре  $-5^{\circ}\text{C}$  в зависимости от содержания в них газовой компоненты

Содержание газовой компоненты в грунте, %	Коэффициент внутреннего трения $\text{tg } \varphi$	Угол внутреннего трения $\varphi$ , град.	Сцепление $C$ , кПа
Газовая компонента отсутствует	0.88	41	58
2	0.77	38	40
5	0.32	18	19
8	0.16	9	10
10	0.13	7	8
15	0.09	5	6
20	0.08	5	5



**Рис. 3.** Изменение прочностных свойств мерзлых суглинков при температуре  $-5^{\circ}\text{C}$  в зависимости от содержания в них газовой компоненты: 1 – газовая компонента отсутствует; 2–7 – при содержании газов: 2 – 2; 3 – 5; 4 – 8; 5 – 10; 6 – 15; 7 – 20%.

Для преодоления этого, расчеты несущей способности грунтов и прогноз их изменения должны проводиться на основе результатов исследований, дающих наиболее полную и объективную характеристику свойств грунтов и обоснованный объективный прогноз их изменения. В настоящее время такими методами являются сдвиговые испытания грунтов и испытания в условиях трехосного (объемного) сжатия.

Вышеназванные исследования должны проводиться в условиях напряженно-деформированного состояния и температур, соответствующих современному естественному состоянию и их возможному изменению, которые должны определяться на основе районирования территории, типизации объектов инфраструктуры (основные типы инженерных сооружений и характеристика воздействия и величины нагрузок на грунты оснований) и прогноза изменения состояния криолитозоны. Проведение таких исследований должно в конечном итоге позволить повысить безопасность строительства и эксплуатации инженерных объектов и сооружений в криолитозоне и стать основой их адаптации к изменению ее состояния.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Богоявленский В.И.* Выбросы газа из криолитозоны полуострова Ямал // Бурение и нефть. 2015. № 7–8 (163–164). С. 8–13.
2. *Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Фролов С.И., Собин Р.В.* Влияние на свойства глинистых грунтов изменений свойств гидратных пленок при температурных воздействиях // Геоэкология. 2021. № 1. С. 69–78. <https://doi.org/10.31857/S0869780921010033>
3. *Кутергин В.Н., Кальберген Р.Г., Карпенко Ф.С., Седов В.В.* Новые технологии испытаний грунтов на сдвиг // В сб. Сергеевские чтения. Вып. 12. 2010. М.: РУДН, С. 366–372.
4. *Кутергин В.Н., Кальберген Р.Г., Карпенко Ф.С.* Методы лабораторных исследований связных грунтов: совершенствование на основе современных научных представлений // В сб. Сергеевские чтения. Вып. 18. 2016. М.: РУДН, С. 759–764.
5. *Перлова Е.В.* Особенности газосодержания многолетнемерзлых пород на примере северо-западной части п-ва Ямал: дисс. .... канд. г.-м. н. М.: МГУ, 2001. 178 с.
6. *Чувиллин Е.М., Перлова Е.В.* Формы нахождения и условия формирования газовой компоненты мерзлых пород // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 1999. № 5. С. 55–57.
7. *Чувиллин Е.М., Перлова Е.В., Дубиняк Д.В.* Экспериментальное моделирование условий существования газовых гидратов в морских отложениях п-ова Ямал // В сб. Материалы Второй конференции геокриологов России. Т. 2. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. С. 169–173.
8. *Якушев В.С.* Состав, строение и свойства мерзлых гидратонасыщенных отложений: дисс. .... канд. г.-м. н. М.: МГУ, 1991. 132 с.
9. *Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Kotov, P.I., Sobin R.V.* Investigation of the Dynamics of Gas Emission from Frozen Soils with Change in Temperature and Pressure // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2020. V. 57. № 4. P. 305–311.
10. *Sergeev D., Khimenkov A., Tipenko G., Vlasov A., Cauquil E., Green E., Dauboin P., Stanilovskaya J., Mnushkin M.* Yamal Craters: State of Knowledge and Wished In-situ Investigations // XI. International Conference on Permafrost 20–24 June 2016. Potsdam. Germany p. 997.

## METHODS OF STUDYING THE PROPERTIES OF FROZEN SOILS AND PREDICTION OF THEIR CHANGES

F. S. Karpenko<sup>a, #</sup>, V. N. Kutergin<sup>a</sup>, E. O. Dernova<sup>a</sup>, and A. A. Osokin<sup>a</sup>

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

<sup>#</sup> *E-mail: kafs08@bk.ru*

Frozen soils are traditionally considered as stable formations, the change of structure and properties of which can occur only during the transition from the frozen to the melt phase state. At the same time, the results of recent scientific and practical studies show that these changes, being gradual, begin already in the frozen state. This is confirmed by the modern activation of exogenous geological processes in the permafrost zone, which is caused by climatic changes taking place at the present time. Climate fluctuations cause a natural gradual increase in the soil temperature of the permafrost zone, which leads to a change in its condition and structure. Almost everywhere, frozen soils include a gas component. It is believed that it does not have a significant effect on the properties of the host soils, provided that their frozen phase state is preserved. The results of the conducted studies show that the migration of gases in soils begins already in conditions of elevated negative temperatures, at which the soil as a whole remains in a frozen aggregate state. The intensity of this process has a significant impact on the dynamics of changes in the strength properties of frozen soils in violation of the conditions of their natural occurrence as a result of temperature exposure and the action of loads. For a reliable study of these processes, there is currently no development and practical application of new methods for determining the strength properties of frozen rocks using direct research methods, such as triaxial and shear tests. The results of such studies should serve as a basis for the design and construction of new engineering structures, as well as the adaptation of existing structures in the regions of permafrost distribution.

