



DOI 10.22363/2313-2310-2018-26-1-35-51

УДК 551.44+378(09) (470.53)

## ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ РАЙОНОВ НА ОСНОВЕ МИНИМИЗАЦИИ НЕГАТИВНЫХ КАРСТОВЫХ ПРОЦЕССОВ

А.Я. Гаев<sup>1,2</sup>, Ю.А. Клилин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Оренбургский научный центр УрО РАН

*Российская Федерация, 460000, Оренбург, ул. Пионерская, 11*

<sup>2</sup> Оренбургский государственный университет

*Российская Федерация, 460018, Оренбург, просп. Победы, 13*

<sup>3</sup> Институт карстоведения и спелеологии Русского географического общества  
при Пермском научно-исследовательском госуниверситете  
*Российская Федерация, 614990, Пермь, ГСП, ул. Букирева, 15*

Многолетние исследования выполнены авторами в регионах Урала, где широко проявляются экологически опасные негативные геодинамические карстовые процессы, поскольку 40% территории сложено известняками, доломитами, мергелями, гипсом, ангидритом и каменной солью. Их растворение поверхностными и подземными водами формирует карстовый ландшафт с образованием поверхностных и подземных форм, представленных карстовыми депрессиями, котловинами, воронками, логами, мульды оседания-обрушения, суходолами, пещерами с карами, понорами и др. Образование всех этих форм происходит вдоль неотектонически обновляемых нарушений и ослабленных зон земной коры, формирующихся унаследовано и с положительным знаком. Они раскрывают и гидрогеологически активизируют трещинные и пещерные системы, формируя зоны сосредоточения карстовых вод, которые могут быть крупными водоисточниками и одновременно участками повышенной экологической опасности для населения и инженерной инфраструктуры. Эти опасные процессы тормозят социально-экономическое развитие территорий. Для их минимизации и безаварийной работы даже таких сложных сооружений, как трансконтинентальные газопроводы, на основе использования широкого комплекса методов авторами предложена методика исследований и прогноза, и минимизации последствий опасных процессов, включая системы мониторинга с оперативным слежением за трансформацией блоков карстующихся пород и за техническим состоянием сооружений и коммуникаций. Необходимо обратить особое внимание на такие элементы неоландшафта, как мульды оседания-обрушения, которые являются причиной наиболее экологически опасных негативных геодинамических процессов. Все внимание сегодня сосредоточено на провальных формах карста, якобы представляющих основную опасность для пересекающих их коммуникаций. По бортам карстовых депрессий, чаще всего достаточно пологих и задернованных, в приводораздельной части ландшафтного профиля встречаются обрывистые участки, что обусловлено дизъюнктивными дислокациями в связи с более энергичными неотектоническими поднятиями. Степень опасности рекомендуется определять по комплексу методов, включая гидрогеохимический, используя параметр относительного модуля подземной химической денудации в  $\text{т/км}^2$  в год на 1 м. Технический мониторинг, впервые поставленный в 1994—1995 гг. на выявленных авторами карстоопасных участках, заключается в систематических замерах напряженного состояния металла труб, авторами установлены закономерные взаимосвязи деформаций в массиве пород и в металле труб. Это способ-

ствует своевременному принятию профилактических мероприятий для предотвращения экологически опасных негативных геодинамических процессов.

**Ключевые слова:** негативные геодинамические процессы, карстовые процессы, гидрогеология, технический мониторинг, гидросфера, неотектоника, зоны сосредоточения подземных вод

## ВВЕДЕНИЕ

Авторы базируются на представлениях о гидросфере и ее экологической безопасности, сформировавшиеся под влиянием работ классиков, начиная с Ж.Б. Ламарка. Пиннекер Е.В. в развитие идей В.И. Вернадского [1; 2], назвал и охарактеризовал гидрогеологию, как науку о гидросфере [3]. Стало очевидно, что проблемы гидросферы и ее экологической безопасности тесно связаны с биосферой и ноосферой. Их следует рассматривать через призму состояния биосферы, в которой ситуация усугубляется потерями лесов и слишком большими площадями пахотных земель. Экологической безопасности особенно угрожает распашка земель в пределах пойм рек и не контролируемое строительство земляных плотин на водотоках для летнего водопоя скота. Участвовавшими пожарами и не обособленными рубками истребляются леса, и, особенно, это болезненно для лесостепных, степных районов и территорий, сложенных карстующимися породами.

## ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В регионах Урала 40% территории сложено известняками, доломитами, мергелями, гипсом, ангидритом и каменной солью. Их растворение природными водами формирует карстовый ландшафт с поверхностными, подземными и глубинными карстовыми формами, что существенно осложняет решение вопросов экологической безопасности при хозяйственном освоении территории и строительстве инженерных сооружений [4]. Поэтому массивы карстующихся пород и негативные геодинамические процессы, в них протекающие, должны стать объектами пристального внимания специалистов и служб, занимающихся вопросами экологической безопасности жизнедеятельности населения.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Структурно-тектонический фактор влияет на химический сток через рельеф, степень раскрытости геологических структур и вещественный состав пород. В солях, гипсах и ангидритах карст сопровождается ростом минерализации вод и модуля подземного химического стока ( $M_{\text{пхс}}$ ). В бассейне р. Вишеры он достигает  $902 \text{ т/км}^2$  в год. Оценивается интенсивность карста через относительный модуль подземного химического стока ( $M_{\text{опхс}}$ ), равный отношению  $M_{\text{пхс}}$  к мощности дренируемого водоносного пласта (зоны) [5]. Чем интенсивнее карст, тем выше экологическая опасность негативных геодинамических процессов. С севера на юг Урала водный сток уменьшается, растут жесткость вод, минерализация и концентрации сульфатов и хлоридов, что снижает уязвимость пород к растворению и несколько снижает уровень экологической опасности (рис. 1). В платформен-

