

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**Пермский государственный
национальный исследовательский университет**

Институт карстоведения и спелеологии

Российский союз гидрогеологов

ПОСВЯЩАЕТСЯ

**памяти В. Н. Катаева (1956–2022),
заведующего кафедрой динамиче-
ской геологии и гидрогеологии**

**Пермского государственного
национального исследовательского
университета**

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И КАРСТОВЕДЕНИЕ

Выпуск 21

Межвузовский сборник научных трудов



Пермь 2023

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGER EDUCATION

Perm State University

Karstology and Speleology Institute

Russian Union of the Hydrogeologists

DEDICATED to memory
of V. N. Kataev (1956–2022),
Head of Department of Dynamic
Geology and Hydrogeology
of Perm State University

HYDROGEOLOGY AND KARSTOLOGY

Volume 21

Proceeding Interuniversity Collection



Perm 2023

УДК 551.49
ББК 26.35
Г464

Гидрогеология и карстоведение : межвузовский сборник
Г464 научных трудов / отв. ред. В. В. Фетисов ; Пермский государствен-
ный национальный исследовательский университет. – Пермь, 2023.
– Вып. 21. – 145 с.

ISBN 978-5-7944-1587-2
ISBN 978-5-7944-4042-3 (вып. 21)

В сборнике представлены материалы научных исследований сотруд-
ников ПГНИУ, Института карстоведения и спелеологии ПГНИУ, членов
Российского союза гидрогеологов. Сборник включает разделы по пробле-
мам гидрогеологии, гидрогеохимии, карстоведения, инженерной геологии
и геоэкологии.

УДК 551.49
ББК 26.35

*Печатается по решению ученого совета геологического факультета
Пермского государственного национального исследовательского университета*

Издание осуществлено при поддержке Пермского научно-образователь-
ного центра «Рациональное недропользование», 2023

*Редакционная
коллегия:*

А. Я. Гаев (гл. редактор), *В. В. Фетисов* (отв. редактор),
И. И. Минькевич (секретарь), *Ю. А. Килин* (ПГНИУ), *Ю. Г. Бо-
гомолов* (Российский союз гидрогеологов), *И. Н. Алферов*
(ИЭ УрО РАН)

Рецензенты:

зав. лабораторией гидрогеологии Института земной коры
СО РАН, д-р геол.-минерал. наук **С. В. Алексеев**;
зав. кафедрой гидрогеологии, инженерной геологии и геоэко-
логии Уральского государственного горного университета,
д-р техн. наук, профессор **С. Н. Тагильцев**

ISBN 978-5-7944-1587-2
ISBN 978-5-7944-4042-3 (вып. 21)

© ПГНИУ, 2023

UDC 551.49
LBC 26.35

Hydrogeology and Karstology: Interuniversity collection of scientific papers / Executive editor V. V. Fetisov ; Perm State University. – Perm, 2023. – Vol. 21. – 145 p.

ISBN 978-5-7944-1587-2
ISBN 978-5-7944-4042-3 (Vol. 21)

The collection presents materials of scientific research of employees of the Perm State University, the Institute of Karst and Speleology at PSU, and members of the Russian Union of Hydrogeologists. The collection includes sections on problems of hydrogeology, hydrogeochemistry, karst, engineering geology and geoecology.

UDC 551.49
LBC 26.35

*Published by the decision of the Scientific Council
of the Geological Faculty of Perm State University*

The publication was supported by the «Perm Scientific and Educational Center «Rational Subsoil Use», 2023

Editorial Board: *A. Ya. Gayev* (editor), *V. V. Fetisov* (executive editor), *I. I. Minkevich* (secretary), *Yu. A. Kilin* (PSU), *Yu. G. Bogomolov* (Russian Union of the hydrogeologists), *I. N. Alferov* (IE UB RAS)

Reviewed by: Head of the Laboratory of Hydrogeology of the Institute of the Earth's Crust SB RAS, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences ***S. V. Alekseev***;
Head of the Department of Hydrogeology, Engineering Geology and Geoecology of the Ural State Mining University, Doctor of Technical Sciences, Professor ***S. N. Tagiltsev***

ISBN 978-5-7944-1587-2
ISBN 978-5-7944-4042-3 (Vol. 21)

© Perm State University, 2023



Валерий Николаевич Катаев
(17.04.1956 – 16.11.2022)

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий сборник «Гидрогеология и карстоведение», выпуск 21 посвящен памяти заведующего кафедрой динамической геологии и гидрогеологии Пермского государственного национального исследовательского университета, профессора Валерия Николаевича Катаева. Валерий Николаевич заведовал кафедрой с 2001 по 2022 г. Он является представителем Пермской научной школы карстоведения. Сфера научных интересов В.Н. Катаева связана с геологией, гидрогеологией, гидрохимией карста, карстогенезом, структурно-тектоническим анализом карстовых массивов, динамическими процессами в геологии, инженерным карстоведением. В.Н. Катаев автор более 200 публикаций, среди которых монографические издания: «Методология и практика сравнительно-оценочного карстологического районирования», 2001 г.; «Основы структурного карстоведения», 2004 г.; «Подземные воды города Перми» (в соавторстве), 2006 г.; «Геология и карст города Кунгура» (в соавторстве), 2010 г.

Сборник «Гидрогеология и карстоведение» продолжает научные традиции кафедры динамической геологии и гидрогеологии, Института карстоведения и спелеологии Пермского университета и включает следующие разделы: «Проблемы гидрогеологии», «Проблемы гидрогеохимии и гидрогеоэкологии», «Проблемы карстоведения и инженерной геологии», «Потери гидрогеологической науки». В первый раздел включены статьи по гидрогеологии Пермского края, Воронежской области и Башкирского газонефтеводоносного комплекса Среднего Предуралья. Второй раздел содержит статьи, связанные с нефтяным загрязнением, очисткой шахтных вод, одна из работ посвящена научному наследию геолога-эколога А.Н. Павлова. Третий раздел сборника включает статьи, посвященные исследованию карста на Южном Урале и Предуралье, в Западной Фергане, Антарктике, а также по методике оценки карстоопасности и карстологическому прогнозу. В сборник включены справки-некрологи сотрудников кафедры динамической геологии и гидрогеологии.

ПАМЯТИ КАРСТОВЕДА ПРОФЕССОРА В.Н. КАТАЕВА



Карстование как наука о карстосфере разрабатывается в пермской научной школе с 1934 г. Основателем школы и первым заведующим кафедрой динамической геологии и гидрогеологии был Георгий Алексеевич Максимович (1904–1979 гг.), его продолжателями стали И.А. Печеркин (1928–1991 гг.), Л.А. Шимановский (1930–1993 гг.). Л.А. Шимановский являлся заведующим кафедрой с 1979 по 1993 г. А.Я. Гаев руководил кафедрой с 1993 до 2002 г. Четвертым заведующим стал Валерий Николаевич Катаев (1956–2022 гг.). А.Я. Гаев, планируя возвращение на работу в Оренбург, передал кафедру своему

молодому приемнику Валерию Николаевичу Катаеву в канун 2002 г. По рейтингу Минобрнауки в подготовке специалистов по гидрогеологии и инженерной геологии кафедра в этот период делила по Минвузу первое место с ЛГУ. Валерий Николаевич на посту заведующего показал качества, необходимые крупному руководителю и главе всемирно известной пермской школы гидрогеологов и карстоведов. Вместе с крупнейшими представителями пермской школы, под руководством В.Н. Катаева была продолжена разработка фундаментальных и прикладных проблем карстования в составе группы карстоведов В.Н и Г.Н. Дублянских, В.П. Костарева, В.В. Толмачева и др.

Родился Валерий Николаевич Катаев в 1956 г. в г. Кизеле Пермской области. В 1979 г. окончил геологический факультет Пермского университета по специальности «Гидрогеология и инженерная геология». Являлся учеником профессора И.А. Печеркина и доцента К.А. Горбуновой. С 1979 по 1982 г. работал инженером, а затем младшим научным сотрудником лаборатории комплексных исследований водохранилищ Естественнонаучного института при Пермском университете. В 1980–1981 гг. был руководителем экспедиционных работ по изучению экзогенных процессов на берегах Камских водохранилищ. В период 1982–1984 гг. учился в очной целевой аспирантуре университета при кафедре инженерной геологии. В этот

же период продолжал возглавлять полевые экспедиционные работы кафедры в карстовых районах Урала, Беломоро-Кулойского плато, Приднестровской Подолии, Кавказа, Крыма. В 1984 г. защитил кандидатскую, а в 1999 г. – докторскую диссертацию на тему «Теория и методология структурно-тектонического анализа в карстоведении». С 1984 по 2000 г. прошел путь от ассистента до профессора. В 1990–1991 гг. стажировался в Великобритании, в Оксфордском университете в Департаменте наук о Земле по проблемам изучения карстовых массивов. С 1988 по 1991 г. работал ученым секретарем Комиссии по карсту и спелеологии научного совета по инженерной геологии и гидрогеологии отделения геологии, геофизики, геохимии АН СССР. С 2002–2022 гг. руководил работой кафедры динамической геологии и гидрогеологии.

В.Н. Катаев автор более 200 научных публикаций, учебных и учебно-методических пособий в области общего, регионального, инженерного карстоведения и гидрогеологии карста. Член редакционных коллегий межвузовских сборников научных трудов «Пещеры» и «Гидрогеология и карстоведение». По итогам 1999 г. стал лауреатом Пермского университета по научной работе.

Создание карстоведения как науки тесно связано с именами Георгия Алексеевича Максимовича и Клары Андреевны Горбуновой, с их многочисленными учениками и коллегами по Пермской школе карстоведения и спелеологии. И среди них одно из первых мест занял Валерий Николаевич Катаев. При кафедре динамической геологии и гидрогеологии профессором Г.А. Максимовичем в 1964 г. был создан общественный Институт карстоведения и спелеологии (ИКС). Институт является одним из семи в мире центров по исследованиям карста.

За 58 лет сотрудники ИКС сделали около 5000 докладов и сообщений не только в России, но и на всех континентах планеты, оказали более тысячи консультаций, опубликовали около 4800 статей. Институтом опубликовано 20 выпусков сборника «Гидрогеология и карстоведение», 29 выпусков сборника «Пещеры». Исключительно активная деятельность Г.А. Максимовича в области наук о Земле в течении почти пятидесяти пяти лет продолжается и сегодня его многочисленными учениками, и последователями, которые к его научному наследию в количестве более 550 научных публикаций уже сегодня опубликовали более 10 тысяч работ, укрепив позиции всемирно известной научной школы.

Прошли десятки лет, как пермская школа существует и активно работает уже без своих организаторов. Сами науки о Земле ушли далеко вперед, но к чести наших ученых, их исследования не отстали от требований времени.

Леонид Андреевич Шимановский, возглавлявший кафедру с 1979 по 1993 г., впервые выполнил гидрогеологическое картографирование всей

территории Пермской области в масштабе 1:500000 и частично в 1:200000. В 1993 г. его сменил выпускник кафедры А.Я. Гаев в сложный период, когда из 8 преподавателей на кафедре оставалось 4 человека. Кроме кадровых проблем помещение кафедры находилось в полуразрушенном состоянии. Поэтому необходимо было не только подобрать кадры, но и отремонтировать помещения кафедры. Эти задачи с большим трудом были решены, и кафедра постепенно возвратилась к своему нормальному функционированию. Работать на кафедру пришли ее выпускники: кандидаты наук Е.А. Иконников, Г.К. Михайлов, Э.А. Аликин и др. Вновь оживилась работа Института карстоведения и спелеологии, возобновились публикации материалов в сборниках научных трудов «Гидрогеология и карстоведение», а совместно с кафедрой инженерной геологии сборников «Пещеры». На кафедре возобновилась подготовка кадров высшей квалификации. Защитили кандидатские диссертации И.И. Минькевич, Ю.А. Килин, В.В. Фетисов, И.В. Щукова и др., доктором наук стал В.Н. Катаев. Кафедра готовила кадры не только для России, но и для республик СНГ. Из Таджикистана защитили докторские диссертации С.Я. Абдурахимов и А.И. Рахимов, кандидатом наук стала Д.Н. Саидова.

В конце 2001 г. А.Я. Гаев отказался от участия в очередном конкурсе и рекомендовал на должность заведующего кафедрой более молодого и перспективного Валерия Николаевича Катаева в связи с планами возвращения на работу в Оренбургский политехнический институт (в н.вр. университет). По просьбе руководства ПГНИУ А.Я. Гаев остался работать по совместительству на своей родной кафедре. В этот период университетом был введен в строй новый учебный корпус, и кафедра получила новые просторные помещения с аудиториями и лабораториями. При их оснащении проявились организационные способности В.Н. Катаева.

Сфера научных интересов Валерия Николаевича была обширной: геодинамические процессы, гидрогеохимия карстовых массивов, карстогенез. Он являлся лидером научных направлений «Геоэкология городов. Разработка теории и методологии пространственно-временных прогнозов опасных геологических процессов в пределах градопромышленных агломераций», «Разработка теоретических основ формирования ресурсов, режима и состав подземных вод и современных методов поисков разведки и оценки эксплуатационных запасов месторождений подземных вод».

В течение всего периода работы в ПГНИУ В.Н. Катаев активно занимался научной и координационной работой по вопросам гидрогеологии и карстоведения. Он являлся ученым секретарем Комиссии по карсту и спелеологии научного совета по инженерной геологии и гидрогеологии отделения геологии, геофизики, геохимии АН СССР, 1988–1991 гг., членом редакционных коллегий межвузовских научных сборников «Гидрогеология и

карстоведение», «Пещеры», членом трех диссертационных советов Пермского государственного университета и Уральского государственного горного университета, членом комиссии по предупреждению, ликвидации чрезвычайных ситуаций и обеспечению пожарной безопасности Пермского края при Министерстве природных ресурсов Пермского края, членом российской национальной группы Международной ассоциации по инженерной геологии и охране окружающей среды (IAEG) при Комитете геологов России, с 2009 года.

А.Я. Гаев

УДК 556.3

Белкин П.А., Ваганов С.С., pashabelkin@mail.ru, vaganov_ss@mail.ru
*Пермский государственный национальный исследовательский университет,
г. Пермь, Россия*

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РОДНИКОВОЙ РАЗГРУЗКИ В БАССЕЙНЕ Р. БЕРЕЗОВАЯ (ПЕРМСКИЙ КРАЙ)

Приводятся результаты исследований родниковой разгрузки в бассейне р. Березовая (Пермский край). Исследования проводятся в рамках летней гидрогеологической практики студентов Пермского государственного университета. Результаты работ актуализируют гидрохимические параметры подземных вод верхнего гидрогеодинамического этажа, а также приводят новые сведения о содержании микроэлементов в донных осадках субаквальных родников, полученные с применением современной лабораторно-аналитической базы ПГНИУ.

Ключевые слова: родниковая разгрузка, река Березовая, субаквальный источник, гидрохимический режим

Belkin P.A., Vaganov S.S., pashabelkin@mail.ru, vaganov_ss@mail.ru
Perm State University, Perm, Russia

RESULTS OF SPRING DISCHARGE RESEARCH IN THE BEREZOVAYA RIVER BASIN (PERM KRAI)

The article presents the results of studies of spring discharge in the basin of the Berezovaya River (Perm Krai). The studies were conducted during the summer hydrogeological practice of students of Perm State University. The results of the research update the hydrochemical parameters of groundwater of the upper hydrogeodynamic stage, as well as provide new details on the content of trace elements in the bottom sediments of subaquatic springs, obtained with the use of modern laboratory-analytical base of the Perm State University.

Keywords: spring discharge, Berezovaya River, subaquatic spring, hydrochemical regime

Введение

Изучение родниковой разгрузки является весьма информативным и доступным в практическом отношении методом гидрогеологических исследований. Описание естественных выходов подземных вод позволяет получить сведения о закономерностях питания, циркуляции и разгрузки подземных вод зоны дренирования [8]. Более конкретными задачами изучения родников являются выявление закономерностей гидродинамического, температурного и гидрохимического режимов подземных вод, оценка роли

подземного питания в общем балансе вод поверхностных водоемов и водотоков. Целенаправленные исследования родниковой разгрузки особенно полезны при гидрогеологических работах в пределах труднодоступных и малонаселенных регионов, где использование буровой техники является крайне затратными. Наряду с источниками, разгружающимися на поверхности земли (субаэрально), выделяют субаквальные источники. Разгрузка подземных вод в виде подводных родников со дна рек и озер особенно характерна для областей распространения карстовых пород [1,3]. На отдельных участках такая скрытая разгрузка может являться ведущим фактором формирования стока рек. Так, в бассейне р. Вишеры описаны группы подводных родников, увеличивающие расход реки более чем на 50% и приводящие к существенным изменениям гидрохимического состава речных вод [16].

Гидрогеологические исследования в долинах рек Пермского края, в том числе изучение и опробование родниковой разгрузки, являются важной частью учебной специализированной практики по гидрогеологии студентов геологического факультета Пермского государственного национального исследовательского университета. Под научным руководством В.Н. Катаева и Ю.А. Килина, с участием студентов проведены многочисленные исследования, в первую очередь, в зонах распространения карстующихся пород в пределах Прикамья. Так, были изучены и подробно описаны водопроявления в пределах Кишертского карстового района [6, 7], Мазуевской карстовой депрессии [9], подземные воды иренского водоносного комплекса в пределах бассейна одноименной реки [15] и др.

Одним из наиболее интересных, но также и труднодоступных участков проведения гидрогеологической практики является долина р. Березовой – правого притока р. Колвы. На этой территории расположены уникальные природные объекты: особо охраняемая природная территория Пермского края «Березовский камень» [14] и Березовский радоновый источник, включенный в перечень гидрогеологических памятников Пермского края [5].

Экспедиции в долину р. Березовой осуществлялись в 2012 и 2021 г. В июле 2012 года был изучен участок реки протяженностью 83 км от н. п. Вижай до н. п. Булдырья. Исследования включали в себя поиск субаквальной разгрузки непосредственно в русле, а также в пойме реки. Поиск родников осуществлялся с катамарана методом визуального наблюдения, а также с помощью методов термо- и резистивиметрии. В июне 2021 года был изучен участок реки протяженностью 45 км от н. п. Вижай до н. п. Валай. Исследования включали в себя поиск разгрузки подземных вод в пойме реки, а также исследования поверхностных вод р. Березовой и её крупнейших притоков на участке исследований.

Территория исследования

Район исследования – бассейн р. Березовая – расположен в северо-восточной части Пермского края, в административном отношении относится к Чердынскому городскому округу (рис.). Река Березовая является крупнейшим левым притоком реки Колвы (в свою очередь, крупнейшего правого притока р. Вишеры).

В геологическом отношении, согласно данным государственной геологической съемки масштаба 1:200 000, изучаемый район сложен рифейскими, нижнесилурийскими, верхнедевонскими, каменноугольными и нижнепермскими породами, а также четвертичными отложениями. В тектоническом отношении район расположен в пределах Западно-Уральской внешней зоны складчатости, главным образом, в пределах Щугорско-Вишерской структуры II порядка. Важную роль в тектоническом строении участка исследований играют разрывные нарушения (надвиги, взбросо-сдвиги), проявлявшиеся начиная с раннего мела.

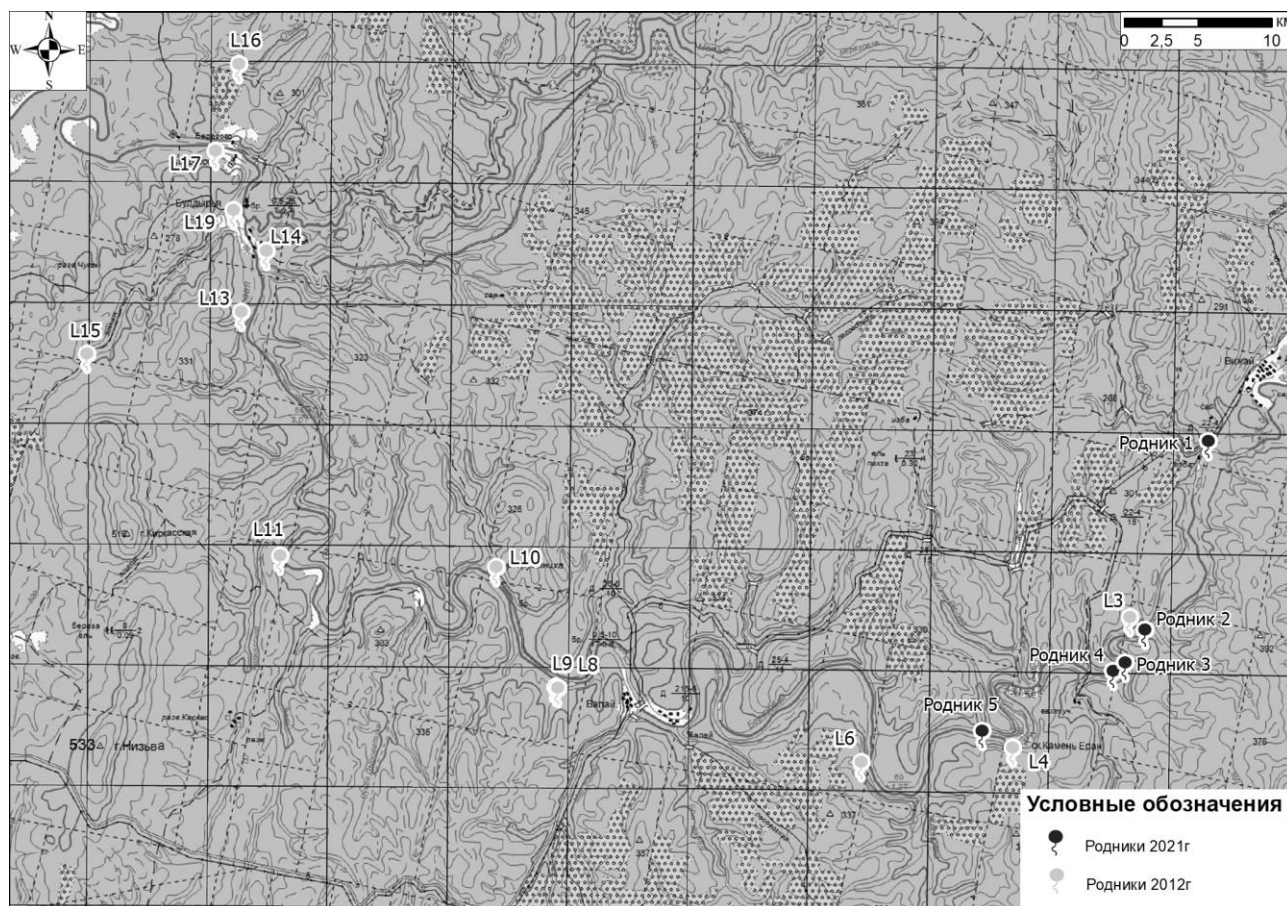


Рис. Схема размещения родников в бассейне р. Березовой

Согласно «Перечню бассейнов подземных вод территории СССР для ведения государственного водного кадастра», исследуемый район принадлежит Большеуральскому сложному бассейну корово-блоковых безнапорных и напорных вод. Для изучаемого района характерно двухъярусное

строение. Верхний гидрогеодинамический этаж охватывает зону экзогенной трещиноватости, где развит пластовый, блоково-пластовый, пластово-блоковый и корово-блоковый тип водовмещающих тел. Здесь наибольшим распространением характеризуются водоносные горизонты в каменно-угольных и нижнепермских отложениях. Нижний гидрогеодинамический этаж охватывает часть разреза с жильно-блоковым типом водовмещающих тел ниже зоны экзогенной трещиноватости, содержащий напорные воды преимущественно по тектоническим разломам.