**Keywords:** *cryolithozone, frozen soils, gas inclusions, gas release, investigation of the properties of frozen soils by the method of triaxial compression and shear tests*

### REFERENCES

1. Bogoyavlenskii, V.I. *Vybrosy gaza iz kriolitozony poluostrova Yamal* [Gas emissions from the cryolithozone of the Yamal Peninsula]. *Burenie i neft*, 2015, no. 7–8 (163–164), pp. 8–13. (in Russian)
2. Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Frolov, S.I., Sobin, R.V. *Vliyaniye na svoystva glinistykh gruntov izmenenii svoystv gidratnykh plenok pri temperaturnykh vozdeistviyakh* [Influence of changes in the properties of hydrate films on the properties of clay soils under temperature effect]. *Geoekologiya*, 2021, no. 1, pp. 69–78. <https://doi.org/10.31857/S0869780921010033> (in Russian)
3. Kutergin, V.N., Kal'bergenov, R.G., Karpenko, F.S., Sedov, V.V. *Novye tekhnologii ispytaniy gruntov na sdivig* [New technologies of soil shear testing]. *Sergeevskie chteniya*, vol. 12, Moscow, 2010, pp. 366–372. (in Russian)
4. Kutergin, V.N., Kal'bergenov, R.G., Karpenko, F.S. *Metody laboratornykh issledovaniy svyaznykh gruntov: sovershenstvovaniye na osnove sovremennykh nauchnykh predstavlenii* [Methods of laboratory studies of cohesive soils: improvement on the basis of modern scientific concepts]. *Sergeevskie chteniya*, vol. 18, Moscow, 2016, pp. 759–764. (in Russian)
5. Perlova, E.V. *Osobennosti gazosoderzhaniya mnogoletnerzlykh porod na primere severo-zapadnoi chasti p-va Yamal* [Features of the gas content of permafrost rocks on the example of the north-western part of the Yamal Peninsula]. Cand. (Geol.-Min.) Dissertation, Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2021, 178 p. (in Russian)
6. Chuvilin, E.M., Perlova, E.V. *Formy nakhozhdeniya i usloviya formirovaniya gazovoi komponenty merzlykh porod* [The forms of occurrence and conditions for the formation of the gas component of frozen rocks]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Ser. 4. Geolog.*, 1999, no. 5, pp. 55–57. (in Russian)
7. Chuvilin, E.M., Perlova, E.V., Dubinyak, D.V. *Experimental'noe modelirovaniye uslovii sushchestvovaniya gazovykh gidratov v morskikh otlozheniyakh p-ova Yamal* [Experimental modeling of the conditions of existence of gas hydrates in marine sediments of the Yamal Peninsula]. *Materialy Vtoroi konferentsii geokriologov Rossii* [Proc. 2nd Conference of Russian Geocryologists]. Vol. 1, Moscow, 2001, pp. 169–173. (in Russian)
8. Yakushev, V.S. *Sostav, stroeniye i svoystva merzlykh gidratonasyshchennykh otlozhenii* [Composition, structure and properties of frozen hydrate-saturated sediments]. Cand. (Geol.-Min.) Dissertation, Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1991, 132 p. (in Russian)
9. Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Kotov, P.I., Sobin, R.V. Investigation of the dynamics of gas emission from frozen soils with change in temperature and pressure. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2020, vol. 57, no. 4, pp. 305–311.
10. Sergeev, D., Khimenkov, A., Tipenko, G., Vlasov, A., Cauquil, E., Green, E., Dauboin, P., Stanilovskaya, J., Mnushkin, M. Yamal craters: state of knowledge and wished in-situ investigations. XI. International Conference on Permafrost 20–24 June 2016. Potsdam. Germany p. 997.

---

---

**МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

---

---

УДК 504.06/625

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА БИОПОЗИТИВНОСТИ  
ОБЪЕКТОВ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА**© 2022 г. Н. И. Шестаков<sup>1,\*</sup>, К. Л. Чертес<sup>2,\*\*</sup><sup>1</sup> *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, д. 26, Москва, 129337 Россия*<sup>2</sup> *Самарский государственный технический университет (СамГТУ), ул. Молодогвардейская, д. 244, Самара, 443100 Россия*

\*E-mail: SHestakovNI@mgsu.ru

\*\*E-mail: chertes2007@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.10.2021 г.

После доработки 07.12.2021 г.

Принята к публикации 09.12.2021 г.

Выбор применяемых конструкций в дорожном строительстве требует не только технико-экономического обоснования, но и должен содержать экологические параметры воздействия на окружающую среду. В статье рассмотрена принципиальная возможность использования метода анализа иерархий для оценки численного параметра биопозитивности при выборе типа конструкции дорожных одежд. В качестве примера для расчета представлены варианты конструкций с применением армирующих сеток или без них в различных геологических условиях. Методом попарных сравнений выполнен расчет параметров биопозитивности по выбранным критериям с установлением веса каждого из них. Представлена графическая интерпретация полученных результатов и сводная таблица оценочных показателей. Используемая методика позволяет комплексно оценить показатель биопозитивности и использовать его при обосновании выбора конструкций дорожно-строительного комплекса.