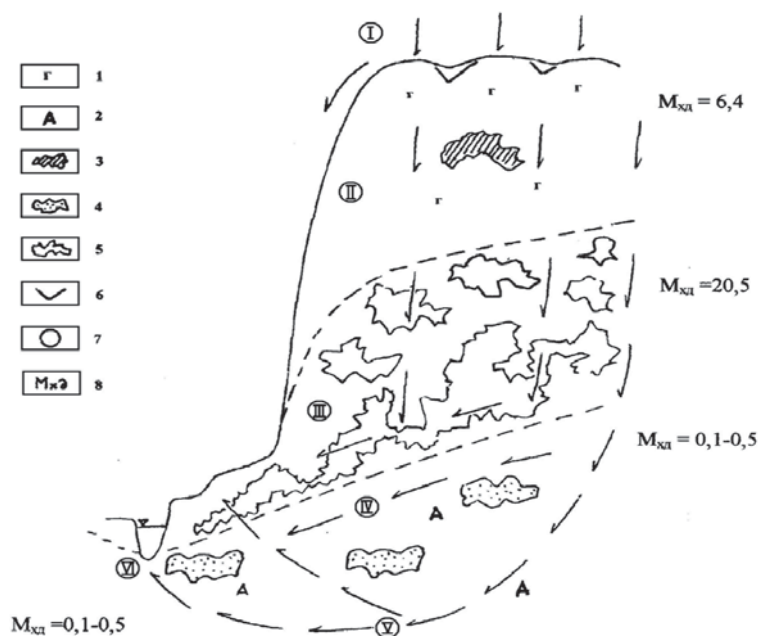
ной части территории  $M_{\text{пкс}}$  уменьшается от пределов 20–40 т/км<sup>2</sup> в год в таежных условиях до — 5–20 — в степных районах и менее 5 т/км<sup>2</sup> — в сухой степи Волго-Уральского междуречья [5]. В сульфатных и галоидных породах на Западном склоне Урала  $M_{\text{пкс}}$  возрастает до 100 т/км<sup>2</sup> в год, проявляется высотная поясность и карст особенно активен и экологически опасен [6]. На Южном Урале  $M_{\text{пкс}}$  достигает 40, а южнее в бассейне р. Урал снижается до — 5–20 т/км<sup>2</sup>. Горы играют роль климатораздела, и обводненность пород на восточном склоне, как и экологическая опасность негативных геодинамических процессов снижается. На платформе  $M_{\text{пкс}}$  в таежных условиях составляет 20–50 т/км<sup>2</sup> в год, а в степных — 1–10 т/км<sup>2</sup>. На карте (см. рис. 1) показаны площади: практически не опасные 1 с модулем 1–10, с пониженной опасностью 2 — 10–20, средней и участками пониженной 3 — 10–30, средней 4 — 20–50, повышенной и участками средней 5 — 20–70, повышенной 6 — до 100, весьма повышенной 7 —  $\geq 100$  т/км<sup>2</sup>. Показаны границы зон 8 с различным уровнем проявления экологической опасности из-за карста.



**Рис. 1.** Схематическая карта проявлений суффозионно-карстовых процессов в системе вода-порода в регионах Урала с модулем химического стока, т/км<sup>2</sup> в год и различным уровнем экологической опасности [5]

[Fig. 1. Schematic map of cuffusion-karst processes location in system water-rock in regions of Urals with module of chemical flow, t/km<sup>2</sup> a year and different level of ecological danger]

**Моделирование и оценка карстовых процессов.** Под руководством Ю.А. Килина с 1994 г. на участке трассы 1648—1653 км у с. Красный Ясыл проводятся исследования с применением дистанционных и наземных методов: топографических, инженерно-геологических, гидрогеологических и геофизических с режимными наблюдениями [6]. Это позволило гидродинамически моделировать образование карстовых форм, развивая идеи Г.А. Максимовича [7] (рис. 2).



**Рис. 2.** Гидродинамическая модель образования карстовых форм  
[Fig. 2. Hydrodynamical model of karst forms development]

Модель отражает гидрогеологические закономерности формирования карстовых форм в разрезе, в том числе в зоне под долинного стока р. Сылвы и Ирени. Приречные зоны дренируют всю территорию, включая водосборы. Интенсивность карстовых процессов и уровень экологической опасности не одинаковы в разных зонах, как и значения относительных модулей подземного химического стока [5]. Так, интенсивность химической денудации в зоне сезонных и многолетних колебаний уровня трещинно-карстовых вод в 3—8 раз выше, чем в зоне аэрации (табл. 1, рис. 2). То есть объемы карстовых пустот в этой (переходной, по Максимовичу) зоне и в зоне аэрации пропорциональны интенсивности карстового процесса, и наиболее активное формирование карстовых полостей происходит именно в переходной зоне, где и образуются основные объемы карстовых полостей унаследовано и в несколько этажей [7]. Глубже, по мере насыщения вод солями, агрессивность их и интенсивность процессов снижаются, т.е. гидрогеохимические методы позволяют прогнозировать объемы подземных карстовых форм и уровень экологической опасности в гидродинамических зонах. Химическая денудация гипсов и ангидритов в условиях техногенеза оценена исследователями при интенсивном развитии подземного стока в 582,5 мкм/год, что на порядок выше, чем в среднем в Пермском Прикамье.

Таблица 1

**Значения подземной химической денудации по трассе магистрального газопровода  
(Ординский район Пермского края)**

Гидродинамические зоны	Модуль стока, л/(с·км <sup>2</sup> )	Концентрация сульфатов в водах, мг/дм <sup>3</sup>	Модуль химического стока, т/км <sup>2</sup> год	Модуль химической денудации, т/км <sup>2</sup> год	Мощность зоны, м	Относительный модуль подземной химической денудации, т/км <sup>2</sup> в год на 1 м мощности разреза
Зона аэрации	3,5	до 0,65	67	67	11	6,34
Переходная зона	2,71	до 2,5	207	123	5,7	20,85

Table 1

**Values of underground chemical denudation on route of arterial gas pipeline  
(Ordinsky region of Perm of very large areas)**

Hydrodynamic zone	Module of flow, l/(s·km <sup>2</sup> )	Concentration of sulphates in water, mg/dm <sup>3</sup>	Module of chemical flow, t/km <sup>2</sup> a year	Module of chemical denudation, t/km <sup>2</sup> a year	Thickness of zone, m	Relative module of underground chemical denudation, t/km <sup>2</sup> on 1 m of section thickness
Zone of aeration	3,5	not more then 0,65	67	67	11	6,34
Zone of transition	2,71	not more then 2,5	207	123	5,7	20,85

Карстующиеся породы Предуралья представлены гипсами 1, ангидритами 2 с открытыми подземными карстовыми полости 3, которые заполнены или частично заполнены продуктами обрушения кровли 4, или продуктами аккумуляции типа терра-росса 5. На поверхности массивов формируются участки площадных деформаций над карстовыми полостями 6. Четко выделяются гидродинамические зоны карстовых вод 7: I — поверхностной циркуляции, II — вертикальной нисходящей циркуляции (аэрации), III — переходная зона, IV — горизонтальной циркуляции, V — сифонной циркуляции, VI — под долинного стока с существенно разными значениями модуля химической денудации  $\delta$ , т/км<sup>2</sup> в год.