Согласно схеме распространения карстующихся пород на территории Пермского края [11], исследуемая территория относится к Вишерскому и Средневишерскому карстовым районам. Из поверхностных карстовых форм встречаются поноры, воронки, исчезающие водотоки, суходолы. Наибольшее распространение имеют карстовые воронки. Диаметр их варьируется от 2–5 м до 80–100 м, глубина достигает 10–15 м. Подземные карстовые формы представлены пещерами, кавернами, карстовыми трещинами и другими подземными полостями.

Материалы и методы исследования

На *подготовительном (предполевом)* этапе были проанализированы фондовые [2, 10, 12] и опубликованные материалы [5, 13], определены точки наблюдения, включающие в себя известные зоны родниковой разгрузки подземных вод, выявленные в предшествующих исследованиях.

В состав *полевых исследований* родников входило проведение пространственной привязки, измерение температуры и кажущегося сопротивления воды, дебита источника, отбор проб воды на общий химический, микроэлементный, газовый (растворенные в воде H_2S и CO_2) и изотопный анализы, отбор проб донных отложений на водную вытяжку и микроэлементный анализ. Поиск зон субаквальной разгрузки производился с применением полевого терморезистивиметра.

Лабораторные исследования проводились в аккредитованных лабораториях Пермского государственного национального исследовательского университета. Для идентификации ионного состава вод применялась система капиллярного электрофореза «Капель». Анализ содержания общего железа в пробах воды осуществлялся фотометрическим методом. Определение микроэлементов (Li, Be, B, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Rb, Sr, Zr, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Cs, Ba, W, Tl, Pb, Bi) в пробах воды и донных осадков производилось в лаборатории Сектора наноминералогии геологического факультета ПГНИУ с применением масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS).

С применением перечисленных методов, на участке р. Березовой от н.п. Вижай до н.п. Булдырья в 2012 году были обнаружены и детально обследованы 8 субаквальных и 2 субаэральных источника в бассейне р. Березовой, а также зоны субаквальной разгрузки на реках Ошья и Лектым.

В ходе исследований летом 2021 года были исследованы 5 родников на участке р. Березовой от н.п. Вижай до н.п. Валай, в том числе четыре из них были обследованы впервые, один (родник 2) – повторно (соответствовал роднику L3, найденному в 2012 г.).

Анализ результатов

Результаты исследований 2012 г.

По результатам обследования и описания зон родниковой разгрузки, а также после сопоставления с материалами гидрогеологической изученности установлено, что обследованные родники приурочены к четырем водоносным комплексам. Вместе с этим, по данным анализа геоморфологической обстановки, данных структурно-тектонической изученности, произведена классификация родников по условиям выхода на поверхность. Результаты классификации приведены в таблице 1.

Данные, полученные в ходе экспедиции, были сопоставлены с материалами гидрогеологической изученности территории исследований. По результатам этих работ обобщена информация по более ранним опробованиям найденных родников, составлена база данных за период с 1961 г. Ниже приводится характеристика подземных вод водоносных подразделений с учетом проведенных работ и архивной информации.

К *водоносной локально-слабоводоносной нижнепермской карбонатной серии (сР₁)* относятся 5 обнаруженных родников: родники L3, L4, L8, L9 и L10. Родники являются пресными, минерализация колеблется в пределах 196-365 мг/дм³, дебиты родников варьируют в пределах от 0,2 до 6,5 л/с, температура изменяется в пределах от 3 до 5 °С, повышаясь в роднике L10 до 6,0-6,5 °С. По химическому составу воды преимущественно принадлежат к гидрокарбонатно-кальцевой фации. Исключение составляет родник L10, в котором наблюдается более высокое содержание сульфат-иона, фация сменяется на гидрокарбонатно-сульфатно-кальцевую.

В микрокомпонентном составе можно отметить несколько повышенное содержание урана в родниках L8 и L10, приуроченных к приразломным зонам.

Ретроспективный анализ показывает, что с 70-х годов XX века химический состав родников водоносной локально-слабоводоносной нижнепермской карбонатной серии не претерпел существенных изменений.

Таблица 1. Классификация родников по данным экспедиции 2012 г.

Родник	Гидрогеологическое подразделение	Литология	Структурно-тектонические условия	Условия выхода родника	Дебит, л/сек
L3	cP ₁	известняк	Дийский моноклиорий	эрозионный	0,5
L4	cP ₁	известняк	Сыпучинско-Потаскуевская мульда (синклиналь)	контактный	0,5
L8	cP ₁	известняк	Кременское поднятие (надвиг)	приразломный	0,2
L9	cP ₁	известняк	Кременское поднятие (надвиг)	приразломный	0,3
L10	cP ₁	известняк	Ошынская структура	приразломный	1,0-2,0
L11	cC ₂ (cC ₂₋₃)	известняк	Ошынская структура	контактный	3,5
L13	sP _{1s-ar}	песчаник	Ошынская структура	контактный	0,5
L14	sP _{1s-ar}	песчаник	Западный борт Ошынской структуры	эрозионный	1,0
L19	sP _{1s-ar}	песчаник	Ошынская структура	эрозионный	0,3
L15	cC _{1V3-S}	известняк	контакт Красновишерско-Ныробского надвига и Агафонинского взбросо-сдвига	приразломный	0,05
L16	cC _{1V3-S}	известняк	Березовская антиклиналь	приразломный	5,6
L17	cC _{1V3-S}	известняк	Березовская антиклиналь	приразломный	90,0

К водоносному сакмаро-артинскому терригенному комплексу (*sP_{1s-ar}*) принадлежат родники L13, L14 и L19. Родники являются пресными, минерализация колеблется в пределах 127-295 мг/дм³, дебиты родников варьируют в пределах от 0,3 до 1,0 л/с, температура изменяется в пределах от 4 до 5 °С, повышаясь в роднике L19 до 7,5 °С. По химическому составу воды преимущественно принадлежат к гидрокарбонатно-кальциевой фации. Исключение составляет родник L19, разгружающийся в н.п. Булдырья. Сравнительный анализ химического состава родника в 1963 г и в 2012 г позволяет сделать вывод, что воды родника претерпели значительное антропогенное преобразование, которое выражается в смене гидрохимической фации на гидрокарбонатно-кальциево-натриево-сульфатную, росте минерализации и содержания основных химических компонентов, в особенности иона NO₃.

Родник L11, приуроченный к водоносной зоне *средне-верхнекаменно-угольных отложений* $cC_2(cC_{2-3})$ характеризуется гидрокарбонатно-кальциевым составом с минерализацией 149 мг/дм³. Дебит при обследовании по результатам ретроспективного анализа не претерпел значительных изменений с 70 гг. XX века.

Родники L15, L16 и L17 приурочены к водоносной зоне *визейско-серпуховских карбонатных отложений* (cC_{1v3-s}). Эти родники приурочены к приразломным зонам, вследствие чего они обладают весьма различными характеристиками и химическим составом.

По данным обследования в июле 2012 г родник L15 имеет суммарный расход 0,1 л/с, температура составляла 8 °С. Химический состав воды характеризуется гидрокарбонатно-натриево-хлоридной фацией, согласно ОСТ 41-05-263-86 воды пресные, умеренно-щелочные, очень мягкие (жесткость изменяется от 0,27 до 0,61 мг-экв/дм³). В воде наблюдается повышенное содержание лития и бора (до 2,5 ПДК).

Родник L16 характеризуется гидрокарбонатно-кальциевой фацией, по данным нескольких наблюдений расход варьирует в пределах 5,6-10 л/с, минерализация изменяется от 270 до 313 мг/дм³.

Родник L17 (Березовский радоновый источник) характеризуется значительным дебитом (75-90 л/с), минерализация по данным нескольких опробований варьирует в пределах 1090-1250 мг/дм³. Химический состав родника подвержен незначительным изменениям. По данным обследований 1961 и 2012 гг. воды родника относились к хлоридно-натриево-гидрокарбонатной фации. По данным наблюдений 1973 г в роднике было зафиксировано повышенное содержание сульфат-иона, вследствие чего фация сменялась на хлоридно-натриево-гидрокарбонатно-сульфатную.

В состав исследований родников водоносной зоны визейско-серпуховских карбонатных отложений входил отбор проб донных отложений на микрокомпонентный анализ.

По данным исследований, содержание большинства микрокомпонентов находится в пределах кларкового. Повышенное содержание относительно кларка в осадочных породах [4] зафиксировано в роднике L15 по содержанию германия (в 1,4 раза), селена (2,8). В роднике L16 повышенные показатели отмечены по содержанию цинка (в 1,4 раза), кадмия (7,5). Кроме того, во всех родниках, приуроченных к визейско-серпуховским отложениям, отмечено некоторое превышение кларка по содержанию серебра (в 2,1-3,3 раза).

Результаты исследований 2021 г.

В ходе экспедиции в июне 2021 года произведено опробование родников *нижнепермской карбонатной серии* (cP_1), *сакмаро-артинского терригенного комплекса* (sP_{1s-ar}), *средне-верхнекаменноугольных терриген-*

ных и терригенно-карбонатных отложений $cC_2(cC_{2-3})$. Расходы исследованных родников составляли 5-12 л/с, температура воды от 4 до 6°C. Минерализация варьировала от 189 до 260 мг/дм³, закономерно снижаясь в родниках, выход которых осуществлялся из терригенных пород. Гидрохимическая фация всех родников, опробованных в 2021 г. – гидрокарбонатно-кальциевая.

Гидрохимические параметры исследованных водоносных подразделений по результатам опробования родникового стока, проведенного в 2012 и 2021 гг., а также с привлечением фондовых и опубликованных материалов за период с 1961 г., приведены в таблице 2.

Таблица 2. Гидрохимические параметры водоносных горизонтов по результатам исследования родниковой разгрузки, 1961–2021 гг.

Водоносный комплекс	Литолог. состав водовмещающих пород	Кол-во анализов	Минерализация, мг/дм ³	Температура, °C	Ph	Гидрохимические фации
			мин – макс	мин – макс	мин – макс	
			ср	ср	ср	
сР ₁	карбонатные породы	14	196,00-364,90	3,0-6,5	6,50-7,75	HCO₃-Ca (12) HCO₃-SO₄-Ca (2)
			258,19	4,3	7,33	
сC ₂ (сC ₂₋₃)	карбонатные и терригенные породы	6	149,00-280,00	3,5-7,0	6,88-7,90	HCO₃-Ca (6)
			216,60	4,6	7,47	
сР ₁ с-ар	терригенные породы	8	127,80-295,00	4,0-6,0	6,70-7,60	HCO₃-Ca (6) HCO₃-Ca-SO₄ (1) HCO₃-Ca-NO₃-SO₄ (1)
			218,44	4,9	7,28	
сC ₁ с ₃ -с	карбонатные породы	8	270,00-1250,00	4,5-14,0	6,70-8,75	HCO₃-Na-Cl (2) HCO₃-Ca (3) Cl-Na-HCO₃ (2) Cl-Na-HCO₃-SO₄ (1)
			691,17	8,1	7,58	

Выводы

В результате проведенных исследований описаны зоны родниковой разгрузки в среднем и нижнем течении р. Березовой. Полученные данные сопоставлены с результатами предыдущих исследований, проводившихся с 1960-х гг. Сопоставление данных указывает на постоянство гидрохимического режима родников. Изменению (росту концентрации нитрат-ионов) подвержены только родники, расположенные в населенных пунктах.

На основе изучения родниковой разгрузки актуализированы данные по гидрохимическим особенностям подземных вод водоносных горизонтов в каменноугольных и нижнепермских отложениях, имеющих на изучаемой территории наиболее широкое распространение.

С применением современных методов анализа опробованы донные отложения субаквальных карстовых источников в визейско-серпуховских отложениях. Установлено, что в таких отложениях происходит концентрация ряда элементов, таких как серебро, кадмий, селен, германий и цинк.

Авторы выражают благодарность В.Н. Катаеву за научное руководство, всестороннюю помощь и поддержку, в том числе в организации летних гидрогеологических практик.

Библиографический список

1. Блинов С.М., Щукова И.В., Батулин Е.Н. Субаквальные карстовые источники Пермского Приуралья: основы классификации // Естественные и технические науки. 2010 № 6 (50). С. 287–291.
2. Бобров Е.А., Осотский А.М. Гидрогеологическая карта Урала масштаба 1:500 000, южная половина листов Р-40-В и Р-40-Г. Отчет Пермской ГГП за 1961-1964 гг. Пермь, 1964.
3. Ваганов С.С. Опыт поисков и исследования источников подземных вод карстовых массивов, разгружающихся со дна рек и озер // Естественные и технические науки издательство. М.: «Спутник+» № 11 (113), 2017. С. 64–65.
4. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия, 1962, №7. С. 565–571.
5. Геологические памятники Пермского края: Энциклопедия / Под общ. ред. И.И. Чайковского; ГИ УрО РАН. Пермь, 2009. 616 с.
6. Катаев В.Н., Копанцева Е.Н., Ермолович И.Г. Современный химический состав вод озер зоны сочленения Уфимского вала и Предуральяского прогиба. Вестник Пермского университета. Геология. 2017. Т. 16. № 4. С. 340–353.
7. Килин Ю.А., Минькевич И.И. Гидрохимические исследования в Кисертском районе Пермского края // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. 2020. № 23. С. 318–323.
8. Климентов П.П., Кононов В.М. Методика гидрогеологических исследований: Учебник для геологоразведочных и горных вузов и факультетов. М.: Высш. школа, 1978. 408 с.
9. Крутик И.А., Килин Ю.А. Современный химический состав вод озер Мазуевской карстовой депрессии. Вестник Пермского университета. Геология. 2018. Т. 17. № 3. С. 245–251.
10. Куликов В.П. Отчет по результатам гидрогеологической съемки масштаба 1:200000 листов Р-40-XXVIII, XXXIV за 1987-1992 гг.: Отчет о НИР / Западуралгидрогеология; Пермь, 1992.

11. *Минерально-сырьевые ресурсы Пермского края: Энциклопедия* / Под общ. ред. А. И. Кудряшов; Горный институт УрО РАН. Пермь, 2006. 463 с.
12. *Михайлов Г.К.* Отчет по теме 3/73. Бассейн реки Колвы, Вишеры, масштаб 1:200000, 1975г.
13. *Михалев В.В., Шихов Н.И.* Березовский радоновый источник // Материалы региональной научно-практической конференции: «Геология и полезные ископаемые Западного Урала». Пермь: ПГУ, 2001. 227–229 с.
14. *Особо охраняемые территории Пермской области: Реестр/Отв. ред. С.А. Овеснов.* Пермь: Книжный мир, 2002. 464 с.
15. *Репин И.С., Ермолович И.Г.* Некоторые особенности методики исследования субаквальных карстовых источников на примере реки Ирень. // Геология в развивающемся мире: сборник научных трудов по материалам XI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. ПГНИУ, 2018. С. 251–254.
16. *Vaganov, S., Blinov, S., Belkin, P., Perevoshchikov, R.* The Role of Sub-aquatic Springs in the Formation of Flow, Temperature and Chemical Composition of River Water in the Reserve. Journal of Ecological Engineering. 2022, 23(3), P. 39–48.

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОССТАЮЩИХ ДРЕНАЖНЫХ СКВАЖИН НА МИХАЙЛОВСКОМ ГОКе

Представлены результаты исследований подземного дренажного комплекса железорудного карьера АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева». Установлено, что в целом система дренажа эксплуатируется в соответствии с проектом. Однако, в некоторых обследованных восстающих дренажных скважинах выявлены нарушения, что, в итоге, приводит к снижению эффективности работы всего дренажного комплекса, поэтому требуется их своевременное воспроизводство.

Ключевые слова: карьер, подземные воды, дренажный комплекс, восстающие скважины, видеометрия, разрушение скважины.

Khaustov V.V., Kushnerchuk V.V., khaustov@bsu.edu.ru

National Research "BelGU", Belgorod, Russia

SOME PROBLEMS OF OPERATION OF RISING DRAINAGE WELLS AT MIKHAILOVSKY GOK

The results of studies of the underground drainage complex of the iron ore open pit JSC Mikhailovsky Mining and Processing Plant named after A.V. Varicheva. It has been established that, in general, the drainage system is operated in accordance with the design. In some surveyed rising drainage wells, violations were revealed, which, as a result, leads to a decrease in the efficiency of the entire drainage complex, therefore, their consistent reproduction is required.

Keywords: quarry, groundwater, drainage complex, rising wells, videometry, well destruction.

Введение

Курская магнитная аномалия приурочена к Воронежской антеклизе Восточно-Европейской платформы; нижний структурный этаж относится к докембрийскому фундаменту платформы, верхний составляют полого залегающие осадочные толщи платформенного чехла. Железные руды приурочены к кристаллическому фундаменту, глубина залегания которого изменяется обычно в пределах 60...650 м [2].

Михайловский горнопромышленный район является частью железорудного бассейна, где сосредоточено около 13% запасов железных руд КМА. На Михайловском месторождении добыча железистых кварцитов и богатых железных руд осуществляется открытым способом [3].

Промышленное освоение Михайловского месторождения существенно изменило рельеф: образован крупный карьер площадью более 20 км², созданы многоярусные отвалы, а в долинах рек созданы технические водоемы – хвостохранилища, пруды-отстойники, водохранилища. Длина карьера по контуру вскрыши составляет 6,0 км, ширина – 2,6 км, глубина – 340 м, а протяженность замкнутого кольца горных выработок подземного дренажного комплекса (далее ПДК) вокруг карьера составляет 20,1 км. Горные работы ведутся в трех карьерах: центральном, соединительном и южном; северный карьер законсервирован и используется для складирования окисленных кварцитов. В связи со значительными размерами карьерного поля, а также для повышения экономической эффективности добычи руды его осушение осуществляется комбинированно-поверхностным и подземным способом [5].

Водоносные горизонты верхнего (надкелловейского) водоносного комплекса безнапорные, дренируются бортами карьера и гидрографической сетью. Осушение отложений комплекса, сбор дождевых и паводковых вод осуществляется с помощью прибортовых дренажных канав, длина которых в карьере, включая нагорные канавы, пройденные по периметру карьера, составляет более 60 км. Вода из дренажных канав отводится к отстойникам и зумпфам водосбросных скважин и по ним перепускается в горные выработки ПДК [8].

Водоносные горизонты нижнего (подкелловейского) водоносного комплекса в карьере осушаются комбинированно – системой насосных установок в карьере, для чего создана система подземных выработок и пробуренных из них восстающих скважин на все водоносные горизонты и дренажные узлы. ПДК включает 5 шахтных стволов и 67,4 км дренажных горных выработок (в обслуживании находятся 37,5 км штреков), расположенных в трех уровнях: горизонт +50 м, горизонт –20 м, горизонт –100 м [8].

Таким образом, шахтный водоотлив складывается из подземных вод, поступающих из восстающих скважин на батский водоносный горизонт и из трещинных зон кристаллических пород фундамента, а также из прибортового дренажа апт-сеноманского горизонта и сбора атмосферных осадков – поступающие в ПДК через перепускные скважины и от насосных установок открытого карьерного водоотлива.

Объемы шахтного водоотлива поверхностных и подземных вод за период 2016–2020 гг. представлены в таблице 1.

Распределение дренажных вод по водоносным горизонтам и по характеру использования приведено в таблице 2.

Как следует из таблиц 1 и 2, средний (за 5 лет) объем водоотлива из ПДК карьера составил более 21 млн. м³ воды. Максимальный объем сдренированных вод пришелся на 2020 г., минимальный на 2017 г., при этом доля подземных вод составила 79% от общего объема карьерного

водоотлива, талых и дождевых вод – 21%. Наиболее водообильным водоносным горизонтом является батский, из которого откачивается до 77% от объема всех подземных вод. Следует отметить, что опережающие выработки подземного дренажного комплекса позволили в районе действия карьера перевести напорные воды батского водоносного горизонта в безнапорные и ежегодно понижать их уровень [5].

Таблица 1. Объемы шахтного водоотлива за период 2016–2020 гг. (по материалам МГОК)

<i>№№ п/п</i>	<i>Годы</i>	<i>Водоотлив, м³</i>	<i>Подземные воды, м³</i>	<i>Поверхностные воды, м³</i>
1	2016	21 310 313	16 943 303	4 367 010
2	2017	20 491 736	16 155 214	4 336 522
3	2018	21 452 885	16 959 343	4 493 542
4	2019	20 765 733	16 497 845	4 267 888
5	2020	21 320 214	16 752 380	4 567 834
среднее		21 068 175	16 661 617	4 406 559
%		100	79	21

Основной объем дренажных вод используется на технические нужды комбината, сброс в речную сеть (среднее за 5 лет) составил 395729 м³ воды в год.

Таблица 2. Распределение дренажных вод по водоносным горизонтам и по характеру использования (по данным МГОК)

Водоносный горизонт	Кол-во от- каченной воды, м³	Использование по типу		Доля, %
		Производ- ственно-тех- ническое, м³	Сброс без использования м³	
Подземные воды				79
аптсеноманский	1 861 851	1 817 412	44 439	11
батский	12 818 173	12 512 227	305 946	77
девонский	182 114	177 767	4 347	1
архей- протерозойский	1 799 478	1 758 481	40 997	11
Итого	16 661 616	16 265 887	395 729	100
Поверхностные воды				21
Атм. осадки	4 406 559	4 301 756	104 803	
Всего шахта	21 068 175	20 567 643	500 532	

Осушение нижнего водоносного комплекса осуществляется системой подземных горных выработок и пробуренных из них восстающих скважин.

ПДК включает 2 шахтных ствола и дренажные горные выработки (67400 п.м), расположенные по периметру карьера. В 2002 г. введен в работу водосбросный штрек и насосная станция на горизонте –100 м, которая перекачивает воду на горизонт –20 м. Дренажные воды от насосных станций ПДК на горизонте –20 м поступают в коллектор перекачивающей насосной станции, расположенной у ствола шахты №5. «Перекачивающая насосная» оборудована 3 насосами и подает дренажные воды по трубопроводу в хвостохранилище.

Материалы и методы исследования

В процессе разработки карьера постоянно разрабатывались и совершенствовались эффективные способы дренажа водоносных горизонтов, рациональные конструкции скважин, обеспечивающие сохранение естественной проницаемости пласта, создавались новые типы фильтров, оценивалась эффективность погружных насосов, развивались методы гидрогеологических расчетов дренажных систем [2]. В результате был осуществлен переход на подземный способ осушения с сооружением дренажного штрека с восстающими скважинами по периметру карьера [10].

Высокоэффективный, экологически безопасный способ осушения месторождений на основе систем восстающих дренажных скважин, сооружаемых из подземных горных выработок и эксплуатируемый в режиме постоянного понижения уровня вод дренируемого горизонта был разработан ОАО «ВАОГЕМ» [5, 7, 9, 10]. Способ отлично себя зарекомендовал и широко внедрен, в том числе и в системе дренажа карьерного поля МГОКа [5].

В настоящее время защита карьера от подземных вод нижнего водоносного комплекса, представленного коллекторами юрских, девонских и докембрийских образований, из которых наиболее водообильными являются пески батского водоносного горизонта (77% от объема всех подземных вод), осуществляется с помощью восстающих дренажных скважин, пробуренных из подземных горных выработок ПДК.

В процессе эксплуатации восстающих дренажных скважин выяснилось, что некоторые из них частично или полностью выходят из строя с различным периодом времени функционирования. Для определения причин выхода из строя восстающих скважин авторами совместно с сотрудниками ОАО «ВАОГЕМ» выполнено их обследование с использованием средств фото- и видеофиксации.

Обследование производилось методом инспекции видеозондом ВСП-200D (рис. 1).