**Ключевые слова:** биопозитивность, критерии, метод анализа иерархий, глобальное воздействие, автомобильная дорога, конструкция дорожных одежд, армирующая сетка

**DOI:** 10.31857/S0869780922020072**ВВЕДЕНИЕ**

Стремительное увеличение дорожной сети в России способствует качественному изменению дорожно-транспортного комплекса и вносит существенный вклад в экономическое развитие страны. Вместе с тем, деятельность дорожной отрасли увеличивает экологическую нагрузку за счет отвода территорий, использования минеральных ресурсов, изменения ландшафта, геологических, гидрологических и других природных условий. Такого рода изменения требуют дополнительных параметров оценки при обоснованном выборе различных вариантов. В настоящий момент критериями экологической безопасности являются соответствие приемлемым показателям санитарно-гигиенических нормативов или достижение экологических параметров рамок установленных значений. Соблюдение таких условий обеспечивает устойчивость естественных экосистем в отношении отдельных параметров, при этом не рассматривается воздействие на окружающую среду в целом.

Техническое развитие дорожной отрасли постоянно изменяет имеющиеся технологии, материалы и типы конструкций для дорожно-строительного комплекса. Применение новых видов конструкций необходимо обосновывать по экологической составляющей, что будет способствовать уменьшению воздействия на окружающую среду [4].

В настоящее время при выборе конструкции дорожной одежды, оценку эффективности проектных решений производят на основе только технико-экономического сравнения вариантов, не затрагивая экологические аспекты. В связи с чем требуется разработка дополнительных методик, которые позволят комплексно оценить степень воздействия конструкций, материалов или технологий дорожно-транспортного комплекса на окружающую среду.

Среди большинства видов конструкций дорожных одежд, применяемых в строительстве, достаточно хорошо изучены и применяются различные армирующие элементы. Для армирова-

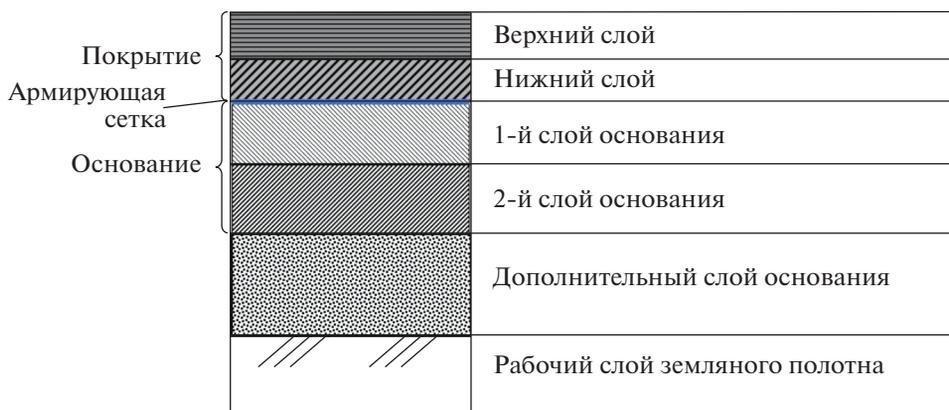


Рис. 1. Рассматриваемая схема конструкции дорожной одежды.

ния применяются плоские сетки с ячейками одинаковых размеров (от 50 до 300 мм) [2, 10]. Такие элементы укладываются на стыке между разными слоями конструкции дорожной одежды и предназначены для равномерного распределения нагрузки от подвижного состава. Вариант конструкции дорожной одежды с последовательным расположением материалов представлен на рис. 1.

Рассмотрим несколько вариантов конструкции автомобильной дороги с применением армирующей прослойки и без нее. Варианты конструкций нежестких дорожных одежд автомобильных дорог для II дорожно-климатической зоны при разных типах земляного полотна III технической категории<sup>1</sup> представлены в табл. 1.

<sup>1</sup> ОДМ 218.5.001-2009 “Методические рекомендации по применению геосеток и плоских георешеток для армирования асфальтобетонных слоев усовершенствованных видов покрытий при капитальном ремонте и ремонте автомобильных дорог”. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200075828>.

Общий модуль упругости дорожной одежды в расчетных конструкциях составляет 390–480 МПа.

### ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Основная цель данного исследования заключается в разработке и применении методов расчета численного показателя биопозитивности с учетом критериев экологической оценки, а также апробирование предложенной методологии на известных вариантах конструкции объектов дорожно-транспортного комплекса.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Биопозитивность – совокупность экологических критериев, направленных на уменьшение негативного воздействия на окружающую среду, состоящая из эффективных решений с минимальными выбросами в окружающую среду, производимыми выделениями, использованием ограниченного пространства и энергии, а также образованием побочных продуктов либо без них.