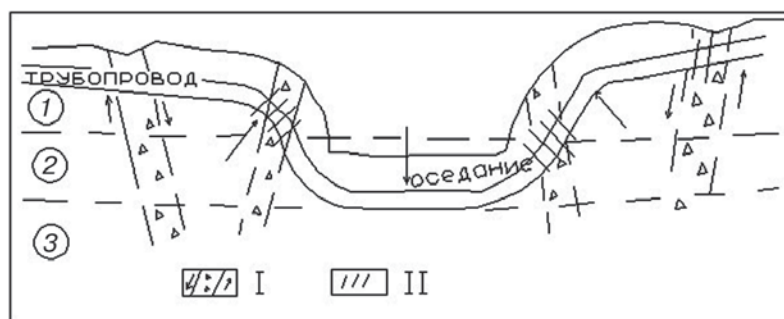
От интенсивности неотектонических движений и их знака зависит скорость старения карстовых пещер. Максимович Г.А. отметил связь гипсометрического уровня спелеогенеза с отметками террас рек и характером неотектонических движений. При отрицательных движениях происходит аккумуляция и заполнение полостей рыхлым материалом типа терра-росса, почв и кор выветривания. При положительных движениях спелеосистемы вовлекаются вверх, растут в размерах, соединяются через провалы с земной поверхностью.

Килиным Ю.А. по данным ВЭЗ построены карты кровли обвального-карстовых образований в масштабе 1:1000, и подсчитан объем толщи карстующихся гипсов. С помощью бурения 185 скважин со средней глубиной 20 м, а так же геофизических методов выявлены 22 подземные карстовые полости с размерами по вертикали от 0,2 до 19,5 м [6]. Они были пустыми, или заполненными осадками. Самая большая по площади полость (объект 15) вскрыта скважинами 16, 66, 67, 69 на глубинах от 7,9 до 10 м под нитками газопроводов Центр 1, Центр 2, Уренгой—Ужгород. При детальном изучении полость вскрыта шурфами и экскаватором.



Другая полость вскрыта под газопроводом Ямбург—Елец (1650—1649 км) с размерами в плане 20 30 м на глубине от 3 до 19,5 м. Выявлено и изучено еще два крупных объекта. Стало очевидно, что экологическая опасность и устойчивость газопроводов определяется не только развитием провальных и других карстовых форм, а глыбовым характером тектонических движений, которые усиливают напряженность и деформируемость металла трубопроводов за счет их растяжения и сжатия, что согласуется с изменениями уровня земной поверхности на этих участках. Наиболее существенны деформации труб на бортах крупных карстовых депрессий, котловин и суходолов.

Группой А. Фесенко (ВНИИГАЗ и НПП «Диарес») совместно с МВТУ им. Н. Баумана (Москва) на выявленных авторами карстоопасных участках выполнено множество замеров напряженного состояния металла труб. В результате удалось установить закономерные взаимосвязи деформаций в массиве пород и в металле труб (рис. 3). Тектоническая трещиноватость формирует блоково-карстовую систему вдоль бортов депрессий, котловин и логов. Эта сеть осложняется эрозионно-тектоническими формами, иногда расположенными на значительных расстояниях от основных макро карстовых форм, как например, на участке Ужгородского коридора на отрезке 1606—1609 км. Он исключительно экологически опасен на участках всех шести ниток газопровода.



**Рис. 3.** Схема формирования мульды оседания земной поверхности и дополнительных экологически опасных напряжений в системе «труба—массив» карстующихся пород

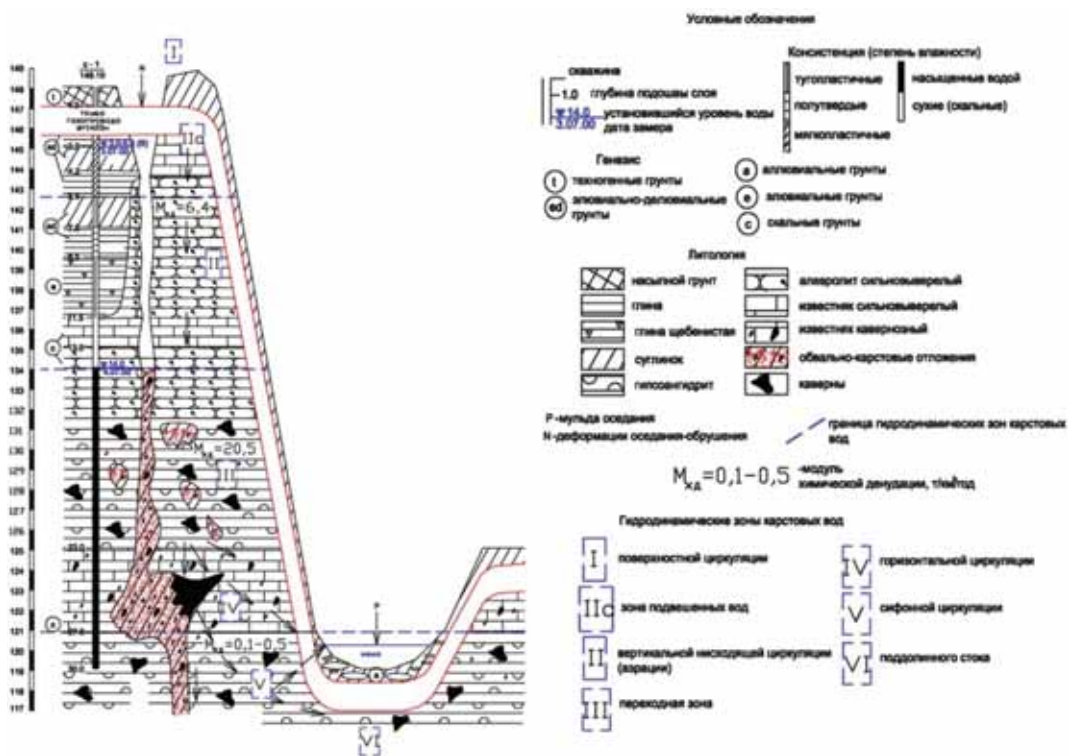
**[Fig. 3.** Scheme of earth surface subsidence muld formation and additional ecological dangerous stresses in system pipe — massif of karst rocks: I — tectonic-relaxed zones as a result of block character of earth's crust deformations with pointing of stress vector; II — stresses on pipe metal owing to formation of earth surface subsidence muld and development of karst-suffosion and erosion-tectonic forms. Hydrodynamic zones: 1 — of aeration; 2 — of transition; 3 — of constant horizontal flow]