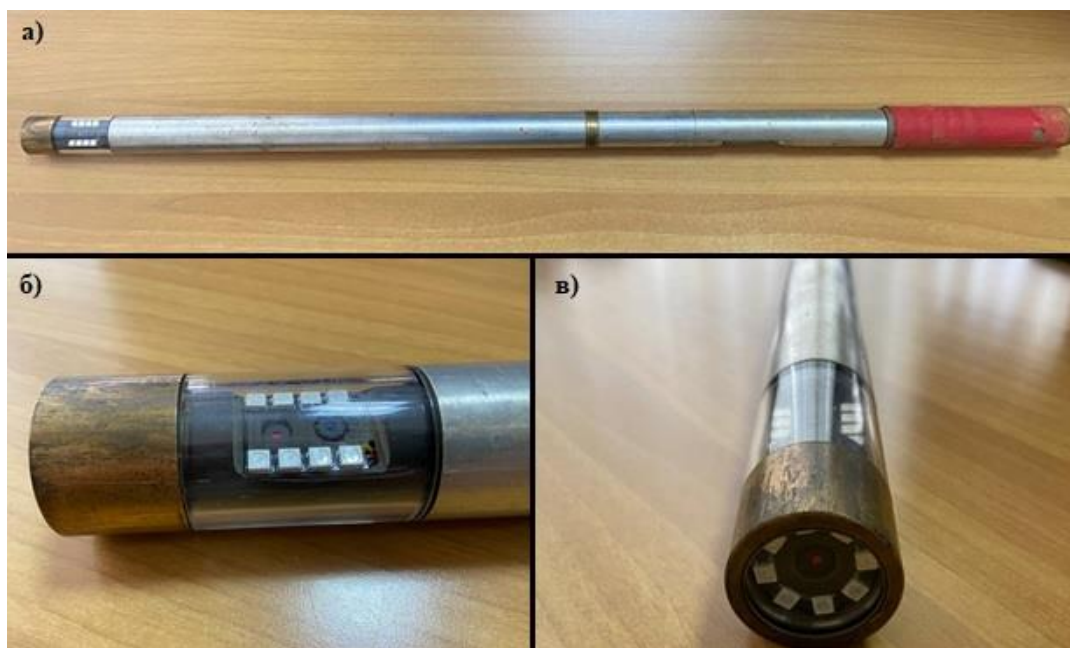


Рис. 1. Видеометрический скважинный прибор ВСП-200D
а) общий вид прибора; б) боковая видеокамера; в) фронтальная видеокамера.

Данный прибор предназначен для изучения скважин глубиной до 200 метров, в состав которого входят:

1. Фронтальная видеокамера разрешением 1000 tvl;
2. Боковая видеокамера, вращающаяся на 360 градусов, с разрешением 100 tvl, 5mp;
3. Процессор, принимающий команды от оператора, управляющий вращением боковой камеры, переключением между камерами, освещением, записью на flash-карту памяти фотографий;
4. Транслятор видеосигнала по кабелю UTP.

Зонд подается в восстающую скважину на высоту 100–130 м. средством механизации с цепным приводом через задвижку на пластиковых или алюминиевых штангах, наращиваемых замковым соединением (рис. 2).

Анализ результатов

По результатам рекогносцировочного обследования вышедших из строя дренажных скважин было выявлено, что в 9 из 22 скважин отсутствует возможность погружения прибора в связи с закрытой задвижкой, наличием полога и т.д. В доступных же 13 скважинах выполнено обследование стенок обсадной колонны при помощи видеометрии (табл. 3).

В ходе исследования скважин выявлены как смещения обсадных колонн, так и их разрывы (срез). Последние расположены в пределах аргиллитистых глин девонского возраста. Появление подобных разрывов связывается с геомеханическим и инженерно-геологическим факторами, и в первую очередь, в связи с набуханием глин при попадании в них воды из

батского водоносного горизонта. Кроме этого, вполне реально влияние сейсмического воздействия буровзрывных работ на геомеханические процессы в прибортовой зоне карьера. Разрывы обсадных колонн свидетельствуют о наличии сдвижений в слоях девонского возраста, что может служить основанием для расширения существующей сети глубинного геомеханического мониторинга.



Рис. 2. Подача зонда в скважину

В качестве примера приведем скважину В-391, пробуренную в западном штреке № 19 в 2011 г. на глубину 101 м. (см. табл. 3). Начальное бурение велось шарошечным долотом $\varnothing 151$ мм на глубину 3,1 п.м. Далее в скважину был установлен кондуктор $\varnothing 146$ мм, который был раскреплен в скважине согласно паспорту крепления кондуктора. Устье скважины оборудовано сальниковым устройством с задвижкой на отводе. Далее бурение велось шарошечным долотом $\varnothing 132$ мм до глубины 101 м. Батские пески были подсечены на 95 метре бурения. Скважина обсажена колонной труб $\varnothing 89$ мм, в интервале 95...101 м установлена фильтровая колонна длиной 6 п.м., состоящая из 5 щелевых фильтров по 1,2 м каждый (рис. 3).

Таблица 3. Скважины, обследованные при помощи видеозонда

№, п/п	Номер, дата введения в эксплуатацию, мм. гggg;	Дебит, м³/час	Дата останковки, гggg; дебит, м³/час	Крайняя вы-сотная точка съемки зонда, м	Абсолютная от-метка «пробки» в скважине, м	Литологический со-став и возраст отло-жений «пробки»	Наличие и характер повре-ждения обсадной трубы, абсолютная отметка точки разрыва, м	Продолжитель-ность функциони-рования, лет
Северо-центральный штрек №1								
1	В-132 08.1990	120	2015 0,10	55	63,2	D ₃ глина алевролитистая	Срез обсадной колонны 72,9	25
2	В-324 05.2004	10	2008 0,30	73	отсутствует	-	Срез обсадной колонны 76,6	4
3	В-351 09.2006	35	2020 0,20	8,5	18,4	D ₃ брекчия рудно-глини-стая	Срез обсадной колонны 56,4	14
Квершлаг ствола №6								
4	В-197 10.1992	80	2015 0,10	49	61,6	D ₃ глина алевролитистая	Срез обсадной колонны 78,6	23
5	В-299 04.2000	100	2021 1,0	50,5	64,95	D ₃ глина плотная	Срез обсадной колонны 85,45	21
6	В-315 04.2002	50	2018 0,50	34	46,78	D ₃ глина алевролитистая	Срез обсадной колонны 77,8	16
Западный штрек №19								
7	В-218 09.1993	20	2001 0,10	100	отсутствует	-	Срез обсадной колонны 71,1	8
8	В-391 07.2011	50	2016 0,30	71,5	57,5	D ₃ глина алевролитистая, пе-сок алевролитистый	Срез обсадной колонны 66,9	5
Юго-западный штрек								
9	В-253 08.1995	80	2014 0,0	68,5	57,8	D ₃ глины, алевролиты	Срез обсадной колонны 57,8	19
10	В-320 01.2003	50	2018 0,20	5,5	– 4,4	D ₃ глина алевролитистая	Срез обсадной колонны 65,2	15
Северо-западный штрек №2								
11	В-265 07.1996	100	2021 0,10	13	19,9	D ₃ пестроцветные глины	Срез обсадной колонны 72,1	25
12	В-267 08.1996	25	2014 0,30	49	55,2	D ₃ пестроцветные глины	Срез обсадной колонны 76,2	18
13	В-287 10.1998	20	2013 0,50	78	отсутствует	–	–	15

Назн. осушение J2bt
Бур. станок УДБ-8-01
Местонахождение Западный штрек №19

Начата 10.06.2011
Окончена 21.07.2011
Абс.отм. устья -14,1

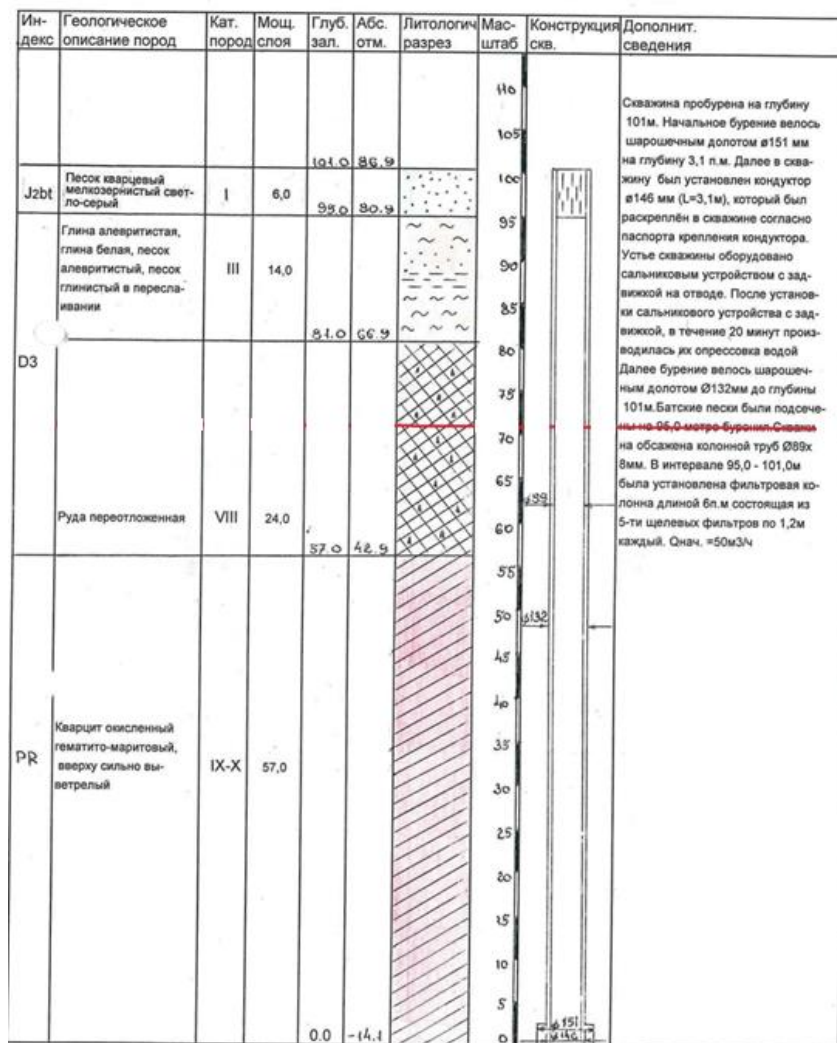


Рис. 3. Геолого-технический разрез скв. В-391
(красная линия указывает максимальную глубину погружения прибора в скважину)

Результат видеофиксации разрыва обсадной колонны скв. В-391 представлен на рисунке 4.



Рис. 4. Разрыв обсадной колонны скв. В-391

Снижение дебита во времени скважины В-391 представлено на графике (рис. 5).

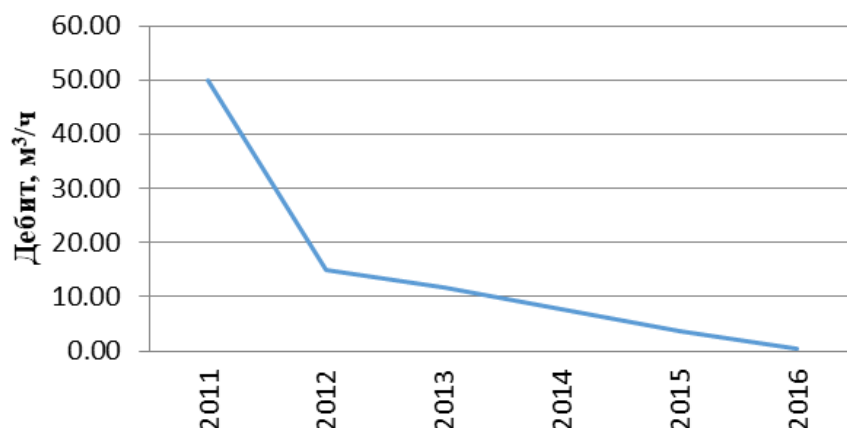


Рис. 5. График снижения дебита по годам скважины В-391

По снижению дебита скважины можно предположить, что разрыв обсадной колонны скважины произошел в 2012 г. (резкое падение дебита) и впоследствии происходила ее кольматация глинистыми образованиями вплоть до полного прекращения дренирования воды в 2016 году.

Анализ графиков дебита восстающих скважин позволил выявить скважины, расход которых уменьшался постепенно, и скважины с резким падением дебита. Снижение расхода объясняется кольматацией скважины глинистыми образованиями, образовавшихся в результате разрыва обсадной колонны и обводнением девонских глин с последующим их вымыванием в ствол скважины, в результате чего глинистый материал осаждался на стенках скважины и образовывались глинистые «пробки». Также постепенное снижение дебита некоторых скважин, вероятно, связано с повреждением фильтра, расположенного в пределах батского водоносном горизонте.

Кроме того, в результате разрыва обсадных колонн дренажных скважин оставшаяся в водоносном горизонте незакольматированная фильтровальная часть скважины обеспечивает дополнительную обводненность девонских отложений и зоны дезинтеграции скального горного массива, что может отражаться на снижении их физико-механических характеристик. По мере выхода из строя восстающих дренажных скважин происходит процесс дополнительного обводнения затрубного пространства в течении всего времени их эксплуатации.

Выводы

Таким образом, натурные исследования восстающих дренажных скважин ПДК МГОКа впервые выявили ранее неизученные деформации их обсадных колонн с последующим выбыванием дрен из строя. Безусловно, это приводит к снижению эффективности работы всего ПДК, поэтому требуются усилия по последовательному воспроизводству утраченных восстающих дренажных скважин. В этой связи намечены следующие направления исследований:

- совершенствование конструкции фильтровых колонн с подбором фильтровой зоны для недопущения прорывов воды и выноса обводненных пород по стволу скважины;
- изготовление фильтров без термической обработки, что увеличит заданную первоначальную скважность, целостность и водопропускную способность установленного фильтра;
- увеличение частоты мониторинга дренажных скважин, в частности дебита для наиболее точного определения времени их деструкции;
- расширение области исследований геомеханических процессов в пределах всего прибортового массива по дополнительной сети глубинного геомеханического мониторинга с увеличением ее заглубления вплоть до зоны выявленных разрывов обсадных колонн;
- разработка численных геомеханической и гидрогеологической моделей в пределах исследуемых массивов горных пород с учетом дополнительной обводненности зоны дезинтеграции скального горного массива по причине вышедших из строя восстающих дренажных скважин [1, 4, 6];
- пролонгация видеообследований всех доступных для мониторинга восстающих дренажных скважин в пределах всего ПДК в целях геометризации зон деформаций и обсадных колонн в плане и по глубине;
- организация проведения измерений внутреннего сечения обсадной колонны на определенных интервалах в целях выяснения истинных причин разрушения восстающих дренажных скважин.

Библиографический список

1. *Гаев А.Я.* Фундаментальные и прикладные проблемы гидросферы. Ч. 1. Основы гидрогеологии: учеб. пос. / А.Я. Гаев, Ю.А. Килин, Е.Б. Савилова, О.Н. Маликова // под общ. ред. А.Я. Гаева. – М.: Университетская книга, 2016. – 160 с.
2. *Геология, гидрогеология и железные руды бассейна Курской магнитной аномалии (КМА).* Т. II. Гидрогеология и инженерная геология / Под ред. А.Т. Бобрышева. – М.: Недра, 1972. – 479 с.
3. *Железные руды КМА:* монография / под ред. В.П. Орлова, И.А. Шевырева, Н.А. Соколова. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2001. – 616 с.

4. Квачев В.Н., Леонтьева Е.В., Хаустов В.В., Козуб А.В., Кушнерчук В.В. Основные направления цифровизации гидрогеологических процессов на Михайловском ГОКЕ им. А.В. Варичева // Горная промышленность, 2020. № 3. – С. 91–97.

5. Козуб, А.В., Исмагилов, Р.И., Бадтиева, Б.П., Кушнерчук, В.В. Вольхин, О.Б. Опыт освоения и осушения месторождения в сложных гидрогеологических условиях // Горная Промышленность. 2019. №5 (147). – С. 12–14.

6. Костенко, В.Д., Хаустов, В.В., Лушников, Е.А. Об использовании математических моделей в геолого-гидрогеологических исследованиях // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии, 2012. № 1. – С. 81–92.

7. Кузькин, В.С., Тимошков, И.А., Волков, Ю.И., Пономаренко, Ю.В., Изотов, А.А., Титов, В.Р., Жилин, С.Н., Гайдук, В.А. Теоретическое обоснование технологии бурения восстающих дренажных скважин и технологии вскрытия водоносных горизонтов / Материалы 7 Международного симпозиума «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях». – Белгород: ВИОГЕМ, 2003. – С. 20–30.

8. Пономаренко, Ю.В. Способ осушения бортов глубоких карьеров с помощью систем комбинированных дренажных устройств // Горный журнал, 2014, № 7. – С. 52–54.

9. Попов, Л.Н., Стрельцов, В.И., Изотов, А.А. Обеспечение безопасности работ по защите горных выработок от обводнения на примере карьера Лебединского ГОКа КМА // Маркшейдерия и недропользование, 2015, № 1. – С. 139–147.

10. Трубецкой, К.Н., Волков, Ю.И., Изотов, А.А., Пономаренко, Ю.В. Осушение глубокозалегающих месторождений полезных ископаемых системами восстающих дренажных скважин – технология будущего» / Сборник материалов «Неделя горняка-2006». – М.: МГГУ, 2006. – С. 175–184.

ГЕОФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СРЕДЫ ВЕРХНЕВИЗЕЙСКО- БАШКИРСКОГО ГАЗОНЕФТЕВОДОНОСНОГО КОМПЛЕКСА НА ТЕРРИТОРИИ СРЕДНЕГО ПРЕДУРАЛЬЯ

Рассмотрено геофильтрационное строение верхневизейско-башкирских карбонатных отложений на территории Среднего Предуралья. Геофильтрационные среды комплекса представлены седиментационно-гранулярным, седиментационно-трещинным и карстовым типами. Наиболее характерными являются гранулярно-обломочные, палеокарстовые и субэндогенные их подтипы. Рассмотрены особенности пространственного распространения и проявления палеокарстовых сред. Представлены характеристика емкостных и фильтрационных свойств пород и схематическая карта суммарной водопроницаемости комплекса.

Ключевые слова: геофильтрационные среды, гранулярные среды, палеокарстовые среды, субэндогенные среды, емкостные и фильтрационные свойства, водопроницаемость.

Yakovlev M.Yu.¹, Yakovlev Yu.A.², Ax832@yandex.ru

¹ «LUKOIL-Engineering» LLC “PermNIPIneft” Branch Office in Perm,
Perm, Russia

² Perm State University, Perm, Russia

GEOFILTRATION MEDIA OF THE UPPER VISEI-BASHKIR GAS-OIL-WATER COMPLEX IN THE MIDDLE PREURALS

The geofiltration structure of the Upper Visei-Bashkirian carbonate deposits in the Middle PreUrals is considered. The geofiltration environments of the complex are represented by the sedimentary-granular, sedimentary-fracture and karst types. The most characteristic are granular-clastic, paleokarst and their subendogenic subtypes. The features of the spatial distribution and manifestation of paleokarst media are considered. The characteristics of capacitive and filtration properties of rocks and a schematic map of the total water conductivity of the complex are presented.

Keywords: geofiltration media, granular media, paleokarst media, subendogenic media, capacitive and filtration properties.

Введение

В качестве геофильтрационных сред (ГФС) рассматриваются генетические типы горных пород или элементы геологического разреза (формации, субформации, латеральный ряд формаций) с едиными условиями формирования и пространственного распределения фильтрационных свойств.

Пространственное распределение глубинных объектов в нефтегазоводоносных комплексах, охваченных фильтрационными исследованиями, весьма неравномерно. Наиболее изученными в плане оказываются нефтяные месторождения и локальные поднятия, а по разрезу – продуктивные на нефть горизонты.

Материалы и методы исследований

Информационная база выполненных исследований включает около 4,5 тыс. лабораторных определений пористости и проницаемости по керну и результаты 520 гидродинамических испытаний глубоких скважин. При анализе и обработке исходных данных использовались статистические и картографические методы исследований, а также результаты авторских аналитических обзоров.

Анализ результатов

В соответствии с классификацией В.А. Всеволожского [6] ГФС комплекса представлены седиментационно-гранулярным, седиментационно-трещинным и карстовым типами. Наиболее характерными являются гранулярно-обломочные, палеокарстовые и субэндогенные их подтипы. Первые два из них характерны для эффективной части карбонатной толщи, где образуют проницаемые пласты и зоны, а вторые – для слабопроницаемой (неэффективной) части разреза.

Башкирские отложения на территории Среднего Предуралья представлены практически одной карбонатной мелководной литофациальной зоной [8]. Кратковременные перерывы осадконакопления в башкирский век проявлялись локальными участками на сводах консидементационных поднятий.

В результате комплексного изучения серпуховско-башкирского разреза В.Н. Быковым [1] установлено циклическое строение карбонатной толщи, которая сверху вниз по разрезу может быть подразделена на три части: верхнюю (известняки башкирского яруса), среднюю (известняки протвинского горизонта) и нижнюю (вторичные доломиты серпуховского яруса).

Известняки башкирского яруса (циклы X, IX) представлены частым чередованием поровых коллекторов, переслаивающихся с глинистыми

разностями пород. В подошве башкирского яруса отмечены прослои конгломератов и брекчий, образовавшихся при размыве нижележащих пород во время протвинского перерыва в осадконакоплении [1]. В башкирском ярусе гранулярно-обломочные среды представляют биоморфные (фораминифера-водорослевые) известняки. Их максимальная пористость может составлять 28%, а проницаемость 1.8 мкм^2 .

В башкирских отложениях хорошо изучена система проницаемых пластов Бш, расположенная в верхней части яруса. Проницаемая система имеет региональное распространение и представлена органогенными, органогенно-детритовыми, детритово-сгустковыми известняками и известняковыми песчаниками. Мощность проницаемых элементов изменяется от 8 до 37 м. В средней и нижней частях башкирского яруса выделяются проницаемые пропластки мощностью от 2 до 5 м. Большая часть эффективного разреза башкирского яруса представлена гранулярно-обломочными фильтрационными средами. Плановая неоднородность каждого проницаемого пласта связана с развитием сред субэндогенного и палеокарстового подтипов и определяет широкий диапазон изменения пористости (6.3–28%) и проницаемости (менее $\text{нх}10^{-4} - 1.8 \text{ мкм}^2$) отложений.

На ряде нефтяных месторождений в разрезе башкирского яруса прослежены три «карстовые зоны» – Бш1, Бш2 и Бш3 [3]. В плане наиболее закарстованные породы в каждой из зон приурочены преимущественно к сводовой части поднятий. По мнению авторов работ [2], башкирские карстовые зоны могут быть отнесены к региональным коллекторам.

В соответствии с представлениями [10] в башкирских отложениях Среднего Предуралья в плане может быть выделено несколько зон с различным качеством пород-коллекторов. Зона высоких коллекторских свойств (пористость до 20%, проницаемость до $1 \times 10^{-1} \text{ мкм}^2$) развита в южной части Среднего Предуралья и центральной части Висимской моноклинали, причем наиболее высокие коллекторские свойства установлены над бортовыми зонами погребенных прогибов Камско-Кинельской системы. Зона хороших коллекторских свойств ($\text{Кп}-15-20\%$, $\text{Кпр } 5 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-1} \text{ мкм}^2$) характерна для центральной части Среднего Предуралья. В полосе, примыкающей к границе северного борта прогибов Камско-Кинельской системы, и в узкой полосе вдоль границы Предуральского прогиба развита зона средних коллекторских свойств ($\text{Кп}-10-15\%$, $\text{Кпр} - 5 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-1} \text{ мкм}^2$). Зона низких и очень низких коллекторских свойств ($\text{Кп} - 3-10\%$, $\text{Кпр} - \text{менее } 10^{-4} \text{ мкм}^2$) – восточная часть Среднего Предуралья (Предуральский прогиб), однако на участках погребенных прогибов Камско-Кинельской системы отмечается увеличение пористости до 11–20%, а проницаемости до $2 \times 10^{-2} \text{ мкм}^2$.