Таблица 1. Рассматриваемые варианты конструкции дорожной одежды

Материал слоя дорожной одежды	Толщина слоя, см					
	Рабочий слой земляного полотна					
	суглинки и глины песчанистые		супеси песчанистые		пески	
Номер варианта	1	2	3	4	5	6
Асфальтобетон верхнего слоя покрытия	5	5	5	5	5	5
Асфальтобетон нижнего слоя покрытия	8	6	8	6	8	6
Армирующая прослойка	–	+	–	+	–	+
Асфальтобетон слоя основания	–	7	–	7	–	7
Щебеночно-гравийно-песчаная смесь	26	17	23	15	28	20
Дополнительный слой основания	35	35	20	20	–	–
Общая толщина конструкции	74	70	56	53	41	38

**Таблица 2.** Критерии биопозитивности

Обозначение критерия	Вид воздействия	Обозначение критерия	Вид воздействия
К1	Выбросы в атмосферу	К5	Потребление электроэнергии
К2	Сбросы в воду	К6	Занимаемое пространство
К3	Образование отходов	К7	Выделение тепловой энергии
К4	Использование природных ресурсов	К8	Вибрационное и шумовое воздействие

Определение приближенного численного параметра биопозитивности возможно при сравнительном анализе подобных технологий по ряду известных критериев, которые можно представить в виде аналитических иерархических моделей. Наиболее эффективным алгоритмом их решения является метод анализа иерархий (МАИ) [5]. Эффективность и востребованность данного метода подтверждается широким применением его как зарубежными, так и отечественными учеными от управления на межгосударственном уровне до решения отраслевых и частных проблем в любой отрасли.

Метод заключается в декомпозиции проблемы на более простые составляющие части и поэтапном установлении веса каждого оцениваемого компонента с использованием попарных сравнений. Процесс расчета показателя биопозитивности может быть представлен в виде последовательности иерархии. В такой иерархии, называемой доминантной, определяются три уровня: верхний уровень цели (значение показателя биопозитивности), средний – критерии оценки, нижний – перечень альтернатив (рассматриваемые варианты конструкции).

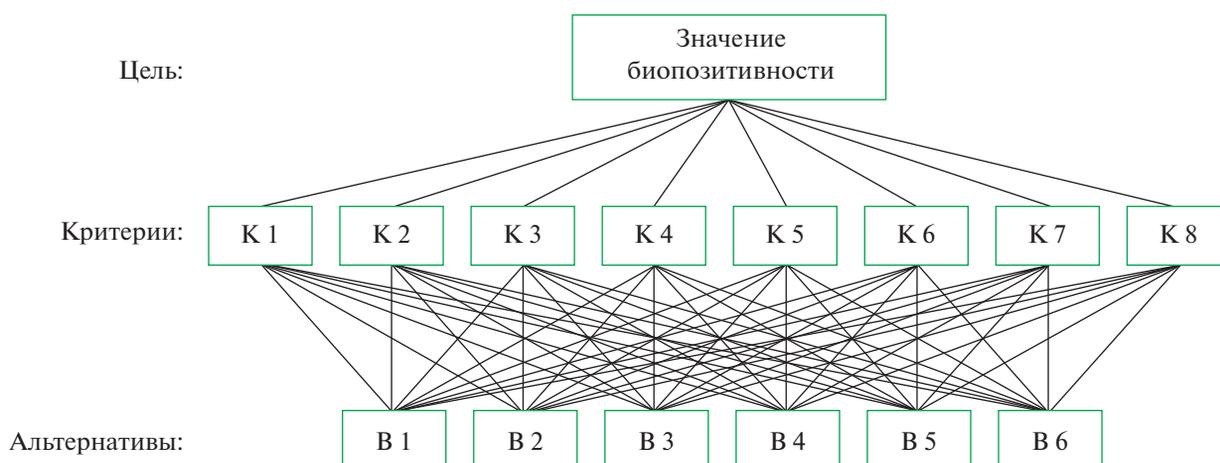
В качестве критериев оценки биопозитивности рассматриваются аспекты экологического

воздействия, сравнительная оценка которых целесообразна в виду недостатка информации. Подобные критерии используются для разработки мер безопасности и оценки рисков при защите экологических природных зон [1]. Для дальнейшей работы каждому критерию присваивается собственное обозначение, как указано в табл. 2.

Результаты сравнения представляются в виде матриц попарных сравнений, в которых элементы нижележащего уровня (сравниваемые варианты конструкции дорожной одежды) сравниваются попарно по отношению к критериям, а критерии – по отношению к цели. Достижение итоговой цели (расчет биопозитивности) можно представить в виде иерархического графа, как показано на рис. 2.

Вес каждого отдельного объекта в иерархии определяется оценкой соответствующего ему элемента собственного вектора матрицы приоритетов, нормализованного к единице.

Для оценки относительной важности каждого компонента предложено использовать шкалу от 0 до 3 (табл. 3). В большинстве работ [8, 9, 12] применяется фундаментальная шкала оценки, предложенная в работах [5, 6, 11], в которой значения оценки имеют большой диапазон (от 0 до 9). Ис-

**Рис. 2.** Декомпозиция рассматриваемой задачи в структурную иерархию.

**Таблица 3.** Шкала относительной важности при оценке значения матрицы

Назначаемое значение	Определение
0	Варианты несравнимы
1	Равнозначные варианты
2	Умеренное превосходство одного над другим
3	Существенное превосходство

пользование такой шкалы эффективно при оценке степени предпочтения каждого критерия, но при выполнении экспертной оценки в данном случае, она может только усложнить саму процедуру. В связи с чем, авторами предложено использовать сокращенную шкалу, ограничение которой объясняется упрощением оценки при попарном сравнении, а дальнейшие расчеты с учетом веса критериев позволят уточнить полученные значения.