На схеме показаны тектонически ослабленные зоны, как результат блокового характера деформаций земной коры с указанием вектора напряжения I, напряжение на металле трубопроводов в связи с формированием мульды оседания земной поверхности и развитием карстово-суффозионных и эрозионно-тектонических форм II, гидродинамические зоны: аэрации I, переходная 2, постоянного горизонтального стока 3. В переходной зоне эрозионно-тектонические деформации массивов горных пород Мазуевской карстовой депрессии с пещерными системами и многочисленными карстовыми формами многократно усиливаются унаследованными неотектоническими движениями. Они расположены прямо под газопроводами для обеспечения экологически безопасной эксплуатации га-

зопроводов, своевременного прогноза аварийных ситуаций и принятия решений по минимизации негативных последствий с участием авторов созданы геодинамические полигоны:

- с системой карстолитомониторинга с постоянным слежением за состоянием и динамикой напряжений в системе «труба—массив» горных пород;
- моделированием и прогнозом динамики деформаций и напряжений в этой системе в связи с эрозионно-тектоническими, карстово-суффозионными и другими процессами;
- разработкой и внедрением противоаварийных мероприятий, обеспечивающих экологическую безопасность.

Первые попытки создать **полигон по изучению геодинамических процессов** для постоянных наблюдений за ними в районе с. Красный Ясыл авторами были предприняты еще в 1995—1996 гг. На сегодня накопился значительный материал наблюдений, как за массивом горных пород, так и за трубами газопроводов. Это позволило авторам создать ряд моделей, в частности, по устойчивости массивов карстующихся пород (рис. 4). Совокупность карстово-суффозионных и эрозионно-тектонических процессов оказывает глубокое влияние на формирование рельефа, изменение которого по трассе газопровода оказывает интенсивное деформирующее воздействие на такие линейные жесткие коммуникации, как трубопроводы большого диаметра (1420 мм).



**Рис. 4.** Модель формирования карстовых процессов в зонах сосредоточения поверхностного и подземного стока

[Fig. 4. The model of karst processes formation in zones of surface and underground flow]

Геодинамика системы определяется формированием карстовых депрессий, котловин, логов и суходолов вдоль тектонических нарушений и ослабленных зон земной коры. Дизъюнктивные нарушения в условиях высокой физико-химической неустойчивости карстующихся пород превращаются в ядра слабо изученных элементов неоландшафта — в мульды оседания и растяжения. Этим элементам неоландшафта, к сожалению, не уделяется должного внимания, а именно они являются причиной негативных геодинамических процессов повышенной экологической опасности. Все внимание сосредоточено на провальных формах карста, которые якобы представляют основную опасность для пересекающих их коммуникаций. Бортовые зоны карстовых депрессий, котловин, логов, суходолов чаще всего имеют достаточно широкие, пологие и задернованные склоны, осложненные нередко блюдцеобразными воронками. Но на отдельных участках склоны карстовых макро- и мезо-форм приобретают обрывистый характер, что обусловлено дизъюнктивными нарушениями при более энергичных неотектонических поднятиях, особенно в приводораздельной части ландшафтного профиля. По бортам долин рек нередко фиксируются трещины бортового отпора шириной до 2 м. В ряду цепочек слившихся карстовых воронок вдоль тектонически нарушенных зон нередко формируются слепые эрозионно-карстовые лога. Большинство воронок формируется в зоне аэрации в процессе инфильтрации и инфлюации атмосферных осадков. В сульфатном типе карста это происходит из-за большого дефицита насыщения вод  $\text{CaSO}_4$ . В тектонических нарушениях формируются зоны сосредоточения подземных вод, и, судя по геофизическим данным, трещинная пустотность достигает здесь максимума. Буровыми скважинами вне зон сосредоточения подземных вод вскрыты трещины, заполненные продуктами терра-росы и гипсовой муки.

Для обеспечения экологической безопасности районов трансконтинентальных газопроводов, с участием авторов, разработана и осуществлена система мониторинга с использованием комплекса методов, поэтапно выполняемых в определенной последовательности. На первом этапе выполняется натурное обследование районов трасс с применением наземных и дистанционных методов. В полосе шириной до 2-х км вдоль коммуникаций картографируются и опробуются гидролого-гидрогеологические и карстологические объекты, которые могут представлять опасность для целостности коммуникаций. Фиксируются и описываются микро- и макро-карстовые формы, отбираются на физико-химические исследования пробы природных вод, почв и горных пород. В полевых условиях и в камеральный период анализируются аэро- и космо-фото-снимки с оценкой интенсивности эрозионно-карстовых процессов. Выявляются участки, представляющие потенциальную аварийную опасность для коммуникаций. Участки трассы, где деформации уже имеют место, выделяются под полигоны, где проводятся детальные геолого-геофизические исследования с применением буровых работ и постановкой технического мониторинга.

Впервые технический мониторинг начал функционировать на участках газопровода Ужгородского коридора вблизи с. Красный Ясыл в 1995 г. после предварительного проведения авторами карстологических исследований с применением наземных и дистанционных методов и буровых работ. Под газопроводом



была выявлена карстовая полость длиной до 35 и глубиной до 19 м. Транспорт газа был остановлен, в трубе обнаружили трещины и своевременно предотвратили утечки газа.

**Система технического мониторинга** осуществлена по методике, разработанной с участием и под руководством авторов. Ее внедрение предотвратило крупные аварии на газопроводах. С 1996 г., по этой методике, ВНИИГАЗ и НПП «Диарес» совместно с МВТУ им. Н. Баумана систематически выполняют замеры напряженного состояния труб на выявленных карстоопасных участках. В системе технического мониторинга «Астрон», используется спектрально-акустический метод. Измерения производятся на шести участках трансконтинентальных газопроводов. Интенсивность карстовых процессов и экологическая опасность в многоводные периоды возрастают, как и частота измерений. Данные дистанционных наблюдений показали, что после обильных паводков карстовые формы формируются интенсивнее с глубокими провальными воронками и котловинами. Напряжения на трубах изменяются и сезонно, в соответствии с вариациями гидролого-гидрогеологического режима в околотрубном пространстве. Большое значение имеют сезонные процессы промерзания и оттаивания, набухания и разжижения грунтов вокруг трубы, эффекты термолифта и процессы конденсации влаги в связи с повышенной температурой транспортируемого газа (от 20 до 70 °С).