В средней части разреза окско-серпуховской толщи, по данным [5], в центральных и северных районах Среднего Предуралья прослеживается

региональная проницаемая зона мощностью 60–120 м. В южной части региона выделяются две проницаемые зоны. Мощность верхней составляет 37 м, а нижней – 20–40 м. Они разделены пачкой плотных пород толщиной до 70 м. Каждая из зон состоит из нескольких проницаемых пластов, представленных детритовыми, детритово-форамениферовыми, микро- и тонкозернистыми известняками и мелкозернистыми песчаниковидными доломитами [7]. Пористость гранулярно-обломочных сред, представленных доломитами и доломитизированными известняками, может достигать 24%.

Необходимо отметить, что эти среды отличаются значительной фильтрационной неоднородностью, которую формирует частое замещение проницаемых пластов плотными породами (субэндогенные типы ГФС) с пористостью не более 6–10% и проницаемостью $n \times 10^{-5} - n \times 10^{-3}$ мкм².

В серпуховском ярусе отложения протвинского горизонта представлены мелководной известняковой литофациальной зоной. Они соответствуют VIII и IX циклам осадконакопления и отличаются интенсивным развитием вторичных процессов, формирующих емкость (выщелачивание, доломитизация) и фильтрационные свойства пород (трещиноватость, стилолитизация). При общем преобладании гранулярно-обломочных сред отмечается замещение проницаемых отложений слабопроницаемыми породами (субэндогенные среды). Высокий диапазон пористости (6.3–25%) и проницаемости ($n \times 10^{-4} - 2 \times 10^1$ мкм²) пласта определяют значительную фильтрационную неоднородность. Для протвинских отложений характерно развитие локальных палеокарстовых фильтрационных сред.

В.Н. Быков, Л.Ю. Данилова и др. [2, 3] на Осинском и Ножовском месторождениях выделяют «намюрскую карстовую зону». Последняя также была прослежена на Шумовском месторождении [9]. Участки развития палеокарстовых фильтрационных сред отличаются сложным строением полостного пространства. О локальном характере распространения палеокарстовых сред свидетельствует факт резкого падения приемистости скважин во времени [3].

Отложения нижней части серпуховско-башкирской карбонатной толщи (окские надгоризонт) относятся к I–VII циклам осадконакопления и в значительной степени отличаются от вышележащей части разреза, поскольку представлены в основном вторичными доломитами [1]. Последние отличаются высокими прочностными свойствами с преимущественно каверно-поровым типом коллектора. Фильтрационная неоднородность верхневизейско-башкирских отложений в значительной степени усиливается многообразными эпигенетическими процессами дискретного проявления [3].

Существенная роль в формировании ГФС карбонатных пород (особенно слабопроницаемых) принадлежит эффективным тектоническим трещинам и стилолитам. Их средняя трещинная пористость на два порядка ниже гранулярной пористости и составляет 0.06—0.12%. Средняя трещинная проницаемость составляет 5×10^{-3} – 3×10^{-2} мкм² при средней поровой проницаемости 5×10^{-2} – 2×10^{-1} мкм² [4]. По данным [11], трещинная проницаемость башкирских известняков в платформенной части достигает 8×10^{-2} мкм², а в Предуральском прогибе возрастает до 3.4×10^{-1} мкм². По мнению В.Н. Викторина и Н.А. Лыкова [4], система трещин состоит не из одиночных трещин большой раскрытости, а из множества часто расположенных трещин с раскрытостью от единиц до нескольких десятков микрометров. Раскрытость трещин меняется по высоте и длине, вследствие чего они обладают относительно невысокой проницаемостью. Большинство трещин не выходит за пределы однородных по литологии слоев или пластов.

Важнейшим показателем развития высокочемких палеокарстовых сред являются зоны поглощений промывочной жидкости при бурении скважин. Распространения поглощений по стратиграфическим элементам представлено на рисунке 1, а интенсивность поглощений в таблице 1.

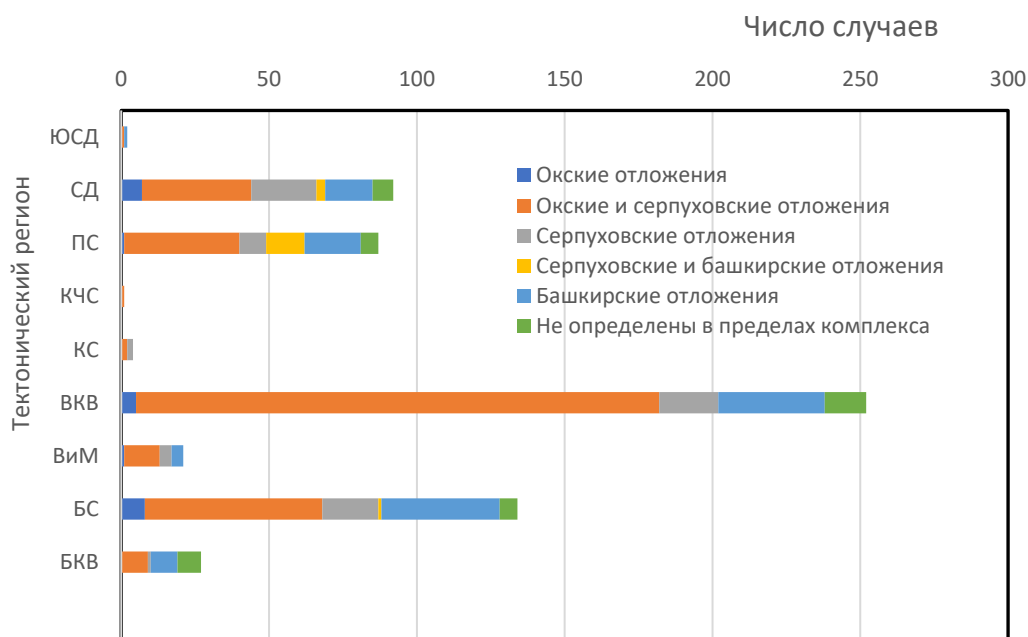


Рис. 1. Распределение числа поглощений по тектоническим регионам и стратиграфическим элементам верхневизейско-башкирского ГНВК

Условные обозначения: КС – Камский свод; ВКВ – Верхнекамская впадина; ВиМ – Висимская моноклираль; ПС – Пермский свод; БКВ – Бымско-Кунгурская впадина; БС – Башкирский свод; СД – Соликамская депрессия; КЧС – Косьвинско-Чусовская седловина; ЮСД – Юрюзано-Сылвенская депрессия

Анализ данных рисунка и таблицы показал следующее: наибольшая встречаемость поглощений отмечается в окских и серпуховских отложениях (более 70% случаев), причем такая тенденция отмечается на всех крупных геоструктурах, причем преобладают поглощения с интенсивностью менее 30% м³/час и наибольшая доля высокоинтенсивных и полных поглощений характерна для Соликамской депрессии и Бымско-Кунгурской впадины.

При опробовании на приток палеокарстовых зон дебиты скважин могут превышать 1000 м³/сут (Григорьевский участок). Водообильность верхневизейско-башкирского комплекса по результатам испытания скважин характеризует диаграмма (рис. 2).

Коллекторские и геофильтрационные свойства водоносных пород верхневизейско-башкирского ГНВК представлены в таблице 2.

Таблица 1. Распределение интенсивности поглощений бурового раствора при проходке скважинами пород верхневизейско-башкирского ГНВК

Тектонический регион	Количество гидродинамических исследований	Встречаемость поглощений бурового раствора с различной интенсивностью, %				
		Интенсивность, м ³ /час				
		0–30	30–60	60–90		
Камский свод	3	66,7	33,3	–	–	–
Верхнекамская впадина	257	72,6	15,7	7,6	1,8	2,3
Висимская моноклираль	17	35,3	35,3	5,9	17,6	5,9
Пермский свод	63	41,7	8,3	3,3	45,0	1,7
Бымско-Кунгурская моноклираль	28	39,3	10,7	–	32,1	17,9
Соликамская депрессия (север)	12	68,3	16,7	25,0	–	–
Соликамская депрессия (восток)	29	54,5	9,1	18,2	–	18,2
СД-3 Соликамская депрессия (юг)	65	52,3	1,5	23,1	10,8	12,3
Башкирский свод (запад)	35	52,6	11,8	1,5	30,4	3,7
Башкирский свод (восток)	12	80	–	–	20	–
Передовые складки Урала	3	–	–	–	–	100

Для верхневизейско-башкирского ГНВК отмечается тенденция ухудшения фильтрационных свойств в восточном направлении. Максимальная встречаемость «сухих» объектов при испытании скважин отмечается на Бымско-Кунгурской моноклинали, в восточной части Башкирского свода и во всех структурах Предуральяского прогиба (табл.2).

На основе схематических карт прогноза коллекторов серпуховских и башкирских отложений составлена схематическая карта суммарной водопроводимости комплекса (рис. 3). Величины водопроводимости, как правило, соответствуют первым единицам $\text{м}^2/\text{сут}$ и на большей части территории не превышают $5 \text{ м}^2/\text{сут}$.

В соответствии с мощностью и фильтрационными свойствами пород эффективной части комплекса максимальные величины водопроводимости (10 – и локально до $40 \text{ м}^2/\text{сут}$) характерны для юго-западной части Среднего Предуралья. Общая тенденция снижения водопроводимости отмечается в восточном и северо-восточном направлениях в связи с региональным погружением отложений. В этой части региона значительно возрастает общее количество «сухих» объектов. На территории Предуральяского прогиба величины водопроводимости не превышают $0.1\text{--}3.5 \text{ м}^2/\text{сут}$. В этом же направлении значительно возрастает встречаемость «сухих» объектов (табл. 2).

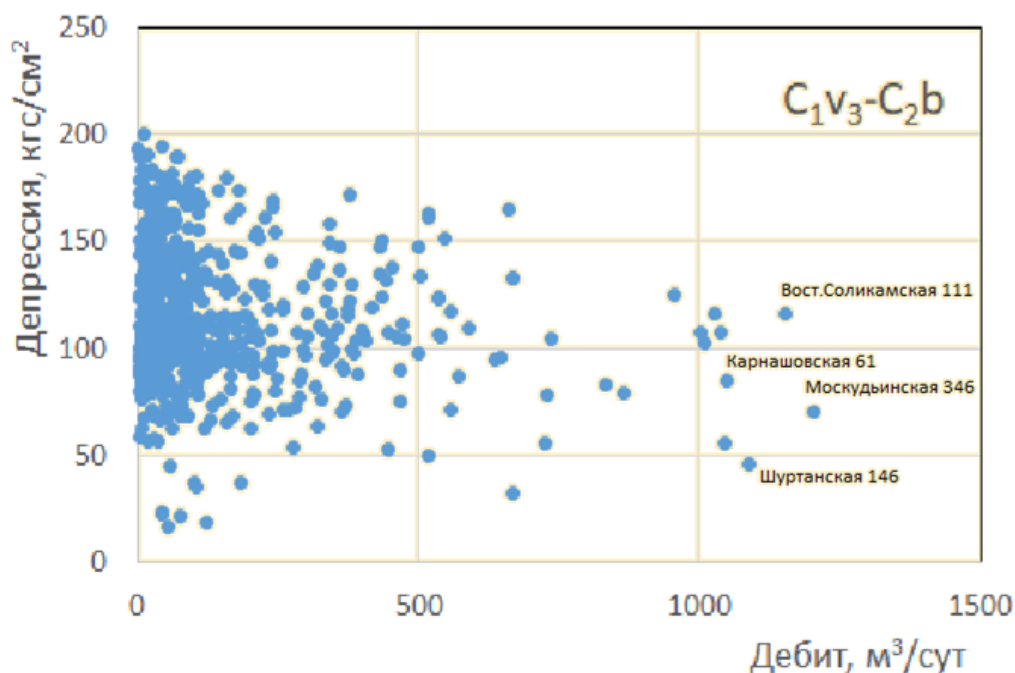


Рис. 2. Водообильность верхневизейско-башкирских отложений

Выводы

Основным подтипом геофильтрационных сред комплекса являются слабопроницаемые субэндогенные среды. Латеральную проводимость отложений определяют седиментационно-гранулярные среды, представленные региональными пластами (Бш, Срп). Для данных сред характерна тенденция ухудшения фильтрационно-емкостных свойств в восточном направлении с уменьшением водопроницаемости от 5–10 м²/сут в платформенной части региона до 0,1 м²/сут в восточной части Предуральяского прогиба.

Сочетание относительно небольших по мощности латеральных и линейных (протяженных или прерывистых) субвертикальных проводящих зон образует слоисто-блоковую макроструктуру геофильтрационного массива. Ожидаемая структура стока в этих условиях может проявляться в виде «местного» стока, а также конвекционных «пальцев» и «плоскостей» в субвертикальных проницаемых зонах и структур их зонального растекания в латеральных геофильтрационных средах. Для слабопроницаемых блоков вполне вероятно относительное запаздывание фильтрационных, конвекционно-диффузионных процессов, что может объяснить сохранение реликтовых (в т.ч. бескорневых) гидрогеохимических аномалий.

Палеокарстовые геофильтрационные среды комплекса имеют локальное и зональное распространение и проявляются активными поглощениями бурового раствора при бурении скважин. Практическое значение изучения латеральных сред комплекса определяется миграционными задачами фильтрации пластовых вод и углеводородов, а палеокарстовые среды рассматриваются как объекты размещения промышленных стоков.

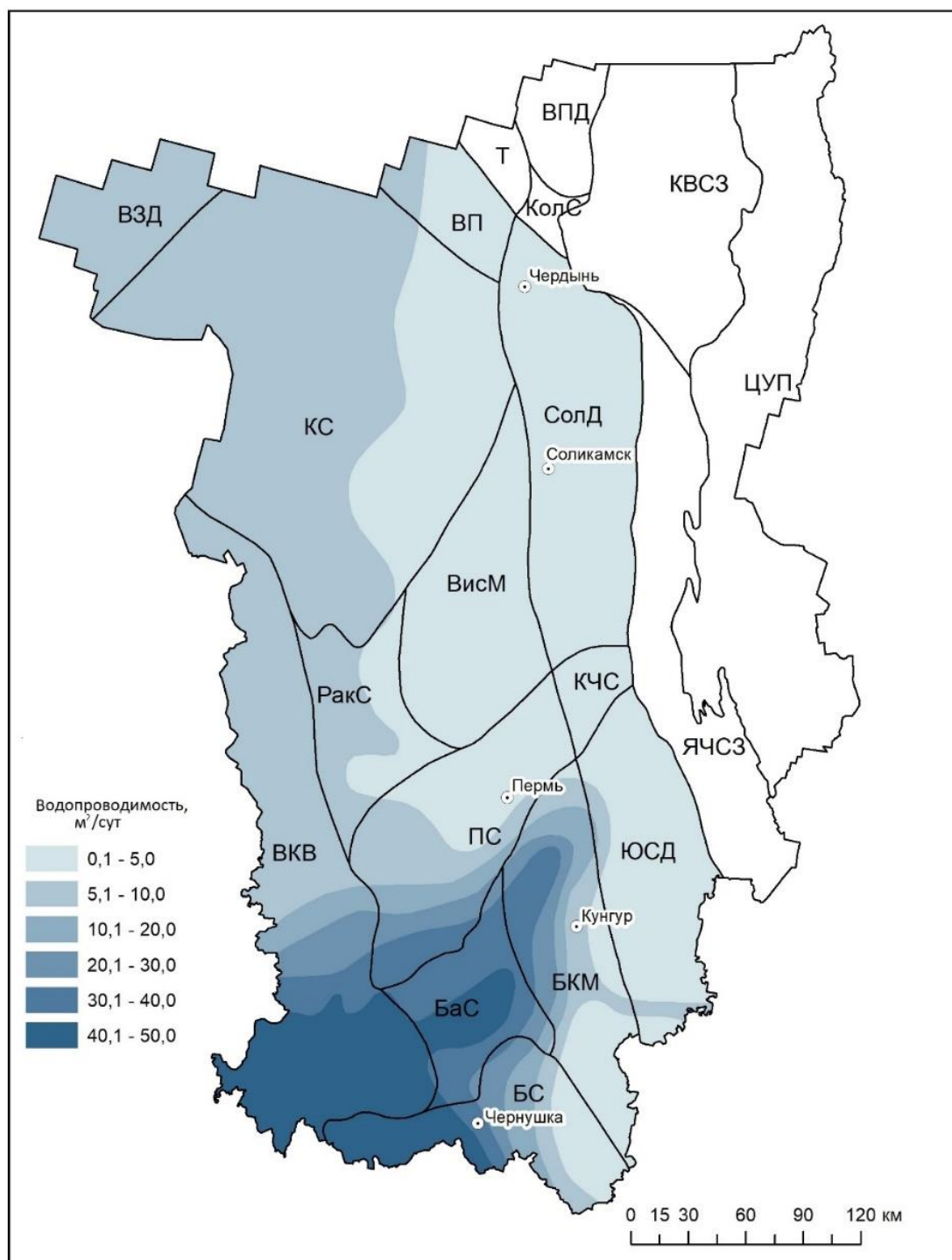


Рис. 3. Схематическая карта водопроницаемости верхневизейско-башкирского комплекса

Таблица 2. Характеристика емкостных и фильтрационных свойств водонасыщенных пород верхневизейско-башкирского ГНБК

Тектонический регион	Литология	Пористость, % диапазон характерные значения	Проницаемость, мкм ²		Доля «сухих» объектов, %
			по гидродинамическим исследованиям диапазон характерные значения	по исследованиям керна диапазон характерные значения	
Камский свод	Известняки, аргиллиты, доломиты; на северо–западе – известковистые аргиллиты	1,3–20,6	$\frac{3 \times 10^{-3} - 5,5 \times 10^{-2}}{-}$	$\frac{<10^{-4} - 1,2 \times 10^{-2}}{<10^{-4}}$	22
Верхнекамская впадина	На севере– переслаивание известняков, доломитов, аргиллитов; на юге– известняки, доломитизированные известняки	0,9–23,2	$\frac{1,3 \times 10^{-3} - 2,1 \times 10^{-1}}{4 \times 10^{-3} - 1,1 \times 10^{-2}}$	$\frac{2 \times 10^{-4} - 9 \times 10^{-1}}{<10^{-4}}$	7
Висимская моноклиналь	Переслаивание доломитов и аргиллитов, известняки	2,4–19,9	$\frac{9,9 \times 10^{-4} - 1,7 \times 10^{-1}}{-}$	$\frac{4 \times 10^{-4} - 1,9 \times 10^{-1}}{<10^{-4}}$	12
Пермский свод	Известняки, доломиты, доломитизированные известняки; переслаивание доломитов и известняков	0,8–26,7	$\frac{1,8 \times 10^{-5} - 3 \times 10^{-2}}{4,7 \times 10^{-3} - 1,8 \times 10^{-2}}$	$\frac{10^{-5} - 2,5 \times 10^{-1}}{<10^{-4}}$	30
Бымско–Кунгурская моноклиналь	Известняки, доломиты, доломитизированные известняки	–	–	–	37
Башкирский свод (запад)	Известняки, доломиты, доломитизированные известняки	0,7–21,2	$\frac{1,1 \times 10^{-3} - 5,2 \times 10^{-2}}{n \times 10^{-3}}$	$\frac{10^{-6} - 2,5 \times 10^{-1}}{n \times 10^{-2} - n \times 10^{-1}}$	15
Башкирский свод (восток)	Известняки, доломиты, доломитизированные известняки; мм	0,7–24,4	$\frac{1,1 \times 10^{-4} - 3,8 \times 10^{-2}}{n \times 10^{-3} - n \times 10^{-2}}$	$\frac{<10^{-6} - 4,4 \times 10^{-1}}{n \times 10^{-2} - n \times 10^{-1}}$	43
Соликамская депрессия (север)	Аргиллиты, доломиты, известняки, брекчии	$\frac{0,1 - 17,2}{<4}$	$\frac{6,7 \times 10^{-4} - 8,6 \times 10^{-2}}{n \times 10^{-2}}$	$\frac{6 \times 10^{-6} - 6 \times 10^{-2}}{<10^{-4}}$	47
Соликамская депрессия (центр)	Аргиллиты, доломиты, известняки; брекчии, доломитизированные известняки	$\frac{1,0 - 18,1}{<4}$	$\frac{6,8 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-2}}{n \times 10^{-3}}$	$\frac{4 \times 10^{-5} - 1,1 \times 10^{-1}}{<10^{-4}}$	39
Соликамская депрессия (юг)	Восток аргиллиты, доломиты, известняки; запад– аргиллиты, доломиты	$\frac{0,6 - 17,2}{2 - 4}$	$\frac{10^{-4} - 1,5 \times 10^{-1}}{n \times 10^{-3}}$	$\frac{7 \times 10^{-6} - 1,8 \times 10^{-1}}{<10^{-4}}$	56
Косьвинско–Чусовская седловина	Доломитизированные известняки, переслаивание доломитов и известняков, аргиллиты	0,8–14,5	$\frac{7,7 \times 10^{-4} - 10^{-3}}{-}$	$\frac{4 \times 10^{-6} - 10^{-4}}{<10^{-4}}$	49
Юрюзано–Сылвенская депрессия	Доломитизированные известняки, переслаивание доломитов и известняков, аргиллиты, кремнеземные известняки	0,3–15,4	$\frac{7,4 \times 10^{-4} - 3,1 \times 10^{-3}}{1,1 \times 10^{-3} - 9,9 \times 10^{-3}}$	$\frac{0,4 \times 10^{-6} - 9,2 \times 10^{-2}}{<10^{-4}}$	34,3

Библиографический список

1. *Быков В.Н.* Карстовые коллекторы башкирско-серпуховской карбонатной толщи Пермского Прикамья // Гидрогеология и карстование. – Вып.12. – Пермь: Пермск. ун-т, 1997. – С. 113–117.
2. *Быков В.Н. Наборщикова И.И. Данилов. Л.Ю. и др.* Влияние карста на строение карбонатных коллекторов Пермской области // Гидрогеология и карстование. – Вып. 5. – Пермь: Пермск. ун-т, 1974. – С. 78–92.
3. *Быков В.Н., Данилова Л.Ю. Наборщикова И.И.* Изучение закономерностей распространения и строения карстовых коллекторов для подсчета запасов нефти и рациональной разработки залежей // Комплексное изучение геологического строения карбонатных коллекторов нефтяных месторождений Пермской области, Тр. ПермНИПИнефть. – Вып. 12. – Пермь: 1975. – С. 47–75.
4. *Викторин В.Н., Лыков Н.А.* Разработка нефтяных месторождений, приуроченных к карбонатным коллекторам. – М.: Недра, 1980. – 202 с.
5. *Винниковский С.А., Шаронов Л.В.* Закономерности размещения и условия формирования залежей нефти и газа Волго-Уральской области. Том II. Пермская область и Удмуртская АССР. – М.: Недра, 1977. – 272 с.
6. *Всеволожский В.А.* Подземный сток и водный баланс платформенных структур. – М.: Недра, 1983. – 167 с.
7. *Дозорцев Р.Н., Заболотских В.П., Звездин В.Г., Пахомов В.И.* Коллекторские свойства и некоторые особенности литолого-фациальных типов карбонатных пород каменноугольных отложений Пермской области. // Геология и разработка нефтяных месторождений (Тр. ПермНИПИнефть, вып. 6). – Пермь: Книжн. из-во, 1971. – С. 75–82.
8. *Дозорцев Р.Н., Пахомов В.И.* Фации и палеогеография Пермского Прикамья и Западного склона Среднего Урала в башкирский век // Тр. Пермск. политех. ин-та. Вып.23. –Пермь. ППИ, 1966. – С. 188–195.
9. *Марков Н.Н., Абашев Ш.В.* О проявлениях древнего карста в связи с разведкой на нефть Шумовской площади // Геология и нефтегазоносность Пермского Прикамья и прилегающих районов. – М.: Недра, 1965. С. 239–247.
10. *Шаронова В.Н., Шаронов Л.В.* Литология, фации, палеогеография и нефтеносность башкирского яруса Пермской и Кировской областей и Удмуртской АССР // Тр. ВНИГНИ. – Вып. 117, КО ВНИГНИ. – Пермь, 1971. – С. 120–134.
11. *Эсмонтович М.А.* Литолого-петрографические особенности карбонатных пород-коллекторов турнейского и башкирского ярусов Пермской области // Особенности геологии и разработки нефтяных месторождений Пермского Предуралья. – М.: ИГиРГИ, 1981. – С. 26–29.