Значение любого элемента, сравниваемого с самим собой, равно 1, т.е. диагональ матрицы состоит из единиц. При заполнении матрицы сравнений используется свойство обратной симметрии: симметричные относительно диагонали клетки заполняются обратными величинами.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для установления значения весов критериев необходимо в матрице сравнений для критериев попарно сравнивать критерий из строки с критерием из столбца по отношению к цели. Значения из шкалы относительной важности (см. табл. 3) вписываются в ячейки, образованные пересечением соответствующей строки и столбца, с учетом количественных данных по критериям биопозитивности, указанным в табл. 2. Такой метод выбора позволяет преодолеть трудности, связанные с экспертной оценкой [3, 7].

Расчет значений выполнялся в программе для принятия решений Super Decisions, которая работает на основе двух многокритериальных методов принятия решений [13].

В табл. 4 представлена матрица попарных сравнений различных вариантов конструкции дорожной одежды по каждому критерию и расчетные значения вектора приоритета, выполненных в программном комплексе Super Decision.

В качестве примера ниже дан разбор по критерию K1 – выбросы в атмосферу. Наибольшее влияние на выбросы в атмосферу при устройстве конструкции земляного полотна будут оказывать

толщина асфальтобетонного слоя (образовавшие выбросы при производстве асфальтобетонной смеси) и толщина уплотняемых слоев (выбросы дорожно-строительных машин). При использовании армирующей прослойки (варианты 2, 4, 6) толщина асфальтобетона нижнего слоя покрытия уменьшается на 2 см, но появляется дополнительный слой основания из асфальтобетона толщиной 7 см. Вместе с тем, толщина щебеночно-гравийно-песчаной смеси для вариантов № 2, 4, 6 сокращается примерно на 30%, что ведет к снижению общей толщины конструкции для вариантов с армирующей сеткой.

Матрицы сравнений для альтернатив заполняются для каждого критерия отдельно и дополнительно рассчитывается вектор приоритетов альтернатив для данного критерия (X).

Однако, при таком методе расчета не учитывается вес каждого из критериев. Таким образом, получается, что каждый из показателей является равнозначным, и глобальное воздействие от выбросов в атмосферу сравнивается, например, с потребляемыми природными ресурсами. Поэтому, следующая за проведенной серией попарных сравнений композиция иерархически структурированных элементарных мер соответствия позволяет получить комплексную величину соответствия каждой альтернативы всему набору критериев и произвести окончательную оценку вариантов, связав их вес с собственными величинами.

Для этого необходимо установить вес каждого критерия относительно основной цели, в нашем случае – биопозитивности. Такую операцию наиболее эффективно проводить методом экспертной оценки при попарном сравнении важности критериев в программном комплексе Super Decision. Матрица сравнения критериев и полученные расчетные результаты каждого из критериев указаны в табл. 5.

Показатель общего экологического воздействия рассчитывается как сумма произведений веса и значения каждого из критериев из сводной таблицы. В связи с тем, что биопозитивность соответствует минимальному негативному воздействию на окружающую среду при минимальных ресурсах, ее численное значение будет обратно пропорционально рассчитанному общему воздействию. Значения каждого из критериев биопозитивности можно выразить через коэффициенты относительно показателя общего экологического воздействия в отдельности для всех рассматриваемых вариантов.

Полученные данные расчетов можно графически изобразить в виде лепестковой диаграммы с соблюдением одинакового масштаба, где лучами диаграммы являются значения расчетных критериев (рис. 3).

**Таблица 4.** Матрица сравнения вариантов по каждому критерию

К1 – Выбросы в атмосферу							
Варианты	1	2	3	4	5	6	X
1	1	2	2	3	3	3	0.313
2	1/2	1	2	3	3	3	0.248
3	1/2	1/2	1	2	2	3	0.168
4	1/3	1/3	1/2	1	2	3	0.120
5	1/3	1/3	1/2	1/2	1	2	0.087
6	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	1	0.062
К2 – Сбросы в воду							
Варианты	1	2	3	4	5	6	X
1	1	1	1	1	1	1	0.167
2	1	1	1	1	1	1	0.167
3	1	1	1	1	1	1	0.167
4	1	1	1	1	1	1	0.167
5	1	1	1	1	1	1	0.167
6	1	1	1	1	1	1	0.167
К3 – Образование отходов							
Варианты	1	2	3	4	5	6	X
1	1	1	2	2	3	3	0.269
2	1	1	2	2	3	3	0.269
3	1/2	1/2	1	1	2	2	0.148
4	1/2	1/2	1	1	2	2	0.148
5	1/3	1/3	1/2	1/2	1	1	0.081
6	1/3	1/3	1/2	1/2	1	1	0.081
К4 – Использование природных ресурсов							
Варианты	1	2	3	4	5	6	X
1	1	1/2	2	1/2	2	1	0.148
2	2	1	3	2	3	3	0.323
3	1/2	1/3	1	1/2	2	1	0.109
4	2	1/2	2	1	3	2	0.223
5	1/2	1/3	1/2	1/3	1	1/2	0.072
6	1	1/3	1	1/2	2	1	0.121
К5 – Потребление электроэнергии							
Варианты	1	2	3	4	5	6	X
1	1	1	1	2	2	3	0.229
2	1	1	1	2	3	3	0.246
3	1	1	1	1	2	3	0.206
4	1/2	1/2	1	1	1	2	0.138
5	1/2	1/3	1/2	1	1	1	0.101
6	1/3	1/3	1/3	1/2	1	1	0.078