Напряжение в трубах нарастает ранней весной на 2,5–5,7 кгс/мм<sup>2</sup> с последующей стабилизацией. Это происходит в связи с активизацией инфильтрации и усилением суффозионно-карстовых процессов в гидродинамической зоне сезонных и многолетних колебаний уровня трещинно-карстовых вод. Рост напряжений на трубах газопроводов составляет в среднем 2–4 кгс/мм<sup>2</sup> в год на участках пересечения крупных подземных карстовых полостей с зонами сосредоточения карстовых вод. Процесс носит колебательный и поступательный характер, проявляясь не одинаково в разных плоскостях, что согласуется с разным характером напряжений в блоках вмещающих пород. В мульдах оседания-обрушения на участках суходолов растягивающие напряжения по верху труб варьируют от 1 до 45 кгс/мм<sup>2</sup> при пределе прочности трубы 42,7 кгс/мм<sup>2</sup> [6]. Чаше эти напряжения составляют 14 кгс/мм<sup>2</sup>. В нижней части трубы сжимающие напряжения изменяются от 1 до 32 кгс/мм<sup>2</sup>, составляя в среднем 11 кгс/мм<sup>2</sup>. Состояние труб считается работоспособным при максимальном, рабочем значении напряжений металла меньше 50% предельных.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Классический район развития карста — это Ирень-Сылвенское междуречье на Уфимском плато, сложенное в значительной степени гипсами и ангидритами. Здесь образовались суходолы, лога, мульды оседания, воронки, котловины и поля с размерами до 10 км [6]. Техногенез превратил карст из сезонного в круглогодичный процесс, усилив его интенсивность на 2–3 порядка, что превратило карст в экологически исключительно опасный процесс для инженерной инфраструктуры. Под коммуникациями сформировались аварийно-опасные понижения и провалы. Нарушилось экологическое равновесие, нанося экономический ущерб

населению и окружающей среде (ОС) в десятки и сотни миллионов рублей. На плато расположены всемирно известные Кунгурская ледяная пещера и Ординский карстовый сифон. Оно пересекается железными и шоссейными дорогами с мостовыми переходами, трансконтинентальными газопроводами диаметром в 1420 мм и нефтепроводами протяженностью в десятки тыс. км.

К сожалению, гидрогеологические методы при исследовании карста в пределах массивов растворимых пород применяются мало, а гидрогеологическое картографирование в крупном масштабе не проводится. Недостаточная изученность этих массивов в регионе обусловила аварии на калийных предприятиях Березников и Соликамска, на железных и шоссейных дорогах и других сооружениях. Поэтому вопросы экологической безопасности здесь исключительно актуальны.

Только в Пермской области карст и экологически опасные деформации земной поверхности развиты в 20 административных районах. Карст особенно активно и опасно развивается в условиях избыточного увлажнения и на участках неотектонических поднятий. Развитие здесь неотектонической трещиноватости стимулирует формирование зон сосредоточения трещинно-карстовых вод и активизирует динамику их циркуляции. В логах, перпендикулярных к реке сток нередко изменяет направление на обратное, не к реке, а от реки. В водотоках вода много раз исчезает с поверхности земли и появляясь вновь [6].

Красноясыльское поле площадью 19 км<sup>2</sup> испещрено карстовыми воронками с плотностью более 200 на га. В Мазуевской карстовой депрессии имеют место цепочки воронок и котловин, каверны, поноры, ниши, карры, пещеры, прослеженные бурением до глубин в 40 м. Развиты воронки от мелких до очень глубоких с диаметром до 50 м. Гипсы и ангидриты закарстованы интенсивнее доломитов и известняков.

В северной части Уфимского плато развит гипсовый и карбонатно-гипсовый карст [8; 9]. В 1915 г. район изучала В.А. Варсанофьева, а в дальнейшем — геологи-съемщики: К.П. Плюснин (1947), Л.А. Шимановский (1963), В.И. Мошковский (1973), Е.А. Иконников (1990). Здесь работают Кунгурский стационар УрО РАН, Институт карстоведения и спелеологии при Пермском ун-те и изыскатели [7; 10—15]. Район расположен на востоке Волго-Уральской антеклизы между Башкирским сводом и Бымско-Кунгурской впадиной. По П.А. Софроницкому [16], он приурочен к западному крылу Уфимской макробрахиантиклинали, выделяясь по выходам на поверхность породами кунгурского яруса. Моноклиальное строение осложнено локальными структурами, например, Ясыльской с размерами в плане 2×3,5 км. Тектонические нарушения согласуются с карстово-эрозионной сетью приречных зон Ирени, Кунгура, логов и Ясыльского суходола. Сосредоточение карстовых вод связано с наиболее экологически опасными зонами повышенной трещиноватости и закарстованности пород, например, в лунежской пачке по правобережью Ирени, приподнятой относительно соликамского горизонта. В западной части правобережья Ирени они перекрыты рыхлыми неоген-четвертичными отложениями. Иренский горизонт на глубинах 70—150 м подстилается филипповскими доломитами. В его разрезе у с. Серьга Б.И. Грайфер [8; 12] выделил семь пачек отложений, в которых преобладают ангидриты, доломиты, известняки и гипсы. Мощность иренского горизонта в за-

падном крыле Уфимского вала не превышает 150—200 м, а в восточном достигает 350—400 м. Наибольшую экологическую опасность представляют карстовые процессы, развивающиеся в нем до глубины порядка 40 м. Соликамский горизонт на правом берегу Ирени развит спорадически, а на левом берегу образует меридиональную полосу мергелей, песчаников, глин, доломитов с прослоями гипсов и ангидритов мощностью до 42 м.

Неоген-четвертичные отложения представлены обвальным-карстовым горизонтом из щебня и дресвы сульфатов и карбонатов, сцементированных глинистым материалом мощностью от 2—3 до 20 м. Он перекрыт элювиально-делювиальными и аллювиальными суглинками и глинами с дресвой и щебнем коренных пород мощностью 0,5—6 м, а в карстовых суходолах — до 14 м. Мощность аллювия в пойме Ирени достигает 12,9 м.