ПРОБЛЕМЫ ГИДРОГЕОХИМИИ И ГИДРОГЕОЭКОЛОГИИ

УДК 551.44

Килин Ю.А., Копанцева Е.Н., yuakilin@mail.ru, elena.korotaeva.88@mail.ru
*Пермский государственный национальный исследовательский университет,
г. Пермь, Россия*

НЕФТЯНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПЕЩЕРЫ ПОНОМАРЕВСКАЯ I В ИРЕНСКОМ КАРСТОВОМ РАЙОНЕ

Проблема охраны пещер, подземных и поверхностных вод является актуальной для Иренского карстового района. В районе исследования в стадии эксплуатации находятся 8 нефтяных месторождений, 7 магистральных и 3 внутрипромысловых газопровода, 4 нефтепровода. Аварийные ситуации на них служат причиной нефтяного загрязнения. По материалам экспедиций кафедры динамической геологии и гидрогеологии ПГНИУ нефтяное загрязнение обнаружено в истоках рек Тураевки, Каменки, Ясылки. Руководил экспедициями заведующий кафедрой динамической геологии и гидрогеологии профессор Катаев Валерий Николаевич. Под его руководством в 1997 г. были проведены карстологические исследования на Ясылском полигоне и исследованы пещеры района. При исследованиях Пономаревской пещеры было зафиксировано нефтяное загрязнение. В дальнейшем при ежегодном карстологическом мониторинге отмечались сильная загазованность и наличие в водах ручья, протекающем по пещере, нефтяных пленок.

Ключевые слова: карст, пещера Пономаревская, нефтяное загрязнение.

Kilin Yu.A., Kopantseva E.N., yuakilin@mail.ru, elena.korotaeva.88@mail.ru
Perm State University, Perm, Russia

OIL POLLUTION OF THE PONOMAREVSKAYA I CAVE IN THE IRENA KARST AREA

The problem of protection of caves, underground and surface waters is relevant for the Irena karst area. There are 8 oil fields in operation in the research area, 7 main and 3 in-field gas pipelines, 4 oil pipelines emergency situations on them cause oil pollution. Department of Dynamic Geology and Hydrogeology of PSNIU, oil pollution was detected in the sources of the Turaevka, Kamenka, Yasyłka rivers. The expeditions were led by the head of the Department of Dynamic Geology and Hydrogeology, Professor Valery Nikolaevich Kataev. Under his leadership, in 1997, karstological studies were conducted at the Yasyłsky landfill and the caves of the area were investigated. During the research of the Ponomarev cave, oil pollution was recorded. In the future, during the annual karstological monitoring, there was a strong gas contamination and the presence of oil films in the water of the stream flowing through the cave.

Keywords: karst, Ponomarevskaya cave, oil pollution.

Введение

Иренский карстовый район является классическим районом гипсового карста. Карстующиеся гипсы, ангидриты, известняки, доломиты иренского горизонта кунгурского яруса нижней перми имеют мощность 130 м. Иренский горизонт представлен четырьмя сульфатными пачками: лунежской, демидовской, шалашнинской и ледяно-пещерской, которые разделены карбонатными пачками – туйской, елкинской, неволинской. Пещера Пономаревская I находится в верховьях Ясылского лога в 4 км от с. Красный Ясыл Ординского района и приурочена к гипсам лунежской пачки [2].

Материалы и методы исследования

Подробное описание пещеры Пономаревская приводится в статье В.Н. Катаева «Типичные малые пещеры Иренского карстового района» [1].

При обследовании пещеры в июле 2023 г. обнаружено, что привходовая часть пещеры завалена сухостоем, вокруг следы вырубки леса. Пещера расположена в Ясылском логу, в карстовой котловине, вытянутой с запада на восток на 40 м, глубина котловины 7,0 м, борта крутые, местами обрывистые, в западной части обнажение гипсов, в основании которого расположен вход в пещеру. Вход в пещеру частично завален щебнем и глыбами гипса, в привходовой части чувствуется сильный запах сероводорода и нефтепродуктов. Вход имеет вид полуэллипса, высотой 1,8 м, длиной 5,6 м (рис.1). По результатам спелеологических исследований известно, что в карстовой котловине, где расположен вход в пещеру, имелись еще два входа в небольшие пещеры Пономаревская II и Пономаревская III, соединённые друг с другом непроходимыми трещинами. В период полевых исследований с июля по август 1997 г. и июля 2023 г. обнаружено, что входы в эти пещеры завалены глыбами гипса.



Рис. 1. Вход в пещеру Пономаревская I

Пещера Пономаревская I относится к пещерам коридорного типа с узкими трещинообразными, короткими, непроходимыми боковыми ответвлениями (рис. 2). Основная галерея пещеры, имеющая коленообразные перегибы, заложена на пересечении трещины напластования и систем тектонических трещин, ориентированных в основном в 30–60° и 330–360° [1].

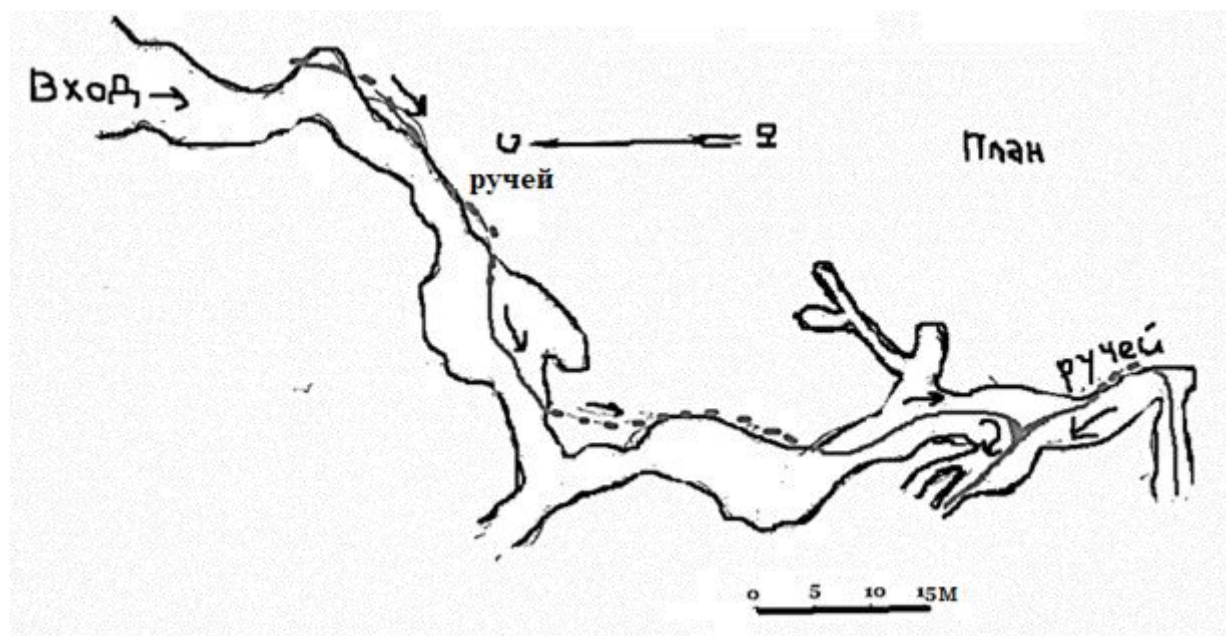


Рис. 2. Схема-план пещеры Пономаревская I

Пещерные отложения представлены крупнообломочными (до глыбовых) гипсовыми навалами. Глубина заложения от поверхности земли 5,0 – 7,0 м. Возраст пород, к которым приурочена пещера, лунежская пачка иренского горизонта кунгурского яруса нижней перми (P_{1ln}), мощность пачки 28 – 31 м. По результатам лабораторных исследований гипс плотный, размягчаемый, сильно и слабыветрелый, объемная плотность $2,27 \text{ г/см}^3$, открытая пористость 3,1 %, коэффициент размягчаемости 0,465 %, прочность на растяжение (сухой породы) 4,3 МПа, прочность на растяжение (водонас.) 2,6 МПа, прочность на сжатие (сухой) 32,5 МПа, прочность на сжатие (водонас.) 13,5 МПа.

Длина пещеры 100 м, ширина 5-10 м, высота 1,8-2,6 м, потолок неустойчив при касании наблюдается обрушение отдельных фрагментов гипса, высокая влажность в пещере вызывает конденсацию влаги на потолке с образованием капежа. Объем пещеры составляет 1000 – 1250 м^3 [1]. Свод пещеры вырабатывается в неустойчивый арочный профиль. На дне имеются гравитационные обрушения, фиксируемые по свежим вывалам (рис.3).

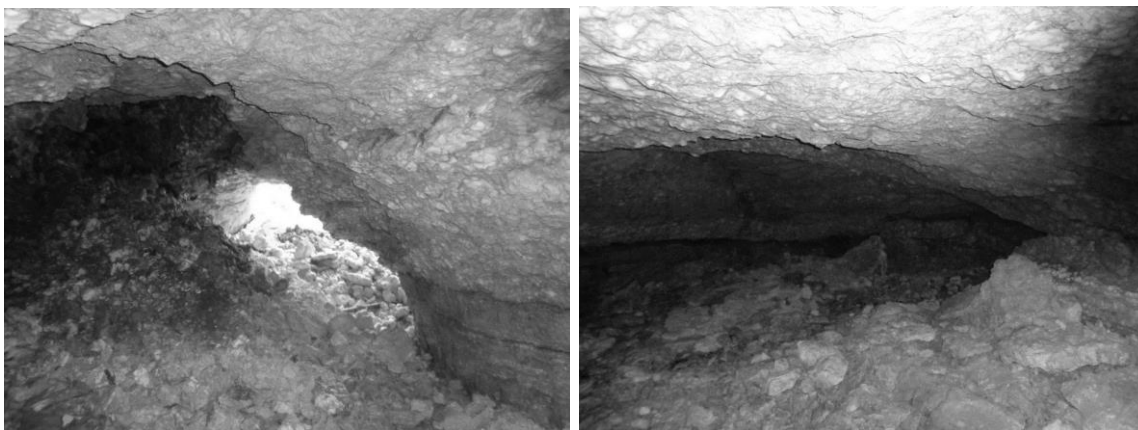


Рис. 3. Свод пещеры Пономаревская I

Анализ результатов

По дну пещеры у восточной стенки в южном направлении протекает ручей, по руслу которого в понижениях дна образуются микроозера, дно пещерного ручья белого цвета от выпавшего гипса (рис.4). В южном конце пещерной галереи подземный поток меняет направление с южного на западный, принимая из каменных завалов встречный приток направления Ю-С.



Рис. 4. Ручей в пещере

В пещере за весь период наблюдений фиксировался сильный запах сероводорода, на стенках пещеры по потоку ручья наблюдаются корки из нефтепродуктов на высоте 0,5 м от уреза воды. Скорость течения воды в ручье составляет 0,1–0,2 м/сек, расход составил 0,3 л/с. В паводковый период года расходы пещерного потока увеличиваются, это фиксируется по отметкам воды на стенках пещеры, уровни резко повышаются до 0,5 м.

В гидрогеологическом отношении глубина заложения дна пещеры соответствует глубине трещинно-карстовых вод иренского горизонта зоны горизонтальной циркуляции. В верхней части Ясылского лога поверхностный сток отсутствует, фрагменты его появляются ниже пещеры в 700 м,

имеется субаквальный выход подземных вод в нефтеловушке, ниже нефтеловушки поверхностный сток на период обследования 2023 г. отсутствует.

При трассировании потока подземного ручья в 1998 г. с помощью флуоресцеина был установлен субаквальный выход пещерного ручья в нефтеловушке. Ниже по долине суходола Ясыльского лога закартированы два родника разгружающиеся справа (родник скального лога и Арапов ключ). Дебиты родников 2,5 л/с. В период маловодных 2021–2023 гг. данные родники пересохли, поверхностный сток по Ясыльскому логу начинается в 4 км ниже пещеры у с. Красный Ясыл, здесь наблюдается мощный родниковый выход подземных вод с дебитом более 50 л/с. Ясыльский лог является основной дреной для подземных вод данного района, атмосферные осадки здесь интенсивно поглощаются воронками, трещинами, понорами.

В пределах пещерного поля и в пределах бортов Ясыльского лога концентрация поверхностного стока исключена, атмосферные осадки практически моментально переводятся к базису дренирования на глубину 5–7 м от поверхности массива. Выше по логу и на склонах водораздела поверхностные водотоки отсутствуют, большое количество карстовых воронок поглощают все атмосферные осадки, выпавшие на площадь водосборной поверхности. В пределах водосборной площади на расстоянии 1 км к востоку и северо-востоку от пещеры имеются эксплуатационные скважины Губановского нефтяного месторождения, а также проходят нефтепроводы, газопроводы, водоводы. Одна из причин нефтяного загрязнения пещеры Пономаревская I это наличие ручья, воды которого насыщаются нефтепродуктами в очаге загрязнения. Очагом загрязнения могут быть многочисленные коммуникации, а также плохая герметизация эксплуатационных скважин, где возможны заколонные перетоки. До настоящего времени очаг загрязнения не установлен. Загрязнение носит постоянный характер, концентрация нефтепродуктов увеличивается в периоды максимального стока, т.е. весной.

Аналитические работы по определению химического состава подземного потока за весь период исследования выполнены в Лаборатории гидрохимического анализа геологического факультета ПГНИУ. Лаборатория гидрохимического анализа является структурным подразделением кафедры динамической геологии и гидрогеологии геологического факультета ПГНИУ.

Поскольку временной период исследования достаточно длительный (составляет 26 лет) в практике лаборатории поменялись методы исследования. В 2010 г. лаборатория была оснащена необходимым современным оборудованием, которое позволило проводить количественное определение содержания нефтепродуктов и выполнять определение основных катионов и анионов методом капиллярного электрофореза. Так, например, до 2010 г.

содержание натрия и калия определяли в сумме расчетным путем, при этом погрешность всего анализа не учитывалась, а списывалась на содержание калия и натрия, которые экспериментально определять не получалось. Капиллярный электрофорез позволил проводить количественное содержание калия и натрия по отдельности. Проанализировав данные химического состава воды, приведенные в таблице 1, можно увидеть снижение содержания натрия и калия, которое никак не связано с природными гидрохимическими процессами [4].

Таблица 1. Макрокомпонентный состав воды пещерного ручья в разные периоды времени

Период	август 1997	март 1998	апрель 1998	май 1998	август 1998	октябрь 1998	август 2014	май 2016	июль 2016	июль 2023
Показатель	Содержание, мг/дм ³									
Хлорид-ион	571	256	179	51	161	14	12	1,70	55	22
Сульфат-ион	1393	1434	1357	1367	1297	1432	1360	1280	1310	1450
Гидрокарбонат-ион	476	468	467	299	468	488	433	351	477	419
Натрий+калий	315	171	105	115	97	78	10	1,06	5,3	14
Магний	36	40	45	36	25	41	41	38	41	37
Кальций	721	682	654	539	661	630	617	587	473	629
Минерализация	3546	3051	2807	2407	2709	2683	2473	2259	2361	2571

По результатам исследования (рис.5) сульфат-ион (SO_4^{2-}) является преобладающим в ионном составе воды ручья, что соответствует влиянию гипсово-ангидритовой лунежской пачки.

Содержание хлорид-ионов как показатель подтока глубинных вод имеет тенденцию к уменьшению во времени от 571 мг/дм³ (август 1997г.) до 1,7 мг/дм³ (май 2016 г.).

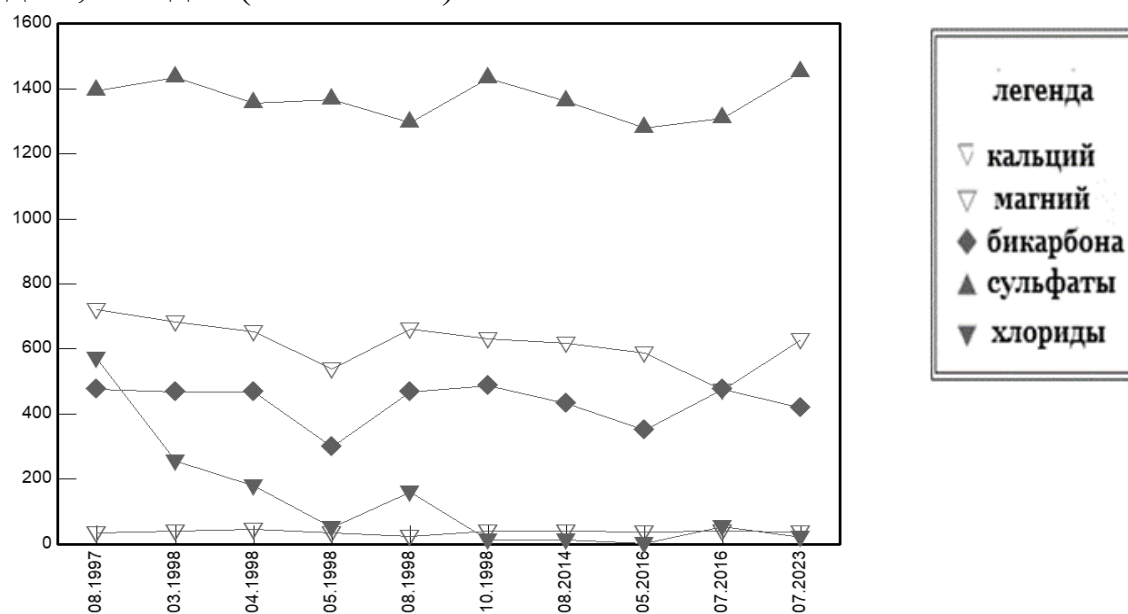


Рис.5. Изменение компонентного состава воды пещерного ручья в разные периоды времени

По химическому составу вода ручья в Пономаревской пещере за весь период исследования претерпевает изменение от хлоридно-сульфатной натриево-кальциевой до сульфатной кальциевой (табл.2).

Таблица 2. Изменение химического состава воды ручья пещеры Пономаревская

Период наблюдений	Формула ионного состава	Химический тип воды
1997 г.	$M3,5 \frac{SO_4 55 Cl 30 HCO_3 15}{Ca 68 Na 26 Mg 6} pH6,8$	хлоридно-сульфатная натриево-кальциевая
1998 г.	$M2,7 \frac{SO_4 72 HCO_3 18 Cl 9}{Ca 80 Na 12 Mg 8} pH6,9$	сульфатная кальциевая
2014 г.	$M2,5 \frac{SO_4 79 HCO_3 20}{Ca 89 Mg 10 Na 1} pH7,2$	гидрокарбонатно-сульфатная кальциевая
2016 г.	$M2,3 \frac{SO_4 78 HCO_3 20 Cl 2}{Ca 89 Mg 11} pH7,6$	гидрокарбонатно-сульфатная кальциевая
2023 г.	$M2,6 \frac{SO_4 80 HCO_3 18 Cl 2}{Ca 89 Mg 9 Na 2} pH6,9$	сульфатная кальциевая

Вода в ручье Пономаревской пещеры по величине минерализации классифицируется по ОСТ 41-05-263-86 как умеренно солоноватая (1997 г.) и слабосолоноватая (1998 – 2023 гг.). Минерализация изменяется во времени от 3,5 до 2,3 г/дм³ до 2016 г., в 2023 г. зафиксирован рост минерализации (за счет увеличения сульфат-иона и катиона кальция).

По значению водородного показателя (рН) вода нейтральная за весь период наблюдения. Значение рН увеличивается при переходе от сульфатного кальциевого типа воды к гидрокарбонатно-сульфатному кальциевому, и уменьшается в обратную направлении.

Данные о количественном содержании нефтепродуктов в подземном потоке пещеры представлены в таблице 3. В данные по нефтепродуктам до 2014 г., так как количественного определения не проводилось, но визуально при посещении пещеры наблюдалось загрязнение воды в ручье нефтепродуктами, и отмечалась сильная загазованность.

Таблица 3. Содержание нефтепродуктов в ручье пещеры Пономаревская

Период наблюдений	Суммарное содержание нефтепродуктов, мг/дм ³	Растворенные в воде нефтепродукты, мг/дм ³	Нерастворенные в воде нефтепродукты, мг/дм ³
август 2014	1348	–	–
май 2016	3,04	–	–
июль 2016	0,05	–	–
июль 2023	–	0,076	79

Таким образом, нефтяное загрязнение воды в ручье Пономаревской пещеры зафиксировано по данным анализов 2014 г., содержание нефтепродуктов составило 1348 мг/дм³. Далее наблюдалось значительное уменьшение содержания нефтепродуктов до 3,04 и 0,05 мг/дм³.

Нефть и продукты ее переработки представляют собой сложную и разнообразную смесь веществ. В гидрохимии понятие "нефтепродукты" условно ограничивается только углеводородной фракцией, экстрагируемой из воды и состоящей из неполярных и малополярных алифатических, ароматических, алициклических углеводородов. Наиболее универсальным методом определения суммы низкомолекулярных углеводородов является ИК-фотометрия, в основе которой лежит экстракция нефтепродуктов четыреххлористым углеродом и отделения других органических компонентов вод на колонке, с оксидом алюминия. При исследовании воды из ручья пещеры Пономаревская использовался метод ИК-спектроскопии [3].

В национальных лабораториях применяют разные методы определения содержания нефтепродуктов в воде, основанные на различных физических свойствах нефтепродуктов: гравиметрический, ИК-спектрофотометрический, флуориметрический и хроматографический, которые при определении нефтепродуктов в одном и том же образце воды могут давать различные результаты измерений их концентрации. Этот факт необходимо учитывать при анализе данных [5].

Обычно в момент поступления в воду масса нефтепродуктов сосредоточена в пленке. В течение времени происходит перераспределение между основными формами миграции, направленное в сторону повышения доли растворенных, эмульгированных, сорбированных нефтепродуктов.

Таким образом, следует отметить, что отбор проб на нефтепродукты является самой важной частью анализа. От того, как он будет выполнен, зависит достоверность результатов измерений. Согласно РД 52.24.476-2007 при отборе проб на нефтепродукты должен быть исключен захват поверхностной пленки воды. Пробы помещают в стеклянную посуду, которая закрывается притертыми стеклянными, либо полиэтиленовыми пробками, обернутыми алюминиевой фольгой и двойным слоем тонкой тефлоновой пленки.