Таблица 4. Окончание

К6 – Занимаемое пространство							
Варианты	1	2	3	4	5	6	X
1	1	1	2	2	3	3	0.269
2	1	1	2	2	3	3	0.269
3	1/2	1/2	1	1	2	2	0.148
4	1/2	1/2	1	1	2	2	0.148
5	1/3	1/3	1/2	1/2	1	1	0.081
6	1/3	1/3	1/2	1/2	1	1	0.081
К7 – Выделение тепловой энергии							
Варианты	1	2	3	4	5	6	X
1	1	2	1	2	1	2	0.222
2	1/2	1	1/2	1	1/2	1	0.111
3	1	2	1	2	1	2	0.222
4	1/2	1	1/2	1	1/2	1	0.111
5	1	2	1	2	1	2	0.222
6	1/2	1	1/2	1	1/2	1	0.111
К8 – Вибрационное воздействие							
Варианты	1	2	3	4	5	6	X
1	1	2	2	3	3	3	0.313
2	1/2	1	2	2	3	3	0.231
3	1/2	1/2	1	2	3	3	0.183
4	1/3	1/2	1/2	1	2	3	0.126
5	1/3	1/3	1/3	1/2	1	2	0.082
6	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	1	0.062

Ключевым вопросом применимости МАИ на практике, как метода, предполагающего структурную декомпозицию решаемой задачей с последующей композицией элементарных решений, полученных попарными сравнениями, в общем, является качество процедуры оценки каждого из критериев. Для исключения компенсации каждого показателя в векторной форме, наиболее эф-

фективно будет перевести биопозитивность в комплексный показатель, который графически изображен в виде площади лепестковой диаграммы.

Для расчета комплексного показателя биопозитивности вычисляется площадь поверхности лепестковой диаграммы, построенной при рассчитанных значениях критериях биопозитивности, с соблюдением последовательности располо-

Таблица 5. Матрица критериев биопозитивности

Критерии	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	X
K1	1	3	3	5	5	5	3	3	0.301
K2	1/3	1	5	5	3	5	3	3	0.248
K3	1/3	1/5	1	5	5	5	3	3	0.164
K4	1/5	1/5	1/5	1	3	3	1	1	0.065
K5	1/5	1/3	1/5	1/3	1	3	1	1	0.052
K6	1/5	1/5	1/5	1/3	1/3	1	1/5	1/5	0.026
K7	1/3	1/3	1/3	1	1	5	1	1	0.070
K8	1/3	1/3	1/3	1	1	5	1	1	0.070