**Гидрогеологические условия** этой территории охарактеризованы Е.А. Иконниковым, описавшим следующие водоносные горизонты [17]:

1) локально слабодоносный четвертичный аллювиальный горизонт в долинах рек. По Ирени у д. М. Ашар он имеет мощность 9,3 м и сложен мелкозернистыми песками и гравийно-галечным материалом. В скважине № 6 при понижении на 4,35 м от статического уровня 3,6 м и  $K_{\phi} = 8$  м/сут получен дебит вод 1,8 л/с сульфатно-кальциевого состава с минерализацией 2,1 г/л;

2) локально-водоносная соликамская терригенно-карбонатная свита с песчаниками, доломитами, известняками. На левом берегу Ирени две скважины вскрыли сульфатно-гидрокарбонатные воды с минерализацией до 1,0 г/л. Дебит скважины из известняков составил 10,5 л/с при понижении 3,6 м, а из мергелей — 3,6 л/с при понижении 14,7 м;

3) иренская карбонатно-сульфатная серия. Она водоносна по правому берегу при неглубоком залегании; при ее погружении на левом берегу Ирени она водупорна. Карстовые воды в ней развиты в лунежской гипсово-ангидритовой пачке, подстилаемой водупорной туюской карбонатной пачкой [18]. Их единое зеркало расположено на глубине 10—42,7 м. Дебиты родников варьируют от небольших до 50 л/с с минерализацией 2,1 г/л, а по Ясылу общий дебит их достигает 141,5 л/с. Ниже уреза воды в ручье минерализация вод хлоридно-сульфатного и сульфатно-хлоридного состава превышает 3 г/л.

**Инженерно-геологические условия районов эксплуатации газопроводов** весьма сложные. Максимович Г.А. [9; 7] на этой территории выделил следующие типы карста: голый с выходом пород на поверхность; задернованный; под элювиальный и под аллювиальный; закрытый, под соликамским горизонтом. На крутых склонах долин развиты карры, а в воронках — поноры. Плотность воронок растет на склонах долин, достигая участками 200 на 1 га. Эти участки наиболее экологически опасны. На водоразделах растет мощность покровных отложений, а плотность воронок снижается. Лукин В.А. и Ежов Ю.А. использовали зависимость закарстованности от защищенности пород от карста на схеме типизации территории с. Красный Ясыл, выделив пять типов площадей по устойчивости к карсту [14]. Эта схема отражает и степень экологической опасности соответствующих участков. Устойчивы водоразделы, перекрытые соликамскими отложениями, а слабо устойчивыми, и более экологически опасными являются площади с сульфатными

ми породами, карстово-обвальным горизонтом, полостями и воронками диаметром до 12 м. На участках закарстованных и трещиноватых пород формируются зоны сосредоточения трещинно-карстовых вод, экологически исключительно опасные.

Трансконтинентальные газопроводы пересекают карстовые депрессии, котловины и водотоки, вода в которых многократно исчезает в подземных полостях и появляется вновь при плотности воронок больше 200 на га [8]. Воронки бывают большие с диаметром 25—50 м, обычные — 5—25 м и небольшие — меньше 5 м. По глубине они бывают более 10 м, 5—10 м, обычные — 1—5 м и мелкие — до 1 м [7]. Последние две группы встречаются чаще.

**Вопросы экологической безопасности районов развития карстующихся пород** изучаются авторами на Урале с 1957 г., а в связи с трансконтинентальными газопроводами — с 1994 г. Газопроводы пересекают карстоопасные районы в бассейне р. Сылва на отрезке 1643—1580 км. Первые изыскания здесь в кратчайшие сроки выполнены Верхнекамтисизом в 1982 г. Его специалисты при большом количестве оговорок сделали вывод о принципиальной возможности строительства и эксплуатации газопроводов по этой трассе. Они игнорировали альтернативные варианты ее прокладки, которые предусматривались заданием института Гипроспецгаз. И газопроводы пересекли карстоопасные породы Предуралья шириной в 650 км с высокоаварийными и экологически опасными участками, аналогичными участкам железной дороги по Уфимскому косогору (1927 г.). Напомним, что никакие мероприятия не смогли тогда предотвратить высокой аварийности и экологической опасности на этой дороге, и ее пришлось перенести. Проложить газопроводы по другому маршруту можно и сегодня, но для этого необходимо более 100 млн долл. США.

Изыскания Пермгипроводхоза и Института карстоведения и спелеологии РГО РАН, как и Верхнекамтисиза, показали, что безаварийность газопроводов обеспечить возможно, но на экологически опасных участках надо создать дорогостоящую систему мониторинга с комплексом противоаварийных мероприятий. Верхнекамтисиз в 1982 г. по правобережью Ирени выделил шесть карстоопасных участков в сульфатных породах иренского горизонта. При строительстве газопроводов в 1983—1984 гг. на участке трассы в 5,4 км произошло 24 провала, а с 1986 г. этот показатель значительно увеличился [13]. Тем не менее, эксперты из Кунгурского стационара УрО РАН в 1996 г. заключили, что «наличие пустот не представляет опасности для газопровода», поскольку карстовый процесс в карбонатах затухает. К сожалению, гидрогеологические условия и наличие сульфатных пород в разрезе ими не были полностью учтены.

Карстовые процессы в регионах Урала протекают с герцинского цикла тектогенеза, когда кунгурские лагуны Предуралья были тектонически приподняты и стали поверхностью суши. Интенсивность карста за 230 млн лет менялась, и за это время мощность иренского горизонта в сводовой части Уфимского вала в 2—3 раза стала меньше, чем на восточном крыле структуры. В результате, на участке пересечения Уфимского плато трансконтинентальными газопроводами сформировались унаследованные, разновозрастные и многоэтажные подземные карстовые полости.

В районах тектонически унаследовано поднимающихся, карстовые полости (гроты) и пещерные ходы, по Г.А. Максимовичу [7; 9], начинают формироваться еще в гидродинамической зоне сифонной циркуляции, но интенсивное развитие их происходит при вовлечении пород в зону сезонных и многолетних колебаний уровня трещинно-карстовых вод. При вовлечении же в зону аэрации, они подвергаются старению и обрушению.

При тектоническом погружении подземные полости вовлекаются в условия более глубоких гидродинамических зон и частично или полностью заполняются продуктами карстово-суффозионных процессов (типа терра-роса) и продуктами размыва выше залегающих грунтов и почв. При неоднократной смене гидрогеологических циклов формируются многоэтажные карстовые системы. Основная часть полостей этих систем заполнена или продуктами обрушения, или аккумуляции. Для протяженных и жестких коммуникаций и сооружений основная опасность здесь заключается не столько в образовании провальных карстовых форм, сколько в формировании унаследованных площадных деформаций типа оседания или оседания-обрушения над зонами сосредоточения подземного и поверхностного стока и на примыкающих к ним приподнятых участках. Именно с этими участками связаны максимумы интенсивности и объема подземной химической денудации в переходной зоне. Самые крупные подземные полости и зоны разуплотнения пород, отмеченные ранее, формируются на приподнятых участках бортов долин и суходолов. Необходимо отметить, что каждой пещерной системе соответствует зона сосредоточения подземных трещинно-карстовых вод. Они формируют источники с крупными дебитами. Например, суммарный выход всех родников трещинно-карстовых вод в долине речки Мазуевка достигает 500 л/с.