По результатам химического анализа в августе 2014 г. зафиксировано очень высокое содержание нефтепродуктов, вероятно, что это суммарное содержание нефтепродуктов, находящееся как в растворенном, так и нерастворенном состоянии (в виде пленки на поверхности воды).

В июле 2023 г. было оценено не только содержание нефтепродуктов в растворенной форме (проба была отобрана без захвата поверхностной пленки), но и в нерастворенной форме. Для этого пленка нефтепродуктов была отделена от основной пробы воды, содержащей уже растворившееся нефтепродукты, и проанализирована отдельно. Согласно полученным данным видно, что содержание нефтепродуктов, сосредоточенных в пленке в 1000 раз больше, чем в растворенном состоянии. Поэтому для объективной оценки нефтяного загрязнения, необходимо анализировать не только воду,

отобранную без захвата пленки с поверхности, но и количество нефтепродуктов в пленке.

Выводы

1. В основе формирования химического состава подземных вод верхнего гидродинамического этажа (зоны активного водообмена) лежат процессы взаимодействия в системе вода – порода, формируются минерализованные воды сульфатно-кальциево-гидрокарбонатного типа с минерализацией до 3 г/дм³. сульфатно-кальциевого типа с минерализацией до 2,6 г/дм³.

2. Нефтяное загрязнение имеет постоянный характер, концентрация нефтепродуктов зависит от сезона года, максимальное значение достигается в паводковый период года, когда идет промывка верхней загрязненной нефтепродуктами части разреза.

3. Загрязнение подземного ручья в Пономаревской пещере происходит за счет поверхностного и приповерхностного загрязнения нефтепродуктами, роль глубинного фактора почти исключен по причине малой концентрации хлорид-иона.

4. Необходимо дальнейшее изучение нефтяного загрязнения пещеры, так как его динамика позволяет прогнозировать наличие очагов загрязнения в подземных карстовых полостях. Карстовые полости являются резервуарами, в которых происходит, кроме транзита, накопление нефтепродуктов в значительных объемах.

Библиографический список

1. Катаев В.Н. Типичные малые пещеры Иренского карстового района// Пещеры: Межвуз. сб. науч. тр. / Перм. ун-т. –Пермь, 1999. С. 57–62.
2. Килин Ю.А., Минькевич И.И. Полости Краснояылского карстового поля// Пещеры: Межвуз. сб. науч. тр. / Перм. ун-т. – Пермь, 1999. С. 52–57.
3. ГОСТ 31953-2012 Вода. Определение нефтепродуктов методом газовой хроматографии.
4. ОСТ 41-05-263-86 Воды подземные. Классификация по химическому составу и температуре.
5. РД 52.24.476-2007 Массовая концентрация нефтепродуктов в водах. Методика выполнения измерений ИК-фотометрическим методом".

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПАССИВНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ШАХТНЫХ ВОД С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ МЕТАЛЛОВ

В последние десятилетия широкое развитие получили методы очистки кислых дренажных вод, основанные на естественных биологических, химических и физических процессах. По сравнению с обычной химической очисткой применение данных методов предполагает использование менее дорогих материалов, предпочтительно местного происхождения, и минимальные затраты на обслуживание. Такая очистка получила название пассивной. Методы пассивной очистки часто применяются там, где добыча полезных ископаемых прекращена, оставив «наследие» в виде изливающихся на поверхность кислых стоков. Однако возможность их эффективного применения имеет ряд ограничений. В настоящей работе выполнена оценка основных изливов шахтных вод Кизеловского угольного бассейна на соответствие критериям эффективной работы пассивных методов очистки.

Ключевые слова: пассивная очистка, критерии пригодности, кислотность, расход реагента.

Fetisova N.F.^{1,2}, fetisova.n.f@gmail.com

¹ “Mining Institute Ural Branch Russian Academy of Sciences” – Branch of the
Perm Federal Research Center Ural Branch Russian Academy of Sciences,
Perm, Russia

² Perm State University, Perm, Russia

ASSESSMENT OF POSSIBILITY OF THE PASSIVE METHODS APPLICATION FOR TREATMENT OF ACID MINE DRAINAGE WITH HIGH CONTENT OF METAL

In recent decades, acid mine drainage treatment methods based on natural biological, chemical and physical processes with using natural materials, preferably of local origin, have been widely developed. Compared to conventional chemical treatment, the use of these methods require the use of less expensive reagents and minimal maintenance costs. This treatment is called passive. Passive treatment methods are often used where mining has ceased, leaving a "legacy" in the form of acidic runoff flowing to the surface. However, their effective application has a number of limitations. In the present work, the assessment of the main outflows of mine waters of the Kizelovsky coal basin for compliance with the criteria for the effective operation of passive treatment methods is carried out.

Keywords: passive treatment, compliance with the criteria, acidity, acidity load.

Введение

За последние три-четыре десятилетия было разработано множество методов нейтрализации шахтных вод и удаления из них тяжелых металлов. Методы очистки шахтных вод подбираются в зависимости от химических характеристик, объема дренажа и имеющихся ресурсов для строительства и поддержания системы обработки воды. Существующие системы очистки кислотного дренажа шахт могут быть классифицированы как пассивные и активные, при этом обе системы потенциально сочетают в себе физические, биологические и химические подходы [8, 11-13]. К активным способам очистки относят методы, требующие непрерывного добавления химикатов, подачи электроэнергии, наличия персонала и соответствующей инфраструктуры. К указанным технологиям можно отнести такие методы, как реагентный, сорбционный, ионообменный, флотацию, методы с применением коагулянтов и флокулянтов [5,7,8]. Наиболее распространенные способы очистки кислых стоков представляют собой дозирование щелочной жидкости или твердых веществ (например, известкового молока или извести виде сухого порошка (CaO , CaOH_2), известняка (CaCO_3), гидроксида калия (KOH), каустической соды (NaOH), кальцинированной соды (Na_2CO_3), аммиачной воды (NH_4OH) в строго необходимых концентрациях [1]. Для ускорения процесса осаждения металлов применяют коагулянты и флокулянты [5, 7].

Методы пассивной очистки основаны на естественных процессах и требуют только периодического технического обслуживания и мониторинга. К пассивным методам относят создание фильтрующих дамб и каналов, работающих по принципу геохимических барьеров, обустройство прудов-отстойников, осветлителей, каскадов, водно-болотных угодий. В конструкции таких сооружений в основном используются природные материалы, такие как известняк и органические субстраты, но также могут использоваться отходы производств: доменный, сталеплавильный шлак или зола, образованная сжиганием твердых органических отходов, например, сахарного тростника. Часто системы пассивной обработки проектируются на годы, или даже десятилетия, с минимальными требованиями к вмешательству оператора и к стоимости обслуживания. Существенным недостатком систем пассивной обработки является необходимость в больших земельных площадях. Это связано с тем, что процесс удаления загрязняющих веществ в таких системах происходит при низких или слегка повышенных рН, при которых скорости наиболее важных реакций (окисления, гидролиза) значительно ниже, чем в искусственной среде с высокими значениями рН, типичной для основных систем активной очистки. Как следствие, при пассивной обработке воды для достижения аналогичного результата необходимо более длительное время нахождения воды в системе и большие площади [14].

В виду высокой стоимости эксплуатации, технологии активной очистки обычно используются на действующих горнопромышленных предприятиях, тогда как пассивные технологии наиболее привлекательны после прекращения разработки месторождения. Однако применение пассивных методов имеет ряд ограничений, среди которых наиболее значимыми являются слишком большие расходы изливающихся шахтных вод и высокая концентрация металлов. По этой причине, в некоторых случаях системы активной очистки используются и после закрытия шахт.

Территория ликвидированного Кизеловского угольного бассейна, расположенного в Пермском крае, характеризуется наличием острых экологических проблем. Загрязнение рек шахтными и подотвальными водами приводит к деградации природных водотоков, накоплению техногенных осадков и формированию источников вторичного загрязнения [6, 10]. Поскольку проблема кислотного дренажа на заброшенных рудниках актуальна для многих регионов мира, то специалистами выработаны и продолжают разрабатываться подходы к выбору наиболее оптимальных систем очистки [8, 12]. Целью данной работы является оценка основных существующих в настоящее время изливов кислых шахтных вод Кизеловского угольного бассейна на соответствие критериям эффективной работы наименее затратных способов очистки.

Материалы и методы исследования

Нейтрализации вод, содержащих повышенные концентрации растворенных металлов, рекомендуют проводить при pH 8,0–9,0, что связано с созданием оптимальных условий для их осаждения [1]. Поскольку в кислых стоках ионы металлов присутствуют практически всегда, то дозу реагента определяют с учетом выделения их из раствора в виде труднорастворимых соединений. Общее содержание кислот, которое можно оттитровать щелочным раствором (NaOH) до величины pH, равной 8,3, соответствует кислотности воды [4]. Кислотность определяется количеством сильной щелочи, израсходованной на нейтрализацию, и обычно выражают в мг CaCO₃/л. Помимо титрования, кислотность воды может быть получена расчётным путем в соответствии со следующей формулой [9]:

$$\text{Кислотность} = 50 \times \left(\frac{2\text{Fe}^{2+}}{56} + \frac{3\text{Fe}^{3+}}{56} + \frac{3\text{Al}^{3+}}{27} + \frac{2\text{Mn}^{2+}}{55} + 1000 \times (10^{-\text{pH}}) \right), \quad (1)$$

где: кислотность, выраженная в мг CaCO₃/л; Fe²⁺, Fe³⁺, Al³⁺ и Mn²⁺ – концентрации металлов, в мг/л.

Кислотность и объем сточных вод являются важными параметрами, определяющими выбор в пользу систем пассивной или активной очистки

(табл. 1) [12]. Указанные в табл. 1 критерии основаны на опыте использования пассивных систем очистки и носят информационно-рекомендательный характер. В работе [11] описан пример эффективного применения способа пассивной очистки дренажных вод, для нейтрализации которых требуется 1000 кг CaCO_3 /день, что значительно превышает рекомендуемый в работе [12] критерий, соответствующий 150 кг CaCO_3 /день (табл. 1). Однако следует заметить, что рассматриваемый способ предполагал интенсивное перемешивание кислых стоков в колодце, заполненном известняковой крошкой, за счет энергии падающей воды.

Таблица 1. Рекомендации для определения пригодности систем пассивной и активной очистки на основе характеристик поступающей воды [12]

<i>Система очистки</i>	<i>Ср. кислотность, мг CaCO_3/л</i>	<i>Ср. расход реагента, кг CaCO_3/день</i>	<i>Ср. расход потока, л/с</i>	<i>pH сточных вод</i>	<i>Макс. pH на выходе из системы</i>
Пассивная	1-800	1-150	< 50	> 2	7,5-8,0
Активная	1-10 000	1-50 000	не ограничен	не ограничен	14

Оценка ряда изливов шахтных вод Кизеловского угольного бассейна на соответствие условиям эффективной работы методов пассивной очистки была выполнена на основании химического состава воды и дебита, по данным мониторинга (за 2019 г) [2]. Для каждого излива шахтных вод были определены средняя кислотность и расход реагента в день. Величина кислотности была рассчитана для трех анализов каждого источника (кроме родника, для которого имеются данные только 2-х опробований) с последующим определением среднего значения. При расчете кислотности все содержащееся в воде железо учитывалось как Fe^{2+} , согласно формуле (2):

$$\text{Кислотность} = 50 \times \left(\frac{2\text{Fe}^{2+}}{56} + \frac{3\text{Al}^{3+}}{27} + \frac{2\text{Mn}^{2+}}{55} + 1000 \times (10^{-\text{pH}}) \right), (2)$$

Для вод характеризующихся наличием гидрокарбонат-ионов (родник 417а, скв. 634) при расчете кислотности учитывалась их щелочность, пересчитанная в мг/л эквивалента CaCO_3 . Формула для соответствующего пересчета щёлочности приведена в работе [3]. Средний расход реагента (кг CaCO_3 /день) для каждого излива был определен как произведение средних значений кислотности и расхода потока.

Анализ результатов

Результаты выполненных расчетов (ранжированные в порядке убывания по расходу реагента) представлены в табл. 2. Поскольку все содержащееся в воде железо учитывалось как Fe^{2+} , то в результате вычислений было получено минимальное количество реагента, представленного карбонатом кальция 100% чистоты, требуемое для нейтрализации шахтных вод, проводимой без предварительной аэрации. Полученные значения дают менее точную оценку, чем при проведении эмпирических исследований, однако они позволяют выявить ряд изливов, для которых могут быть рекомендованы пассивные системы очистки.

Таблица 2. Характеристики шахтных вод, рассчитанные для определения эффективности применения пассивных методов очистки (ср. значения)

№	Шахта	Излив	Дебит л/с	Кислот- ность мг CaCO_3 /л	Расход реагента CaCO_3		Кол- проб
					кг /день	т / день	
1	им. Калинина	штольня шахты	245	2485,40	52610,95	52,61	3
2	им. Ленина	наклонный ствол	142,78	2798,08	34517,11	34,52	3
3	Таежная	штольня	151,39	1155,45	15113,29	15,11	3
4	Коспашская	шурф №2-бис	40,74	1830,38	6443,08	6,44	3
5	Нагорная	наклонный ствол	80,56	694,84	4836,09	4,84	3
6	им. 40 лет Октября	шурф № 17	146,76	357,85	4537,53	4,54	3
7	им. Ленина	вспом. ствол	4,81	4632,25	1926,64	1,93	3
8	им. Крупской	трубный ходок	4,81	4146,13	1724,46	1,72	3
9	Усьва-3	штольня шахты	29,35	234,32	594,25	0,59	3
10	им. Володарского	штольня	5,74	1142,12	566,58	0,57	3
11	Белый Спой	шурф № 63	14,17	451,37	552,48	0,55	3
12	им. 1 мая	штольня шахты	12,22	428,38	452,37	0,45	3
13	Усьва-3	Штольня Клавдинская	6,12	544,03	287,64	0,29	3
14	им. Чкалова	Штольня Каменка	3,98	498,65	171,50	0,17	3
15	Шумихинская	скв.634 шахты	1,48	1333,58	170,59	0,17	3
16	им. 40 лет Октября	шурфы 56-62	4,26	425,30	156,48	0,16	3
17	Нагорная	родник 417а	47,29	27,59	112,73	0,11	2
18	им. 40 лет Октября	штольня шахты	5,93	213,67	109,40	0,11	3

Наибольшей кислотностью характеризуются воды, поступающие из вспомогательного ствола шахты им. Ленина и шахты им. Крупской, для их нейтрализации потребуется в среднем 4,6 г/л и 4,1 г/л чистого карбоната кальция, соответственно. Однако наибольший расход реагента в сутки тре-

буется для нейтрализации вод, поступающих из штольни шахты им. Калинина и наклонного ствола шахты им. Ленина, что обусловлено большими объемами разгружающейся воды.

Характеристики изливов из шахт им. 40 лет Октября (штольня и шурфы 56–62) и ш. Нагорная (родник 417а) (№ 16–18 в табл. 2) практически полностью удовлетворяют критериям эффективного применения пассивных технологий очистки, представленных в табл. 1. Для ряда источников (№ 9–15 в табл. 2), в виду относительно небольших дебитов, возможность использования пассивных методов также может быть рассмотрена, однако для их реализации могут потребоваться большие площади, занимаемые системами очистки, а также большее количество используемого в конструкции щелочного материала и более частая его замена.

В случае изливов шахт им. Калинина, им. Ленина (наклонный ствол), Таежной, Коспашская, Нагорная (наклонный ствол), и им. 40 лет Октября (шурф № 17) (№ 1-6 в табл. 2) высокая кислотность в сочетании со значительным расходом потока дают основания утверждать, что пассивные системы очистки не справятся с повышенной нагрузкой и их работа будет малоэффективна уже через относительно небольшой промежуток времени от начала эксплуатации. Изливы из вспомогательного ствола шахты им. Ленина и трубного хода шахты им. Крупской (№ 7, 8 в табл. 2) характеризуются маленьким дебитом, но при этом отличаются наибольшей кислотностью, что также значительно ограничивает возможность применения методов пассивной геохимической очистки.

Выводы

В настоящем исследовании выполнена оценка основных существующих в настоящее время изливов кислых шахтных вод Кизеловского угольного бассейна на соответствие критериям пригодности пассивных систем очистки, приведенным в рекомендациях [12]. На основании химического состава и расхода потока определено, что условиям эффективного применения таких систем соответствуют только 3 излива (№ 16-18, табл. 2) шахтных вод из рассмотренных 18. Источники, требующие расхода CaCO_3 менее 1 т/день (№ 9-15, табл. 2) могут быть рекомендованы для изучения возможности применения пассивных технологий, например, за счет разделения потоков, увеличения необходимых площадей и этапов очистки. Для изливов, характеризующихся чрезвычайно высокой кислотностью и (в большинстве случаев) повышенным дебитом (№ 1-8, табл. 2) существует риск, что методы пассивной очистки не будут эффективны и не справятся с повышенной нагрузкой. В последнем случае имеет смысл рассмотреть возможность комбинирования активной и пассивной систем очистки шахтных вод. Принятие решений о реализации пассивных систем очистки, кроме хи-

мических характеристик воды и расхода потока, требует учета всех имеющихся природных, техногенных и социально-экономических факторов, среди которых к наиболее важным можно отнести следующие: наличие подходящих природных материалов и их доступность, особенности ландшафта, освоенность территории и наличие свободных земельных участков необходимой площади, возможность размещения и утилизации осадка, объем финансирования строительства и эксплуатации.

Библиографический список

1. *Ахмадуллина Ф. Ю., Федотова Л.А., Закиров Р.К.* Реагентная очистка сточных вод от тяжелых металлов: теоретические основы, материальные расчеты: учебное пособие. Казань: Изд-во КНИТУ, 2016. 92 с.
2. *Геоэкологическая геоинформационная система Кизеловского угольного бассейна*: офиц. сайт. URL: <http://kub.maps.psu.ru/> (дата обращения: 20.03.2023).
3. *Еделев А. В.* Прогнозная оценка состава дренажных вод, взаимодействующих с сульфидсодержащим веществом // *Геология и геофизика*. 2013. Т. 54. № 1. С. 144–157.
4. *Джирард Дж.Е.* Основы химии окружающей среды / пер. с англ. В.И. Горшкова; под ред. В.А. Иванова. М: Физматлит, 2008. 640 с.
5. *Куликова А.А., Сергеева Ю.А., Овчинникова Т.И., Хабарова Е.И.* Формирование шахтных вод и анализ способов их очистки // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020. № 7. С. 135–145.
6. *Максимович Н.Г., Хмурчик В.Т., Березина О.А.* Формы переноса микроэлементов в речной сети и распределение их во фракциях донных отложений в районах угледобычи // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022. № 11. С. 52–66. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_52
7. *Филатова Е.Г.* Обзор технологий очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов, основанных на физико-химических процессах // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2015. №2 (13). С. 97–109.
8. *GARD Guide*. The global acid rock drainage guide. International Network for Acid Prevention (INAP). Available at: http://gardguide.com/index.php/Main_Page (Assessed 22.05.2023)
9. *Kirby C.S., Cravotta C.A.* Net alkalinity and net acidity 1: theoretical considerations // *Applied Geochemistry*. 2005. V. 20. P. 1920–1940. DOI:10.1016/j.apgeochem.2005.07.002
10. *Ushakova E., Menshikova E., Blinov S., Vaganov S., Perevoshchikov R.* Distribution of trace elements, rare earth elements and ecotoxicity in sediments of the Kosva Bay, Perm Region (Russia) // *Journal of Ecological Engineering*. 2022. Vol. 23, No. 4. DOI 10.12911/22998993/146269.

11. Skousen J., Zipper C.E., Rose A., Ziemkiewicz P.F., Nairn R., McDonald L.M., Kleinmann R.L. Review of passive systems for acid mine drainage treatment // *Mine Water and the Environment*. 2017. V. 36, P. 133–153. DOI:10.1007/s10230-016-0417-1

12. Taylor J., Pape S., Murphy N.A. Summary of passive and active treatment technologies for acid and metalliferous drainage (AMD) / Fifth Australian workshop on acid drainage 29–31 August 2005. Fremantle, Western Australia. 2005. 49 p.

13. Watzlaf G.R., Schroeder K.T., Kleinmann R.L.P., Kairies C.L., Nairn R.W. The passive treatment of coal mine drainage / Laboratory report DOE/NETL-2004/1202, U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, Pittsburgh, PA. 2004. 72 p.

14. Younger P.L., Banwart S.A., Hedin R.S. Mine water: hydrology, pollution, remediation. Boston: Kluwer Academic Publication. 2002. 464 p.

УДК 551

Хаустов А.П., khaustov-ap@rudn.ru

*Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы,
г. Москва, Россия*

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ГЕОЛОГИИ И ЭКОЛОГИИ В НАУЧНОМ НАСЛЕДИИ А.Н. ПАВЛОВА

Анализируется научное наследие выдающегося отечественного гидрогеолога А.Н. Павлова. Наибольшее внимание в исследованиях было уделено фундаментальным проблемам различных отраслей геологии, а позже – экологии. Принципиально новым являются представления о квантовой природе энергии, поступающей на Землю. Формирование стратон, обусловленных осадконакоплением, достаточно хорошо подтверждается теоретическими выкладками. Позже, с позиций эволюционизма ученым предложена дифференциация пространства событий по условиям их эволюции. Литературное творчество А.Н. Павлова, его характер и жизнь раскрыты в его книгах.

Ключевые слова: геология, фундаментальные вопросы, энтропия, экологическая культура

Khaustov A.P., khaustov-ap@rudn.ru

People's Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba

FUNDAMENTAL PROBLEMS OF GEOLOGY AND ENVIRONMENTAL SCIENCE IN THE SCIENTIFIC HERITAGE OF A.N. PAVLOV

The scientific heritage of the outstanding Russian hydrogeologist A.N. Pavlov is analyzed. The greatest attention in his research was paid to the fundamental problems of various

branches of geology, and later – of environmental sciences. Conceptions of the quantum nature of the energy coming to the Earth are fundamentally new. The formation of strata caused by sedimentation is well enough confirmed by theoretical calculations. Later, from the standpoint of evolutionism, scientists proposed the differentiation of the space of events according to the conditions of their evolution. Literary creativity of A.N. Pavlov, his character and life are revealed in his books

Keywords: geology, environmental sciences, fundamental problems, entropy, ecological culture.

«Духовности нет предела»

В этом году Александру Николаевичу Павлову исполнилось бы 90 лет. Не хочется вспоминать в прошедшем времени об этом прекрасном Человеке, но эпиграф настоящей статьи, наилучшим образом характеризует этого замечательного Ученого. Он родился 1933 г. в Ленинграде, доктор геолого-минералогических наук, профессор. Окончил Ленинградский горный институт им. Г.В. Плеханова (ЛГИ) по специальности инженер-гидрогеолог (1957). На преподавательской работе в вузах с 1966 года. Ассистент, доцент, профессор, заведующий кафедрой. Автор ряда научных монографий и учебников. Сфера его интересов – теоретические проблемы геологии и гидрогеологии, вопросы экологической культуры и методологии науки. Был заведующим кафедрой гидрогеологии и геодезии Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ), морской геологии ЛГИ. Занимал другие административные должности, но главным для него была Наука и общение. Образно, ум человека А.Н. Павлов представлял как «организатор информации; системы и законы – наиболее общие продукты этой организации».