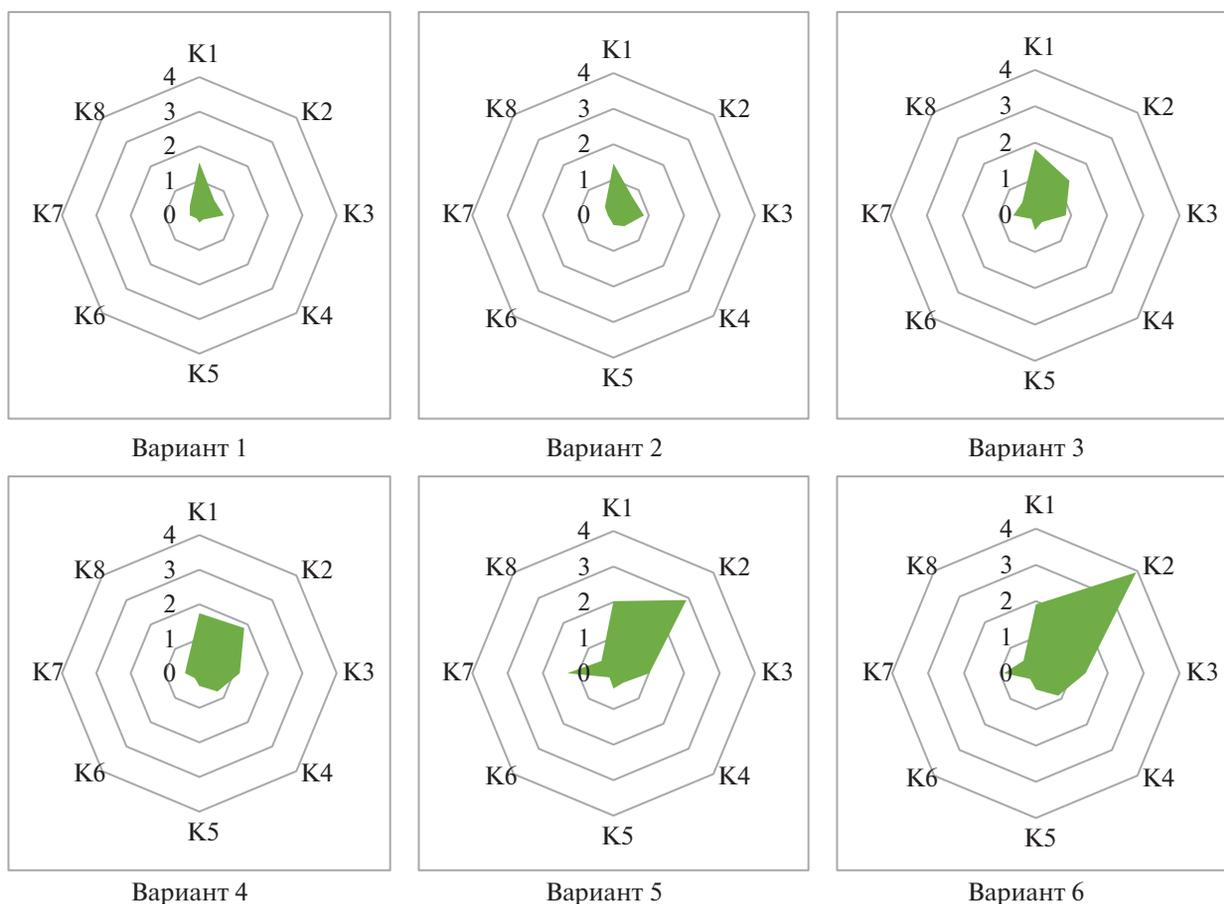


Рис. 3. Графическая интерпретация биопозитивности рассматриваемых вариантов конструкций дорожных одежд.

жения критериев от K1 до K8. Площадь диаграммы является суммой площадей треугольников, образованных в лепестковой диаграмме, и вычисляется по формуле:

$$S = \frac{1}{2} \times a \times b \times \sin(\alpha),$$

где  $a$ ,  $b$  – расчетные значения критериев биопозитивности, образующих стороны треугольника;  $\alpha$  – угол между сторонами  $a$  и  $b$  (так как лепестковая диаграмма имеет 8 лучей, следовательно  $\alpha = 45^\circ$ ).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатами проведенных расчетов является ряд оценочных параметров для всех сравниваемых вариантов, как указано в табл. 6.

Анализируя данные сводной таблицы, можно сделать обоснованный вывод о выборе конструкции дорожной одежды. Наилучший вариант – В6. При сравнении парных вариантов (1 и 2, 3 и 4, 5 и 6), очевидно, что применение армирующих сеток по воздействию на окружающую среду сказывается более позитивно, чем альтернативные варианты без армирования.

Таблица 6. Сводная таблица расчетных показателей

Показатель	Рассматриваемые варианты конструкций дорожных одежд					
	В1	В2	В3	В4	В5	В6
Общее экологическое воздействие (в нормализованном виде)	0.247	0.226	0.167	0.144	0.115	0.100
Биопозитивность	4.032	4.412	5.929	6.956	8.728	10.163
Комплексная биопозитивность	0.986	1.20	2.247	3.282	4.826	6.919

Увеличение критерия биопозитивности значительно проявляется при переходе от глинистых грунтов к песчаным, что объясняется общим увеличением объема применяемых материалов и производительностью.

При расчете биопозитивности МАИ диапазон полученных значений невелик, что в некоторых случаях может привести к одинаковым значениям и, как следствие, к спорным вариантам. При перерасчете комплексного параметра биопозитивности методом расчета площадей диаграмм разрыв в значениях значительно увеличивается, что способствует более обоснованному выбору.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Заиканова И.Н.* Основные принципы сравнительного анализа геосистем для геоэкологической оценки регионов // *Геоэкология*. 2015. № 6. С. 561–568.
2. *Кокоедеева Н.Е., Андронов С.Ю., Малышев Е.В., Мельников М.И.* Применение геосинтетических материалов при армировании асфальтобетонных слоев дорожной одежды // *Дороги: Инновации в строительстве*. 2016. № 51. С. 36–42.
3. *Наумов А.Е., Иванов А.В., Куннуев Ю.Ш.* Модели программных решений при управлении развитием городского хозяйства в условиях неопределенности // *Недвижимость: экономика, управление*. 2016. № 2. С. 51–58.
4. *Пугин К.Г., Пугина В.К.* Использование отходов в структуре органоминеральных композитов, применяемых для строительства автомобильных дорог // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2021. № 2. С. 38–46.
5. *Саати Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993.
6. *Саати Т., Кернс К.* Аналитическое планирование. Организация систем. М.: Радио и связь, 1991. 314 с.
7. *Финогенко И.А., Дьякович М.П.* Метод анализа иерархий и построение интегральных показателей сложных систем // *Вестник Тамбовского университета. Сер.: Естественные и технические науки*. 2017. Т. 22. № 6–1. С. 1335–1340. <https://doi.org/10.20310/1810-0198-2017-22-6-1335-1340>
8. *Юганова Т.И.* Выбор участков для размещения объектов обращения с отходами на основе методов многокритериального принятия решений // *Геоэкология*. 2019. № 4. С. 79–93. <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019479-93>
9. *Blanc M., Thorel L., Girout R., Almeida M.* Geosynthetic reinforcement of a granular load transfer platform above rigid inclusions: comparison between centrifuge testing and analytical modelling // *Geosynthetics International*. 2014. 21 (1). P. 37–52. <https://doi.org/10.1680/gein.13.00033>
10. *Correia N.S., Zornberg J.G.* Mechanical response of flexible pavements enhanced with geogrid-reinforced asphalt overlays // *Geosynthetics International*. 2016. 23 (3). P. 183–193. <https://doi.org/10.1680/jgein.15.00041>
11. *Saaty T.L., Tran L.T.* Fuzzy judgments and fuzzy sets // *Int. Journal of Strategic Decision Sciences*. 2010. V. 1. № 1. P. 23–40. <https://doi.org/10.4018/jsds.2010103002>
12. *Titarenko B., Titov S., Titarenko R.* Performance measurement system for multi-project engineering company // *PM World Journal*. 2015. V. 4. № 5. P. 1–14.
13. [https://superdecisions.com/downloads/index.php?section=win3\\_0\\_beta](https://superdecisions.com/downloads/index.php?section=win3_0_beta)