## ВЫВОДЫ

В результате многолетних исследований негативных карстовых процессов, сопровождающихся формированием поверхностных и подземных карстовых форм, в том числе мульд оседания-обрушения, установлено, что в их формировании ведущую роль играют унаследованные положительные неотектонические движения. Каждой пещерной системе соответствует зона сосредоточения карстовых вод с крупными источниками.

Негативные геодинамические процессы препятствуют социально-экономическому развитию территорий. Для их минимизации требуются соответствующие мероприятия. На основе использования комплекса наземно-дистанционных методов, гидрогеологических и геолого-геофизических материалов и новых данных о карстовых процессах, картографической и аналитической оценки ситуации, экспериментальных, лабораторных и расчетно-графических методов разработана методика прогноза аварийно-опасных карстовых процессов, предусматривающая оперативное слежение, как за блоками крстующихся пород, так и за техническим состоянием газопроводов, сооружений и коммуникаций. Это открывает возможность организации безаварийной работы даже таких сложных сооружений, как трансконтинентальные газопроводы. Безопасность работы обеспечивается предложенной авторами статьи системой карстолитомониторинга с комплексом мероприятий по минимизации негативных процессов.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Вернадский В.И.* История природных вод. М.: Наука, 2003. 751 с.
- [2] *Вернадский В.И.* Биосфера. М.: Мысль, 1967. 376 с.
- [3] Основы гидрогеологии. Т. 1: Общая гидрогеология / Е.В. Пиннекер, Б.И. Писарский, С.Л. Шварцев [и др.]. Новосибирск: Наука, 1980. 232 с.; Т. 6: Использование и охрана подземных вод / под ред. Н.А. Маринова и Е.В. Пиннекера. Новосибирск: Наука, 1983. 230 с.
- [4] Экологические основы водохозяйственной деятельности (на примере Оренбургской области и сопредельных районов): монография / А.Я. Гаев, И.Н. Алферов, В.Г. Гацков [и др.]. Пермь: Изд-во Пермского ун-та, 2007. 327 с.
- [5] *Гаев А.Я.* Гидрогеохимия Урала и вопросы охраны подземных вод. Свердловск: Изд-во Уральского ун-та, 1989. 368 с.
- [6] *Килин Ю.А.* Оценка гидрогеологических условий при освоении закарстованных территорий на примере северной части Уфимского плато: автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Пермь, 2003. 23 с.
- [7] *Максимович Г.А.* Основы карстования: учеб. пособие. Т. 1. Пермь: Перм. кн. изд-во, 1963. 444 с.; 1969. Т. 2. 529 с.
- [8] *Горбунова К.А., Андрейчук В.Н., Костарев В.П., Максимович Н.Г.* Карст и пещеры Пермской области. Пермь: Изд-во Пермского ун-та, 1992. 200 с.
- [9] *Максимович Г.А., Горбунова К.А.* Карст Пермской области. Пермь: Перм. кн. изд-во, 1958. 529 с.
- [10] *Андрейчук В.Н.* Техногенный карстогенез в горнодобывающих районах: автореф. дисс. ... д-ра геол.-мин. наук. Екатеринбург, 1995. 46 с.
- [11] *Гаев А.Я., Килин Ю.А., Чичелов В.А., Хасанов Р.Н.* Карстовые процессы в районах Предуралья // Газовая промышленность. 1998. № 3. С. 28.
- [12] Гидрогеология СССР. М.: Недра, 1970. Т. 13. 800 с.; 1972. Т. 14. 648 с.; 1972. Т. 15. 344 с.; 1972. Т. 43. 272 с.; 1973. Свод. том. Вып. 4. 278 с.
- [13] *Катаев В.Н.* Теория и методология структурно-тектонического анализа в карстоведении: автореф. дисс. ... д-ра геол.-мин. наук. Пермь, 1999. 45 с.
- [14] *Лукин А.В., Ежов Ю.А.* Крупномасштабное инженерно-геологическое районирование территории с. Красный Ясыл Пермской области / Карст нечерноземья: тез. докл. Пермь, 1980. С. 103—104.
- [15] Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста / под ред. И.А. Саваренского, Н.А. Миронова. М.: ПНИИИС Минстроя России, 1995. 166 с.
- [16] *Софраницкий П.А.* Восточная часть Русской платформы // Геология СССР. Т. 12. Ч. 1. М.: Недра, 1969. 696 с.
- [17] *Иконников Е.А.* Условия развития карста в северной части Юрюзано-Сылвинский депрессии // Гидрогеология и карстование. Вып. 6. Пермь. 1975. С. 51—55.
- [18] *Шимановский Л.А., Шимановская И.А.* Пресные подземные воды Пермской области. Пермь: Перм. кн. изд-во, 1973. 199 с.

© Гаев А.Я., Килин Ю.А., 2018

### История статьи:

Дата поступления в редакцию: 12.12.2017

Дата принятия к печати: 15.01.2018

### Для цитирования:

*Гаев А.Я., Килин Ю.А.* Об обеспечении экологической безопасности горнодобывающих районов на основе минимизации негативных карстовых процессов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2018. Т. 26. № 1. С. 35—51. DOI 10.22363/2313-2310-2018-26-1-35-51

**Сведения об авторах:**

*Гаев Аркадий Яковлевич* — доктор геолого-минералогических наук, профессор, академик РАЕН и МАНЭБ, профессор Оренбургского (ОГУ) и Пермского госуниверситетов, ведущий научный сотрудник ОНЦ УрО РАН, директор Института экологических проблем гидросферы, главный редактор межвузовского сборника «Гидрогеология и карстование». E-mail: gayev@mail.ru

*Килин Юрий Афонасьевич* — кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры динамической геологии Пермского национального исследовательского университета, заместитель директора Института карстования и спелеологии при Пермском университете. E-mail: yuakilin@mail.ru

## **ABOUT ENSURING OF ECOLOGICAL SAFETY IN MINE-EXTRACTIVE REGIONS ON THE BASE OF NEGATIVE KARST PROCESSES MINIMIZATION**

**A. Ya. Gayev<sup>1,2</sup>, Yu.A. Kilin<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Оренбургский научный центр УрО РАН  
11, Pionerskaya str., Orenburg, 460000, Russian Federation