С Александром Николаевичем я близко познакомился в 1980 г. в Томске на 50-летнем юбилее кафедры гидрогеологии ТПИ. Он приехал с замечательным человеком А.И. Коротковым. Нас поселили в соседних номерах старинной гостиницы и, как правило, вечера коротали за беседами. Я был потрясен высокой эрудированностью Александра Николаевича, его взглядами на стратиграфию и приложение теории квантов к геологическим процессам и формированию гидросферы Земли. Зачастую он обращался к Старому и Новому Заветам и приводил аналогии по истории Земли. Он изучил Фейнмановские лекции по физике и свободно оперировал логическими терминами и понятиями, во многом спорными для геологии.

Позже я получил его научные работы и лекции по системному анализу, которые очень мнегодились. Прочтя, я осознал весь талант и неординарность Александра Николаевича. Он очень трудно защищал докторскую диссертацию. По-моему, выходил на защиту три раза, а второй раз в МГУ после положительного решения совета отказался от отсылки материалов в ВАК. Как потом отметил его оппонент (известный палеонтолог и

философ С.В. Мейен) «...А.Н. Павлова просто не понимали, а он создал принципиально новую стратиграфическую шкалу в истории Земли».

Судьба сложилась так, что Александр Николаевич стал у меня четвертым оппонентом на защите докторской работы. Я прилетел в Ленинград и частями, в течение нескольких дней стал у него на кафедре докладывать работу. Только потом я понял, что это был очень эффективный прием оценки диссертации. Сотрудники кафедры ЛГИ, предварительно прочитав разделы, давали дельные замечания. На защите Александр Николаевич оценил мою работу совершенно с неожиданной стороны. В силу своей эрудиции он гораздо лучше меня осознал ее результаты. Бытует мнение, что лучше соискателя никто не знает научной проблемы, которая рассматривается в диссертации. Могу сказать – это далеко не так.

Научный путь Павлова А.Н. (коротко и с юмором он сокращал свои ФИО до «ПАН») не ограничивается скупыми сведениями, приведенными выше. Знаю, что первая его научная работа (еще на втором курсе института) была посвящена инфильтрации вод в зоне аэрации. Поле окончания института – обязательный двухгодичный производственный стаж и, конечно, научная работа. Затем аспирантура у Нестора Ивановича Толстихина в ЛГИ. Блестяще о своих учителях и этом периоде ПАН написал в книге «Старейшие гидрогеологи мира» (2016).

Наиболее известна его монография «Геологический круговорот воды на Земле» (Л.: Недра, 1977), которая была воспринята далеко не всеми специалистами. Тем не менее, отдельные материалы вошли не только в I том «Основ гидрогеологии» под редакцией Е.В. Пиннекера, но и во многие учебники (учебное пособие «Фундаментальные и прикладные проблемы гидросферы» под ред. А.Я. Гаева и др.) и были процитированы во многих научных работах. В монографии А.Н. Павлову удалось объединить в единый планетарный гидрологический и геологический круговороты воды в земных недрах. Весь круг интересов А.Н. Павлова охватить трудно, но можно выделить и отметить «прорывные» направления исследований, которые актуальны для многих естественных наук, в том числе и философии разума.

Например, еще 1983 г. им было предложено фиксистские и неомобилистские схемы развития Земли разобщить во времени и пространстве:

- неомобилизм связывался с эпохами активных перестроек, определяемых получением квантов энергии (геократические эпохи);
- фиксизм – с эпохами эволюционных изменений.

Эти идеи возникли при разработке квантовой парадигмы геологии. На этой основе в 80-90-е годы А. Н. Павловым совместно с и А.А. Баренбаумом сформулирована *новая аксиоматика геологии* в виде следующих постулатов.

Геологическое развитие Земли обусловлено получением энергии извне, которую она (Земля) получает порциями (квантами). Энергетические кванты могут появляться при прохождении Солнечной системой струйных потоков Галактики. Периодичность получения квантов энергии соответствует периодичности прохождения Солнечной системой струйных галактических потоков. Квантовая парадигма геологии выводит нас из *представлений геоцентризма* о геологическом развитии Земли на идеологию *галактицентризма*.

Эта идеология опирается на понятие открытых (неравновесных) систем как по отношению к Земле и Солнечной системе, так и по отношению к Галактике. Отметим, что принцип квантового поступления энергии и, следовательно, вещества справедлив и для мезо – и микромира. На этом принципе формируются и структурные переходы в неравновесной системе В.И. Вернадского «вода – породы – газ – живое вещество». Она поэтому и неравновесна. Определения понятия *системы* по А.Н. Павлову в методологическом смысле сводятся к тождеству: «системность~целостность».

Отсюда вытекает необходимость пересмотра эволюционных основ геологии с учетом современных достижений физики. А.Н. Павлов имел в виду проблемы *изменчивости и устойчивости; непрерывного и дискретного*. Эти проблемы им убедительно продемонстрированы в представлениях о развитии двух, генетически тесно связанных геосфер: водной – гидросферы и осадочной – стратисферы. Противоречия здесь оформились в виде двух несовместимых концепций, связанных с дискретностью участия воды в осадочных процессах, или балансом круговорота веществ. Иными словами, *устойчивость и изолированность* этих геосфер как открытых система по массе во времени в метапространстве с резонансными ритмами несовместима. А метапространство, по образному выражению А.Н. Павлова, должно быть дискретным и событийным! Вторая концепция утверждает, что массы воды и осадочных отложений на протяжении геологической истории Земли увеличиваются непрерывно по линейному закону. Нетрудно понять, что здесь речь идет о *непрерывной изменчивости*.

Исследуя возможности противоречий физического мира, А.Н. Павлов пришел к мысли о том, что *метод аналогий*, широко применяемый в геологии, не позволяет корректно ответить на вопрос об изменяемости или постоянстве законов природы.

Например, диаграмма фазового состояния воды множественна, и за пределами критических точек уравнение фазовых переходов имеет множество решений. Иначе говоря, фазовые границы исчезают (это оправдывается введенным А.Н. Павловым понятием «разрешающие функции границ»). Поле за пределами критической точки им названо *состоянием неразделимости и неслиянности*. Отмечу, что функциям границ взаимодействующих сред он придавал фундаментальные свойства. Например, по данным

В.В. Белоусова 80% осадочных пород накапливается в прибрежной (границной) зоне.

Случайность, определяющая существование и характер развития системы (эволюция) убедительно демонстрируется на явлении бифуркаций, речных систем, когда при естественных флуктуациях происходит «выбор» направления стока. В самоорганизации гидросети возникают водоразделы, долины, русла, притоки. То есть создается целостный объект с естественными четко выраженными границами и иерархическими структурами. Первопричина – турбулентные движения водных потоков. В итоге струя блуждает. Каждое новое направление – это маленькая катастрофа, это эволюция, «измена» прошлому, по нашему мнению, приводит к эволюционированию системы. Классический пример эволюций систем от хаоса к самоорганизации – реализация принципов нелинейной термодинамики И. Пригожина

По мнению А.Н. Павлова, *целое следует рассматривать как причину всего, потому что внешнее и внутреннее должно гармонизировать и неслиянно (дифференцированно?) быть неразделимыми (нонсенс?)*. Далее – вывод: принципы, на которых устроен Мир, просты и ограничены. В основном, они могут быть сведены к законам сохранения и цикличности природных процессов. В то же время, напоминается известный факт, что законы динамики справедливы только для инерциальных систем с однородным и изотропным пространством и временем. По нашему мнению, пренебрежение простыми истинами приводит к грубым интерпретациям достаточно сложных механизмов структурной нелинейности эволюции природных систем.

С современных позиций (работы В.И. Вернадского, В.П. Зверева, А.Н. Павлова, С.И. Шварцева, и др.) представления о целостности гидросферы делают ее необходимой структурой геологической системы, а различные формы круговоротов воды – это квазиизолированность. Фундаментальные свойства гидросферы впервые были сформулированы А.Н. Павловым еще в 1985г:

- Способность гидросферы обеспечивать самый высокий КПД геологической тепловой машины Земли.
- Коллективная структуризация в системе «вода-среда» как консервативность взаимоотношений воды и вмещающей среды.

Открытие этих свойств коренным образом меняет представление о гидросфере как *прерывистой водной оболочке Земли*, которым пользуется география. Такие свойства позволяют рассматривать гидросферу как компонент геологической системы, в которой природные воды (физические, химические, биологические) образуют квазиизолированные подсистемы, существующие за счет коллективной структуризации «вода-среда» и способности обеспечить эффективный перенос тепла из глубин Земли к ее внешней границе.

Данные процессы сформировали **слой жизни** – слой, в котором возможно естественное существование человека. Термин введен А.Н. Павловым в 2004 году. Слой жизни ничтожно тонок, почти невидим и составляет всего лишь 0,03% от радиуса Земли. *Эти новые для Земли оболочки – техносфера и слой жизни совпадают в пространстве.* Нарушения границ живого слоя создают для человечества принципиальные проблемы. Фундаментальные свойства граничного слоя, в котором человек живет, А.Н. Павлов сформулировал так: *запрещать и разрешать, но разрешать не везде и не всегда.* В приложении ко всем естественным системам такие функции границ носят принципиальный характер.

Границы или ограничения действий общества минимизируют потребности слоя жизни. В этой связи А.Н. Павлов считал, что появилась новая форма жизни на Земле с *минимизированными потребностями в условиях биосферы* и ввел термин – **геокиборг** [2].

Коротко суть представлений, сформулированных еще в середине 80 годов, следующая. Человек начинает создавать больше компьютеров, чем рожать детей. Воспроизводство людей минимизируется до уровня достаточности, обеспечивающей бессмертие вида. Создается ситуация, когда не только человек не может без компьютеров существовать, но и компьютеры начинают «требовать» человеческого участия. Человек рождает детей, чтобы они рождали компьютеры. Человек и киберустройства представляют собою систему – единый организм, единый по связям, функциям и существованию. Человек будущего погибнет без компьютеров и роботов, а они погибнут без человека. Он их создает, а они обеспечивают ему биологическую жизнь. Этот ход событий не только влияет на ноосферу, но и формирует ее новый облик. Общий вывод: *геокиборг – это будущее человечества, единый планетарный организм (технохемосфера). Сегодня он воздействует на все геосферы и на все физические поля Земли.*

Достижения науки и естественный ход событий сегодня подтверждают гениальные предположения А.Н. Павлова.

Еще одна проблема, которой А.Н. Павлов занимался на протяжении всей жизни, актуальна для всех наук; на ее основе ее можно определить соотношения «пространство – время». Изоморфизм стеноновских представлений XVIII века мало изменился в традиционных геологических представлениях. Их суть – пространство является однородным и изотропным, а время – однородным; то и другое – абсолютны и независимы от всего.

В представлениях А.Н. Павлова Евклидово пространство и шкала геологического времени не являются абсолютными. Если поверхность Земли принять за нуль временной шкалы (настоящее), то в направлении к центру стрела *времени будет повернута в прошлое*, а по радиусу от центра – из прошлого в будущее. В таком контексте становится реальным постулат о том, что *пространство поглощает время, материализуя его в прошлое* [3].

Становятся принципиальными положение нуля (как настоящего, разделяющего прошлое и будущее) и направление вектора времени.

В геологии стратиграфические характеристики разрезов принято производить снизу-вверх по единой и необратимой стреле времени из прошлого в будущее. В основе всех этих измерений лежит понятие времени, которое А.Н. Павлов определил так: *время – это то, что меняется, когда уже не меняется ничего*. Следуя этому определению, время и процессы разделимы.

Г. Минковский рассматривал пространство и время в форме связного многообразия и первый понял, что пространство Евклида может рассматриваться как форма проявления геометрических свойств реального мира. В четырехмерном мире Г. Минковского могут наблюдаться только события совершившиеся (прошлое). Информация о будущем отсутствует, поскольку *точки-события* еще не сформировались.

На основании этих представлений А.Н. Павлов пришел к выводу, что прошлое – *это время, связанное с пространством, оно имеет градиентную размерность* или временную напряженность. В соответствии с понятиями теории поля, напряженность – это сила, воздействующая на источник, имеет векторную направленность. Напряженность поля положительна, если сила действует по радиусу от источника и, наоборот, в направлении к источнику – отрицательной. Функции потенциала поля выполняет «остановившееся» время t , а величина $grad\ t$ показывает ту «силу», с которой *пространство поглощало время*. Главное, что она направлена по радиусу к источнику времени и потому является величиной отрицательной. На этой основе А.Н. Павлов пришел к необычной схеме соотношений «пространство–время»:

1. Время без пространства неосязуемо, оно находится вне сферы чувственного восприятия и принадлежит будущему. Это и есть некое деление вне нас, в запредельном (мире?).

2. Пространство осязуемо, мы чувственно воспринимаем его в рамках геометрии Евклида, мы его часть.

3. Время становится осязуемым только в пространстве. Пространство связывает время и останавливает его ход. От этого взаимодействия остаются различные события-метки (следы событий), формирующие различные событийные шкалы, иначе – циферблаты.

В схеме А.Н. Павлова *стрела времени направлена из будущего в прошлое*. Далее на основе значений констант М. Планка – минимальной длины ($\Delta l = 1,6 \cdot 10^{-35}$ м) и минимального времени ($\Delta t = 5,3 \cdot 10^{-44}$ с.) – рассчитан минимальный временной градиент в настоящем ($\Delta t \approx 3,3 \cdot 10^{-9}$ с/м). Это значение уже не точка в некоторой переходной зоне, а пространство D , которое помимо линейной размерности, приобретает конкретные очертания. Иными словами, это временной градиент, когда *мгновение перестает быть нулем*:

точка размазывается, становится областью. По-иному, овеществленное переходное материальное динамическое пространство начинается со значений $3,3 \cdot 10^{-9}$ с /м. Несмотря на простоту вычислений, можно ли трактовать такую материальность как начало пространственно-временной субстанции? Переход от хаоса к порядку, или наоборот? Начало динамического образа в виде точки–пространства? Скорее да!

Физика чаще принимает только одно свойство времени, связанное с его длительностью. Геостратиграфические позиции С.В. Мейена принципиально отличны: *время – это процессы; сколько процессов, столько и времен*. А.Н. Павлову ближе взгляды Н.А. Козырева в которых время представляет собой самостоятельную сущность. Это явление природы, которое должно воздействовать на объекты и протекающие процессы и, возможно, испытывать воздействия обратного характера. Время по А.Н. Козыреву обладает свойствами, которые он называл активными; показано, что время обладает переменной плотностью. Вслед за А.Н. Козыревым, построения А.Н. Павлова в 2006 г. привели к важнейшим выводам: *существует только время и пространство*, вещество не является самостоятельной сущностью (субстанцией) [3]. Оно представлено относительно стабильными сгустками пространства–времени (вроде солитонов).



Одна из последних фотографий А.Н. Павлова (фото Е.П. Каюковой)

Венцом научного творчества А.Н. Павлова стало учебное пособие (на уровне серьезной монографии) «Основы экологической культуры» (2004) [8]. Позже, в 2012 г. на ее основе вышла книга под названием «Евангелие от природы» в более популярном изложении и красочном оформлении [4].

С первого раза я не понял, как можно сочетать эти два понятия. Позже осознал, что Александр Николаевич понимал культуру как знания! Простая истина, но... увы, постичь ее не каждому дано.

Дословно А.Н. Павлов экологическую культуру рассматривал как «состояние личной ответственности перед Богом, Природой и Людьюми». Евангелие (благая весть) от Природы позволяет увидеть глубинную связь вещей в окружающем мире, связь, которая определяется единством материи, информации и духа. Триединство мира по А.Н. Павлову – основной закон природы, значит, и современной экологии как науки.

Жизнь, как форма существования материи, основана на обмене энергии; по образному выражению Л. Больцмана «стремится к положительной энтропии», сопровождающимися процессами самоорганизации динамически связанных компонентов системы «природа–общество». Отсюда формируются понятия «информационные системы», «управление», «обратная связь», «эволюция систем», «хаос», «порядок», «изменчивость», «устойчивость», «катастрофизм» и др. На этих понятиях строится современное управление социально–экологическими системами, которые неравновесны и самоорганизующиеся. Цель управления, в идеале, снижение хаоса (энтропии) со временем при выраженной бифуркации системы к порядку или эволюционной стационарности.

В представлениях А.Н. Павлова человек – это открытая природная система с низкой энтропией S (Больцмана) и высокой информационной энтропией H . Для поддержания жизни он постоянно черпает энергию из окружающей среды, производя в ней хаос, увеличивая его. За счет этого поддерживается высокое информационное поле и создается духовный мир. Прогресс развития человечества состоит в извлечении из природы «энергетических соков». Вся самоорганизация основана на поглощении внешней энергии из надсистем (животные, растения, горные породы, возникающие и др.). Вновь образовавшиеся структуры формируются по линии усложнения (закон Л. Шардена). Это называется эволюцией. Она формирует порядок и совершенство, сопряженно создавая их.

Базируясь на эволюционных представлениях Я.А. Виньковецкого, о том что *в замкнутой* системе следует рассматривать две энтропии: энергетическую S_e и структурную S_c . Перераспределение энергии приводит к росту S_e , а усложнение структурных взаимодействий компонентов системы к падению S_c . Теоретически такие изменения иллюстрируются в виде симметричной (равнобочной) гиперболы с константой a , делящей гиперболу на две равных половины, равной произведению $S_e \cdot S_c \equiv (H) = 1$, или константы (D) . Это некоторая точка (ZERO или Z в терминах А.Н. Павлова) отсчета *направленности эволюции* системы либо к хаосу (неравновесию), либо к самоорганизации (стационарности). Важно то, что на гиперболе можно выде-

лить два участка (точки) асимптотических переходов с тенденцией выполаживания ветвей гиперболы. В *открытых системах* они не имеют четких энергетических ограничений, размыты, разнородны и могут рассматриваться как ранние или поздние сроки эволюции. Важно, что они эмпирически определимы для различных структурных переходов в компонентах систем.

Виньковецкий Я.А. [1] считал, что структурная энтропия (S_c) сопряжена (соотносима?) с информационной (H), что дало возможность А.Н. Павлову получить уравнение $S \cdot H = a^2/2 = D$ (где $S = S_e \cdot S_c$). Сточки зрения природопользования начальные условия к моменту развития техногенеза означали равенство энергетической (Больцмана) и информационных энтропий (Шеннона). Иными словами, система находилась в точке Z или точке равновероятности между хаосом и порядком, а слой жизни был уравновешен.

А.Н. Павловым была разработана теоретическая модель распределения хаоса и порядка с изначальными параметрами эволюции $S_0 = 0,956^{23}$ Дж/К и $H_0 = 1$ бит/К. Пространство событий им было дифференцировано на области регрессивной эволюции (стремление к разрушению системы); прогрессивной и, возникающей в результате эволюции слоя жизни. Последняя категория характеризуется «поражительной цепью событий»: *разрушение природы > создание товара > разрушение природы > ???*

Вывод – человек формирует революционный скачок в механизме эволюции

Мы много переписывались с Александром Николаевичем, часто встречались в Москве и Петербурге, и на одной из встреч он заявил, что больше не будет заниматься наукой и перейдет к литературе. Переслал мне наброски четырех статей с предложением доработать и опубликовать. К своему стыду, я так и не сделал этого, хотя попытки были. Позже он их опубликовал. Статьи типа «Конфликты и компромиссы в науке», «Размышления к построению метапространства в геологии», «Неразделимость и неслиянность» [5–7, 9] создаются, а тем более воспринимаются очень трудно.

Александр Николаевич всегда выполнял свои обещания; так и получилась с литературой. Он написал четыре книги с названиями, раскрывающими его интересы и суть характера. Перечислю их для читателя: «Маленькие истории в большой стране», «Житейские истории», «Счастье это...», «Делайте добро». Перечитываю и восхищаюсь талантом этого Человека во всем! Как-то Александр Николаевич мне сказал, что он может часами наблюдать за детьми на детской площадке. Они искренни в своих поступках в отличие от взрослых. Сейчас, наблюдая за своим младшим внуком, я убеждаюсь в правоте этого заключения и всегда обращаю внимание на маленьких детей. Они все разные, но хорошо виден характер.

Библиографический список

1. Виньковецкий Я.А. Геология и общая теория эволюции природы. Л.: Недра, 1971. 97 с.
2. Павлов А.Н. Геокиборг – новая фаза развития ноосферы // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2006. – № 3. – С. 139–151.
3. Павлов А.Н. Геофизика. Общий курс о природе Земли. Учебник. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2006. 454 с.
4. Павлов А.Н. Евангелие от Природы. Популярное изложение основ экологической культуры. В авт. ред. ЭФР, 2011, 150 с. – [Электронный документ]. – URL: <http://www.russika.ru/pavlov-e/>. Дата обращения: 25.04.2023.
5. Павлов А. Н. Квант действия по производству информации // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2009. – № 10. – С. 146–159.
6. Павлов А. Н. Конфликты и компромиссы в науке. Третье направление // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2008. – № 6. – С. 155–169.
7. Павлов А.Н. Неразделимость и неслиянность // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2008. – № 7. – С. 172–180.
8. Павлов А.Н. Основы экологической культуры: Учеб. пособие. СПб.: «Политехника», 2004. 332 с.
9. Павлов А.Н. О феномене ноосферы (эниологическое содержание) // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2009. – № 9. – С. 208–220.

ПРОБЛЕМЫ КАРСТОВЕДЕНИЯ И ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ

УДК 551.312.3:550.461

Абдрахманов Р.Ф., Дурнаева В.Н., hydro@ufaras.ru

Институт геологии – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, г. Уфа, Россия

КАРТА КАРСТА ЮЖНОГО УРАЛА И ПРЕДУРАЛЬЯ

Территория Южного Урала и Предуралья подвержена обширным проявлениям опасного геологического процесса – карст. На основе многолетних исследований и ГИС проекта «Карст Южного Урала и Предуралья» в ИГ УФИЦ РАН создана «Карта карста Южного Урала и Предуралья». Карта наглядно представляет зоны распространения карстующихся пород, типы карста, палеодолины и др. Всю эту информацию необходимо учитывать при ведении хозяйственной деятельности на изученной территории.

Ключевые слова: опасные геологические процессы, карст, геоинформационные системы.

Abdrakhmanov R.F., Durnaeva V.N., hydro@ufaras.ru

Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia

KARST MAP OF THE SOUTHERN URALS AND CIS-URALS

The territory of the Southern Urals and Cis-Urals is subject to extensive manifestations of a dangerous geological process – karst. On the basis of many years of research and GIS-project "Karst of the Southern Urals and Cis-Urals", the IG UFRC RAS created "Karst Map of the Southern Urals and Cis-Urals". The map visually represents the zones of distribution of karst rocks, types of karst, paleovalleys, etc. All this information must be taken into account when conducting economic activities in the studied territory.

Keywords: geohazards, karst, geographic information systems.

Введение

Одним из самых опасных экзогенных геологических процессов на территории Южного Урала и Предуралья по степени неожиданности проявления на поверхности и причиняемому ущербу является карст. В республике Башкортостан карстующиеся породы распространены почти на 50% ее западной части, около 30% площади региона поражено поверхностными

карстопроявлениями. Карстовые провалы провоцируют деформации жилых и административных зданий, вызывают аварии на инженерных сооружениях, нарушают ведение хозяйственной деятельности на сельскохозяйственных угодьях. В большинстве случаев принятые меры противокарстовой защиты позволили продолжить их эксплуатацию, однако в ряде случаев здания были снесены даже после выполнения мер противокарстовой защиты [1].