## METHODOLOGICAL GROUNDS FOR CALCULATING THE BIOPPOSITIVITY OF OBJECTS OF THE ROAD TRANSPORTATION COMPLEX

N. I. Shestakov<sup>a,#</sup> and K. L. Chertes<sup>b,##</sup>

<sup>a</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavlshosse, 26, Moscow, 129337 Russia

<sup>b</sup> Samara State Technical University, ul. Molodogvardeyskaya, 244, Samara, 443100 Russia

<sup>#</sup> E-mail: [SHestakovNI@mgso.ru](mailto:SHestakovNI@mgso.ru)

<sup>##</sup> E-mail: [chertes2007@yandex.ru](mailto:chertes2007@yandex.ru)

The choice of engineering structures used in road construction requires not only a feasibility study, but it also must contain environmental parameters about the impact on the environment. The article considers the fundamental possibility of using the hierarchy analysis method to evaluate the numerical parameter of biopositivity when choosing the type of road pavement construction. As an example for the calculation, the variants of structures with or without reinforcing meshes in various geological conditions are presented. The method of pair comparison is used to calculate the parameters of biopositivity according to the selected criteria with the establishment of the weight of each of them. According to the obtained values, a graphical interpretation of the results obtained and a summary table of estimated indicators are presented. Using the presented methodology, it becomes possible to evaluate the biopositivity indicator in a comprehensive manner and to use it when justifying the choice of road construction complex structures.

**Keywords:** *biopositivity, criteria, hierarchy analysis method, global impact, highways, pavement construction, reinforcing mesh*

## REFERENCES

1. Zaikanova, I.N. *Osnovnye printsipy sravnitel'nogo analiza geosistem dlya geoekologicheskoi otsenki regionov* [The basic principles of the comparative analysis of geosystems for the geoecological assessment of regions]. *Geoekologiya*, 2015, no. 6, pp. 561–568. (in Russian)
2. Kokodeeva, N.E., Andronov, S.Yu., Malyshev, E.V., Mel'nikov, M.I. *Primenenie geosinteticheskikh materialov pri armirovanii asfal'tobetonnykh sloev dorozhnoi odezhdyy* [The use of geosynthetic materials in the reinforcement of asphalt concrete layers of pavement]. *Dorogi: Innovatsii v stroitel'stve*, 2016, no. 51, pp. 36–42. (in Russian)
3. Naumov, A.E., Ivanov, A.V., Kunnuev, Yu.Sh. *Modeli programmnykh reshenii pri upravlenii razvitiem gorodskogo khozyaistva v usloviyakh neopredelennosti* [Models of software solutions in the management of urban development under uncertainty]. *Nedvizhimost': ekonomika, upravlenie*. 2016, no. 2, pp. 51–58. (in Russian)
4. Pugin, K.G., Pugina, V.K. *Ispol'zovanie otkhodov v strukture organomineral'nykh kompozitov, primenyaemykh dlya stroitel'stva avtomobil'nykh dorog* [The use of waste in the structure of organomineral composites used for the construction of highways]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*, 2021, no. 2, pp. 38–46. (in Russian)
5. Saati, T. *Prinyatie reshenii. Metod analiza ierarkhii* [Decision-making. Hierarchy analysis method]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1993. (in Russian)
6. Saati, T., Kerns, K. *Analiticheskoe planirovanie. Organizatsiya system* [Analytical planning. Organization of systems]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1991. (in Russian)
7. Finogenko, I.A., D'yakovich, M.P. *Metod analiza ierarkhii i postroyeniye integral'nykh pokazatelei slozhnykh sistem* [The method of hierarchy analysis and the construction of integral indicators of complex systems]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennyye i tekhnicheskie nauki*. 2017, vol. 22, no. 6–1, pp. 1335–1340. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-6-1335-1340. (in Russian)
8. Yuganova, T.I. *Vybor uchastkov dlya razmeshcheniya ob'ektov obrashcheniya s otkhodami na osnove metodov mnogokriterial'nogo prinyatiya reshenii* [Selection of sites for the placement of waste management facilities based on multi-criteria decision-making methods]. *Geoekologiya*, 2019, no. 4, pp. 79–93. <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019479-93>. (in Russian)
9. Blanc, M., Thorel L., Girout R., Almeida M. Geosynthetic reinforcement of a granular load transfer platform above rigid inclusions: comparison between centrifuge testing and analytical modelling, *Geosynthetics International*, 2014, vol. 21 (1), pp. 37–52. <https://doi.org/10.1680/gein.13.00033>
10. Correia, N.S., Zornberg, J.G. Mechanical response of flexible pavements enhanced with geogrid-reinforced asphalt overlays. *Geosynthetics International*, 2016, vol. 23 (3), pp. 83–193. <https://doi.org/10.1680/jgein.15.00041>.
11. Saaty, T.L., Tran, L.T. Fuzzy judgments and fuzzy sets. *International Journal of Strategic Decision Sciences*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 23–40.
12. Titarenko, B., Titov, S., Titarenko, R. Performance measurement system for multi-project engineering company. *PM World Journal*, 2015, vol. 4, no. 5, pp. 1–14.
13. [https://superdecisions.com/downloads/index.php?section=win3\\_0\\_beta](https://superdecisions.com/downloads/index.php?section=win3_0_beta)