<sup>2</sup> Orenburg State University of Russia

13, Pobeda ave., Orenburg, 460018, Russian Federation

<sup>3</sup> Perm State University, Institute of karstology and speleology in Russian geographical society  
15, Bukireva str., Perm', 614990, Russian Federation

Long investigations were fulfilled by authors in the region of Urals where ecological dangerous negative geodynamical karst processes are wide spread, because 40% of territory consists of limestone, dolomites, marls, gypsum, anhydride and stone salt. The solution of them by surface- and underground water form the karst landscape with formation of surface and underground shapes — karst depressions, hollows, craters, ravines, caves, etc. This formation occurs lengthwise of neotectonical disturbances and relaxed zones of earth crust, which have been forming hereditary and with positive sign. They expose and hydrogeologically activate fissure and cave systems forming the zones of karst water accumulation which may be large water reservoirs and simultaneously the places of high ecological danger for population and engineering infrastructure. These dangerous processes retard social economical development of territories. For its minimization and out of dangerous work of even so complicated construction as transcontinental gas pipe we suggest the methods of investigations and forecast and minimization of consequences of dangerous processes including the systems of monitoring and operate following the transformation of blocks of karsting rocks and technique conditions of constructions and communications. It's necessary to pay special attention on such neolandscape elements as troughs of settling-collapse which are the cause of the most ecologically dangerous negative geodynamical processes. All attention today is focused on depressional forms of karst which is supposed to be the main danger for crossing of them communications. On the boards of karst depressions near the watershed part of landscape profile the steep plots occur which is conditioned by disjunctive dislocations in connection with more energetic neotectonical raisings. The degree of danger is recommended to determine according the complex of methods including hydrogeochemical, using the parameter — relative module of underground chemical denudation in  $t/km^2$  on 1m. Technical monitoring was

firstly carried out in 1994—95 on karst dangerous plots, it consists of systematic measuring of tense condition of pipe metal. We established the regular intercommunication of deformations in rock massifs and in pipe metal. It contribute to timely realization of prophylactic measures for prevention of ecologically dangerous negative geodynamic processes.

**Key words:** negative geodynamic processes, karst processes, hydrogeology, technical monitoring, hydrosphere, neotectonic, zones of concentration of underground water

## REFERENCES

- [1] Vernadsky V.I. History of natural water. M.: Nauka, 2003. 751 p.
- [2] Vernadsky V.I. Biosphere. M.: Mysl, 1967. 367 p.
- [3] The fundamentals of hydrogeology. V. 1: General hydrogeology / E.V. Pinneker, B.I. Pisarsky, S.L. Shvartsev, etc. Novosibirsk: Nauka, 1980. 232 p.; V. 6: Utilization and protection of ground water / Edited by N.A. Marinov, E.V. Pinneker. Novosibirsk: Nauka, 1983. 230 p.
- [4] Ecological bases of water management (on the example of the Orenburg region and adjacent areas): monograph / A.Ya. Gaev, I.N. Alferov, V.G. Gackov et al. Perm: Perm Univ., 2007. 327 p.
- [5] Gayev A.Ya. Hydrogeochemistry of Urals and problems of ground water protection. Sverdlovsk: Publ. h. of Ural un., 1989. 368 p.
- [6] Kilin Yu.A. Estimation of hydrogeological conditions during the development of karst territories on the example of north part of Ufa plateau. Autosummary of dis. of cand. Geol.-min. sc. Perm un. Perm, 2003. 23 p.
- [7] Maximovich G.A. Fundamentals of karstology: Manual. V. 1. Perm: Perm publ. h., 1963. 444 p.; 1969. V. 2. 529 p.
- [8] Gorbunova K.A., Andreychuk V.N., Kostarev V.P., Maximovich N.G. Karst and caves of Perm oblast. Perm: Publ. h. of Perm un., 1992. 200 p.
- [9] Maksimovich G.A., Gorbunova K.A. Karst of the Perm region. Perm: Perm. publishing house, 1958. 529 p.
- [10] Andreychuk V.N. Technogenous karstogenes in mine-extracting regions. Autosummary of dis. d.g.-m. sc. Ekaterinburg, 1995. 46 p.
- [11] Gaev A.Ya., Kilin Yu.A., Chichelov V.A., Khasanov R.N. Karst processes in the areas of the Urals // Gas industry. 1998. No. 3. P. 28.
- [12] Hydrogeology of the USSR. M.: Nedra, 1970. V. 13. 800 p.; 1972. V. 14. 648 p.; 1972. V. 15. 344 p.; 1972. V. 43. 272 p.; 1973. Consolidated volume. Issue 4. 278 p.
- [13] Katayev V.N. Theory and methodology of structure-tectonical analysis in karstology. Autosummary dis. d. g.-m. sc. Perm, 1999. 45 p.
- [14] Lukin A.V., Yezhov Yu.A. Large-scale engineer-geological division into districts of territory v. Krasny Yasyl in Perm oblast // Karst of nechernozemie: Thes. rep. Perm, 1980.
- [15] Manual to engineer-geological research in karst regions // Edited by I.A. Savarensky, N.A. Mironov. M.: PNIIS of Minstroy of Russia, 1995.
- [16] Sofronitsky P.A. East part of Russian platform // Geology of USSR. M.: Nedra, 1969. V. 12. P. 1.
- [17] Ikonnikov E.A. Conditions of karst development in north part of Yuryusan-Sylva depression // Hydrogeology and karstology. Issue 6. Perm. 1975. P. 51—55.
- [18] Shimanovsky L.A., Shimanovskaya I.A. Fresh ground water of Perm oblast.

### Article history:

Received: 12.12.2017

Revised: 15.01.2018

### For citation:

Gayev A.Ya., Kilin Yu.A. (2018) About ensuring of ecological safety in mine extractive regions on the base of negative karst processes minimization. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 26 (1), 35—51. DOI 10.22363/2313-2310-2018-26-1-35-51

**Bio Note:**

*Gayev Arkadij Yakovlevich* — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor. Academician of the International Academy of Ecology, Man and Nature Protection Sciences, Academician of the RAEN. Professor in the Orenburg State University, Professor in the Perm State University. Director of the Institute of Ecological Problems of the Hydrosphere at the Orenburg State University. Chief redactor of the editor-in-chief of interuniversity collection “Hydrogeology and karst studies”. E-mail: gayev@mail.ru

*Kilin Yuriy Afonas'evich* — candidate of of Geological and Mineralogical Sciences, associate professor at the Department of dynamic Geology and hydrogeology of Perm State University. Deputy Director, Institute of karstology and speleology in Russian geographical society, Perm state University. E-mail: yuakilin@mail.ru