Материалы и методы исследования

Многолетними исследованиями установлено закономерное увеличение частоты карстовых провалов во времени, что сигнализирует о необходимости продолжения исследований в этой сфере [2]. Внедрение современных технологий позволяет обрабатывать большие объемы данных. Геоинформационные системы (ГИС) предназначены для картирования и анализа пространственных объектов, они объединяют традиционные операции при работе с базами данных, такими как запросы и статистический анализ, с преимуществами полноценной визуализации и географического (пространственного) анализа, которые предоставляет традиционная географическая карта. ГИС-система дает возможность комплексного использования геологической информации, обеспечивая системно-иерархический подход к выделению на картах объектов различного геологического содержания, их ранжирование и корреляция между собой. Она также позволяет избежать перегруженности информацией за счет отображения данных на разных слоях ГИС-проекта. Оценка интенсивности и активности карстовых проявлений, их развития, осуществляется преимущественно по формам проявления карста на поверхности через различные количественные показатели: плотность карстовых форм на единицу площади, пораженность территории поверхностными карстопроявлениями по типам карста, формам рельефа, неотектоническим структурам и другим таксономическим единицам его районирования. Эти количественные показатели достаточно легко и точно можно определить посредством ГИС.

Анализ результатов

В Институте геологии УФИЦ РАН создан ГИС-проект «Карст Южного Урала и Предуралья». ГИС-проект (рис. 1) содержит геопространственные данные о проявлениях карстового процесса в растворимых породах на территории Южного Урала и Предуралья [3, 4]. Управление базой данных ГИС-проект «Карст Южного Урала и Предуралья» осуществляется при помощи классификатора «Карст». Разработанный классификатор является универсальным для разработки ГИС-проектов на территориях, подверженных карстовому процессу. В ходе создания ГИС-проекта были получены консультации Валерия Николаевича Катаева и специалистов ПГНИУ.

ГИС-проект содержит данные о различных формах проявления карстового процесса, соединяет в себе материалы многолетних исследований, наглядно представляет имеющуюся информацию, позволяет оперативно вносить изменения в данные и реагировать на новые проявления карстового процесса.



Рис. 1. Свидетельство о государственной регистрации базы данных ГИС-проект «Карст Южного Урала и Предуралья»

Выводы

На базе ГИС-проекта «Карст Южного Урала и Предуралья» (рис. 2) была создана Карта карста Южного Урала и Предуралья в масштабе 1:500000. На карте выделены карстовая страна Восточно-Европейской равнины и Уральская карстовая страна. Отдельно показаны разные типы карста (карбонатный, сульфатный, сульфатно-карбонатный, кластокарст), так же выделены палеодолины и другая информация. Карта наглядно представляет зоны распространения карстующихся пород, которые необходимо учитывать при ведении хозяйственной деятельности.

Работы выполнены по теме FMRS-2022–0013.

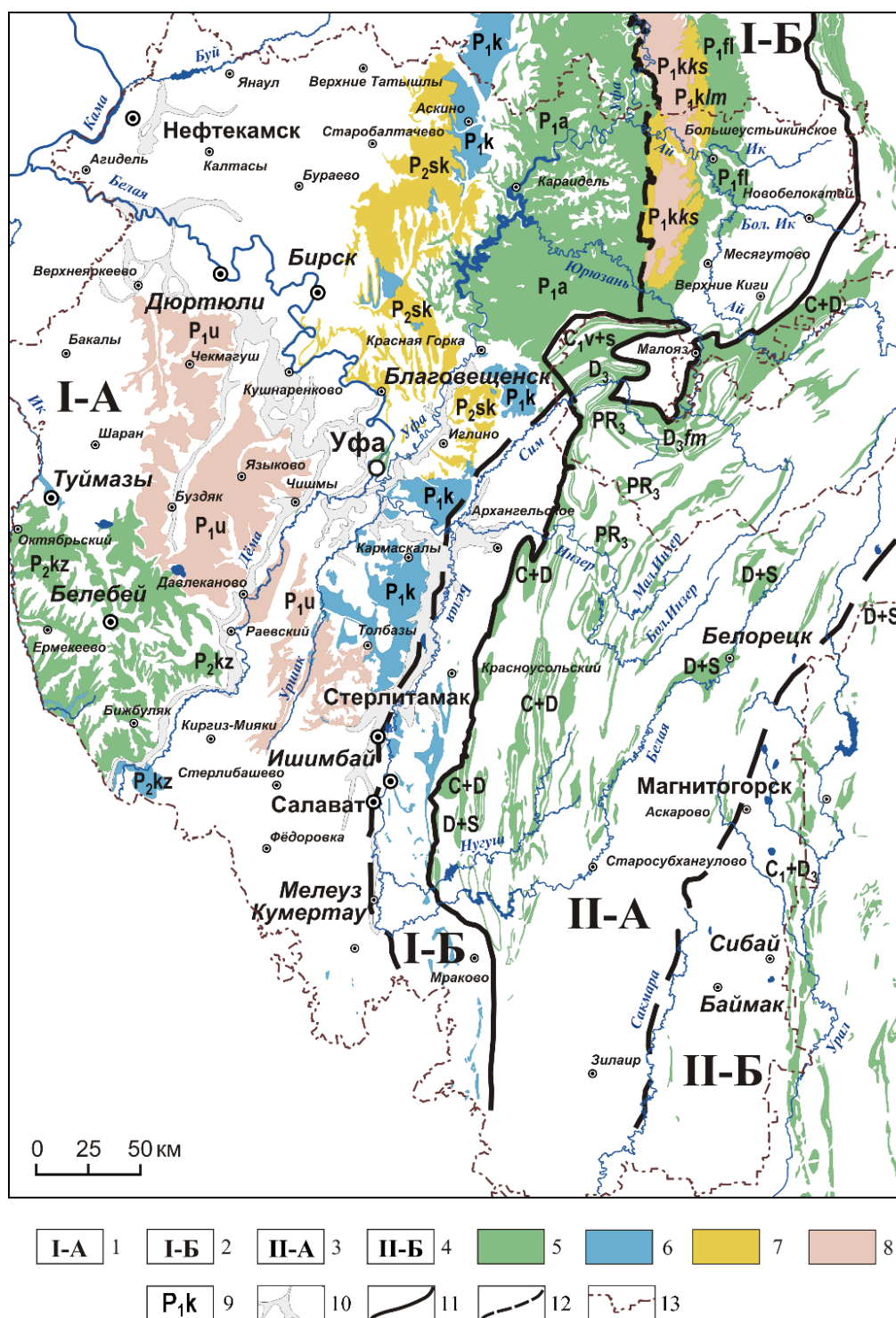


Рис. 2. Карта карста Южного Урала и Предуралья

Карстовая страна Восточно-Европейской равнины (I): 1 – равнинный карст в горизонтально и пологозалегающих породах Предуралья, 2 – равнинный и предгорный карст Предуралья в пологозалегающих и слабо дислоцированных породах. Уральская карстовая страна (II): 3 – горный карст в сильно дислоцированных образованиях Урала, 4 – равнинный карст в складчато-глыбовых отложениях Зауралья. 5-8 – типы карста: 5 – карбонатный, 6 – сульфатный, 7 – сульфатно-карбонатный, 8 – кластокарст; 9 – возраст карстующихся пород; 10 – контур палеодолин; 11-13 – границы: 11 – карстовых стран; 12 – районов карста; 13 – граница Башкортостана

Библиографический список

1. Абдрахманов Р.Ф., Мартин В.И., Попов В.Г., Рождественский А.П., Смирнов А.И., Травкин А.И. Карст Башкортостана. Уфа: Информреклама, 2002. 383 с.
 2. Абдрахманов Р.Ф., Смирнов А.И. Карст южного Предуралья и его активизация под влиянием техногенеза // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2016. – № 4. – С. 353–361.
 3. Абдрахманов Р.Ф., Дурнаева В.Н., Смирнов А.И. Использование геоинформационных технологий в природообустройстве карстоопасных районов Южного Предуралья // Природообустройство, 2018. №1. С. 64–68.
 4. Смирнов А.И., Абдрахманов Р.Ф., Дурнаева В.Н. Пораженность рельефа Южного Предуралья формами сульфатного карста // Геоморфология. 2020. № 2. С. 74–84.
- УДК 552.3

Абдурахимов С.Я., Абдурахимова М.М., Ходжиматов П.Р.
Sadrgeoeo@mail.ru, mavzyna78@mail.ru, khodzhimatov99@mail.ru
Худжандский государственный университет им. акад. Б. Гафурова
г. Худжанд, Республика Таджикистан

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КАРСТОВЫХ ЯВЛЕНИЙ В ЗАПАДНОЙ ФЕРГАНЕ

В данной статье рассматриваются геоэкологические признаки карстовых форм, а также их распространение в Западной Фергане, на поверхностные, подземные, погребенные и глубинные. Изучены распространение поверхностные карсты: кары, воронки, слепые балки и овраги, карстовые желоба, котловины, впадины, поноры, стенки с отверстиями естественных колодцев и шахт, открытые гроты и входы в пещеры, а также карстовые останцы.

Ключевые слова: карст, проявления, мелиорация, народное хозяйство, поноры, кары, воронки, известняк, инженерная геология, карстовые пещеры.

Abdurahimov S.Y., Abdurahimova M.M., Hojimatov P.R.
Sadrgeoeo@mail.ru, mavzyna78@mail.ru, hodzhimatov99@mail.ru
Khujand State University named after Academician B. Gafurov, Doctor
of Geological and Mineralogical Sciences, Khujand, Republic of Tajikistan

GEOECOLOGICAL FEATURES OF KARST PHENOMENA IN WESTERN FERGANA

The article is devoted to the geoecological features of karst forms and their distribution, underground, buried and deep. To solve the problems, surface karsts were studied: quarries,

craters, blind gullies and ravines, karst troughs, hollows, depressions, ponors, openings of the mouths of natural wells and mines, open grottoes and entrances to caves, as well as karst outliers.

Keywords: karst, manifestations, melioration, national economy, ponors, karst, craters, limestone, engineering geology, karst caves.

Введение

Ферганская депрессия расположена между каледонским горным сооружением Срединного Тянь-Шаня на севере и герцинским – Южного Тянь-Шаня на юге. Она представляет собой глубоко заложённую сложную структуру эпиплатформенного этапа развития. На территории Северного Таджикистана находится только ее западное окончание, значительная восточная часть депрессии развита на территории соседних Узбекистана и Кыргызстана.

Основная часть геологических структур депрессии сформирована на альпийском тектоническом этапе. В рельефе геологические структуры прослеживаются в виде четко выраженных орографических зон: аккумулятивные поверхности (водохранилище «Таджикское море» и прилегающие к нему территории); адырные поднятия и предгорные хребты с внутригорными впадинами.

Длительный спокойный континентальный режим в Ферганской котловине в течение всего четвертичного периода обеспечил область постепенного накопления осадков. Ритмичное опускание, временами нарушаемое пролювиальными и эоловыми процессами, привели к накоплению различной слоистости. Исследователи связывают эту периодичность с изменениями климата в четвертичное время.

Материалы и методы исследования

Современный облик Ферганской депрессии создан мощным аллювиальными, пролювиальными, комплексами р.Сырдарьи, с отложениями сухих дельт, эоловых песков, лессов и лёссовидных пород. Лессовые комплексы образуют обширный покров на первой террасе и составляют периферические части сухих дельт. По мнению Васильковского Н.П. [1], лёссы первой надпойменной террасы представляют собой образования аллювиального, а у внутреннего края – делювиального и пролювиального генезиса. Мощный покров лессов составляет плащ – верхнюю часть Ферганской впадины.

Мощность мезозойских и кайнозойских комплексов достигает 10–12 км, а четвертичных отложений – 700 м. Мощность современной русловой фации р.Сырдарьи, представленной обломочным, позднеплейстоцен-голоценовым, материалом, достигает 5–20 м. Плейстоценовые отложения представлены пестрыми глинами и слабо сцементированными песчаниками.

Мощная толща осадков четвертичного времени (сырдарьинский и голодно-степский комплексы) характеризуется в основном пролювиально-аллювиальное происхождением, а озерные, эоловые и делювиальные отложения в районе имеют резко подчинённое значение.

Поскольку кайнозойские комплексы составляют основу Кайраккумского водохранилища (Таджикское море), подробная их характеристика представляется важной для выяснения геологических особенностей района.

Итак, верхняя покровная часть северной части Таджикистана представлена кайнозойскими отложениями, общей мощностью свыше 10 км. Применительно к району работ целесообразно описать осадочные комплексы согласно стратиграфической схеме Васильковского Н.П., усовершенствованной в последствии другими геологами [1] (табл.1).

Таблица 1. Стратиграфическая схема кайнозойских комплексов района водохранилища «Таджикское море» по Васильковскому Н.П. [1] с дополнениями

<i>Индекс</i>	<i>Возраст</i>	<i>Свита (слои)</i>	<i>Горизонт</i>	<i>Обозначение</i>
Верхний комплекс				
Q _{IV}	Современные	Песчано-галечниковая, покровная	Верхний	C ₂
Q _{II-III}	Средне- и верхнечетвертичные	Пестрые песчаники, глины, пески	Нижний	C ₁
N ₂	Плиоцен	Палевая	Верхний	B ₂
N ₁	Миоцен	Бурая	Нижний	B ₁
Нижний комплекс				
P ₃ +N ₁	Олигоцен–миоцен	Гипсоносная	Верхний	A ₂
P+N ₁	Олигоцен–миоцен	Соленосная	Нижний	A ₁

Эта схема, на наш взгляд, примечательна тем, что отложения разбиваются на возрастные подразделения с учетом вещественного состава. Это имеет важное значение для оценки геоэкологических условий района. С учетом вышеуказанной схемы кайнозойские отложения района подразделяются на нижний и верхний комплексы. Верхний комплекс относится к образованиям четвертичного возраста, в нем выделяются несколько горизонтов. Нижний комплекс соответствует неогеновым образованиям. Между комплексами выделяется несогласный контакт. Породы нижнетретичного комплекса сильно дислоцированы.

Слои нижнего (неогенового) комплекса, как было отмечено выше, сильно дислоцированы. Нижний комплекс включает два горизонта – нижний A₁ (соленосный) и верхний A₂ (гипсоносный). Переход от свиты к свите является постепенным. Соленосная свита развита севернее района. Породы гипсоносной свиты слагают наиболее возвышенные участки района и обнажены на хребтах Ак-Чоп, Ак-Бель, Супе-Тау, Кизыл-Джар. Гипсоносная свита состоит из нижней, песчаниковой и верхней песчано-глинистой частей, в них развито значительное количество пластов гипса. Характерной

особенностью всей гипсоносной свиты является сильная пloidчатость пластов, которые собраны в мелкие складки, нарушенные небольшими разрывами. Общая мощность гипсоносной свиты превышает 2 км.

Бурая свита B_1 миоцена обнажается на крыльях антиклиналей Ак-Чоп, Ак-Бель, Махау-Тау и представлена песчаниками, известковистыми глинами, мергелями с прослоями известняков. Мощность свиты колеблется от 400 до 1200 м.

Палевая свита B_2 обнажается на склонах хребтов Ак-Чоп, Ак-Бель и Махау-Тау. Свита представлена мергелями, глинами и песчаниками, известняки в ней отсутствуют. В отличие от свиты B_1 в ней преобладают песчаники (до 70%). Мощность свиты превышает 200 м.

Четвертичные отложения подразделяются на древне-, средне-, верхнечетвертичные и современные. Древнечетвертичные отложения представлены горизонтом пестрых глин и песчаников C_1 и горизонтом песков и галечников C_2 . Пестрые глины и песчаники C_1 выходят в районе горы Ак-Бель, переходят в верховьях водохранилища на левый берег, где слагают останцы, представленные песчаниками, мергелями и глинами. Для свиты характерны пестрые глины и слюдистые песчаники, что указывает, по нашему мнению, на их озерное происхождение. Мощность C_1 колеблется от 150 до 250 м.

Горизонт песков и галечников C_2 распространен южнее склонов Ак-Чоп и представлен светло-серыми песками, гравием, темно-коричневыми песчаниками, мелкообломочными конгломератами и пестрыми глинами. Отложения свиты C_2 представляют собой фации краевых частей конусов выноса, которые в районе имеют широкое развитие. Углы падения древнечетвертичных отложений составляют $10-70^\circ$, что указывает на их сильную дислоцированность. Общая мощность свиты – около 300 м.

Горизонт C_2 свиты С перекрывается с резким угловым несогласием в гряде Акчоп–Акбель–Супетау четвертичными отложениями свиты D с желтовато-серыми глинами, супесями и тонкозернистыми песками с прослоями сильно засоленных и загипсованных галечников и щебня. Отложения свиты D в этой гряде также являются сильно дислоцированными, их мощность превышает 100 м. На левом берегу р. Сырдарьи свита D представлена серыми рыхлыми конгломератами с прослоями лёссов и залегает согласно на конгломератах, глинах и песчаниках свиты C_2 .

Горизонт рыхлых галечников и брекчий с прослоями глины и песчаников, т.н. адырные конгломераты мощностью 10–15 м, перекрывает слои свиты D. Отложения горизонта слабо дислоцированы, с углами падения $2-10^\circ$, и залегают с угловым несогласием на более древних отложениях. Развита на крыльях антиклинальной гряды, в средней части гряды образуют субгоризонтальные террасы, расположенные гипсометрически выше на 100-120 м и 180 м уровня р.Сырдарьи.

Стратиграфически выше по разрезу развиты лёссы и сопряженный с ним самый верхний, молодой (Q_{III}) пролювиальный комплекс межадырной впадины. К самым молодым образованиям района (Q_{III-IV}) относятся галечники низких террас, а также пески эолового происхождения, связанные с развитием аллювиальных и пролювиальных осадков, отложений такырных зон и озера Аксукон.

Анализ результатов

Таким образом, карстовые процессы выделяются в пределах западной части Ферганской депрессии, представляющей собой крупную межгорную впадину, обрамленную горными хребтами, с юга – Туркестанским и Алайским, с севера – Чаткальским и Кураминским, и заложенными в каледоно-герценскую фазу горообразования, сложенными породами палеозойского возраста. В геоэкологическом плане депрессия предоставляет собой эллипс длиной более 350 км и шириной около 150 км. На юге представлены сильно дислоцированные и метаморфизованные известняки и сланцы, на севере – интрузивно-изверженные породы и порфиново-туфовые толщи.

Предгорья сложены мезо-неогеновыми образованиями, которые в пределах долины, следуя погружению палеозойского фундамента, образуют синклинальный прогиб, а с триасового периода переживает платформенный этап развития. Начиная с миоцена она представляет собой аккумулятивную равнину, обрамленную хребтами, сложенными сланцами, песчаниками, кварцитами, терригенными и карбонатными породами палеозоя. Мощность мезозойских и кайнозойских пород в центральной части достигает 8 – 12 км, четвертичных отложений – 700 м, а современной русловой фации Сырдарья – 5- 0 м (представлена обломочным материалом средне-верхне-четвертичного и современного возраста). Нижнечетвертичные отложения представлены свитой пестрых глин и песчаников. В основном же впадина выполнена мощной толщей осадков четвертичного времени Сырдарьинского и Голодностепского циклов денудации пролювиальных и аллювиальных образований. Подчинённое значение в районе имеют озерные, эоловые, делювиальные отложения. Начиная с палеоцена в условиях относительно устойчивого морского режима, сохранившегося до конца палеогена, происходило накопление терригенно-карбонатной формации палеоцена и олигоцена. Это гипсы, загипсованные песчаники, ангидриты с прослоями известняков; сульфатные породы на западе региона и песчано-глинистые образования. Глины плотные, известковистые, часто песчаные, загипсованные

Подследственное размещение естественных структур и современного форма рельефа тесно связано с тектоническим развитием Ферганской впадины. Большая часть основных геоэкологических контуров во многом сов-

падает с альпийскими тектоническими структурами, благодаря чему в рельефе прослеживается несколько орографических зон: аккумулятивные поверхности (террасы и поймы Сырдарья); адырные поднятия (Акчоп, Акбель, Кизылджар, Супетау и Наукат) и предгорные хребты с внутренними впадинами между ними.

Внутренние впадины, расположенные между главными и предгорными хребтами, имеют равнинную, местами волнистую и наклонную поверхность (конусы выноса небольших рек южного склона Кураминского и северного склона Туркестанского хребтов). Абсолютные отметки поверхности колеблются в пределах 800-1800 метров. Западная часть Ферганской впадины и, собственно, Кайраккумское водохранилище окружены адырными поднятиями: на севере Акбельскими, Супетагскими, Наукатскими, Наманганскими, Касансайкими и Чуст-Папскими; на юге Уратюбинскими, Белисиникскими и Каратагскими; на востоке – Андижанскими и Полванташскими. Отделены между собой межгорными впадинами, массивами, высота адыров варьируют от 800- 1200 метров. Поверхность их полого-выкупая, местами почти плоская. Таким образом, формирование Ферганской впадины происходило прокатными равнинами конусов выноса и террасированной аллювиально-пролювиальной равниной.

В районе Самгарских горных цепей (Акбель, Акчоп, Кизылджар, Супетау и Наукат) карстовые поля распространены среди осадочных пород неогенового возраста, представленных породами гипсоносной (олигоцен-миоцен), бурой (миоцен), светло-бурый (плиоцен) свит. К числу растворимых горных пород относится каменная соль, гипс, ангидрит, известняк, доломит, мергель, с ними связано развитие карстовых процессов. Наибольшей растворимостью характеризуются отложения Камышкурбанского месторождения каменной соли. В зависимости от состава растворимых пород на территории исследований выделяется соляной карст, гипсовый, карбонатный.

Растворение сульфатных пород и каменной соли может происходить в чистой воде, но наличие в воде растворённой соли, не имеющей общего иона с солью, образующей растворимую породу, повышает растворимость. Развитие карстового процесса происходит в результате совместного воздействия поверхностных и подземных вод. Растворение горных пород часто сопровождается механическим размывом. Размыв может сопровождаться растворением спаек между зёрнами, что освобождает их от сцепления и облегчает смыв.

Соленосные породы развиты севернее Самгарских горных цепей. Гипсоносные породы слагают наиболее возвышенные участки района и хорошо обнажены. Как правило, они окружают соленосное ядро антиклиналей (гряды) Акчоп, Акбель, Кизылджар, Супетау и Наукат. Их мощность составляет около 600–700 м.

Переход от соленосной свиты к гипсоносной – постепенный. За нижнюю границу гипсоносной свиты принята пачка зеленоватых, желтых и коричневато-красных глин, хорошо прослеживающаяся на восточном склоне горы Кизылджар. На поверхности отложения представлены мелкозернистыми пылеватыми песками, залегающими на аллювиально-пролювиальных образованиях, и образуют группы барханов, дюн высотой от 1 до 12 м.

Взаимодействие подземные и поверхностных вод при наличии растворимых трещиноватых горных пород приводит к образованию различных карстовых форм (рис. 1).

Наибольшее развитие карст получил в сильно засоленных глинистых прослоях. По данным [3], плотность глин изменяется в пределах 2,60–2,70 г/см³, естественная влажность – 10–20,5%, пористость – 40–30%. Показатели пластичности имеют следующие величины: верхний предел – 46–50%, число пластичности – 18–21. Набухание достигает 75 – 80 %, сопротивление сдвигу изменяется от $0,15 \cdot 10^5$ Па (при $\varphi = 12^\circ$) до $0,57 \cdot 10^5$ Па (при $\varphi = 12^\circ$).

Карстовому процессу способствуют сравнительно небольшие такыр подобные уплотнённые понижения, собирающие селевые поверхностные воды, которые выщелачивают растворимые разности пород, лишают их структурных связей. После чего происходит, вымыв частиц и интенсивное развитие глинистого карста. Карст проявляется от мелких воронок диаметром от 1 м до больших 50–60 м в диаметре и глубиной до 6–7 м; характерны также колодцы, глубиной до 20 м и диаметром 4–5 м; подземные галереи, уходящие под небольшим уклоном вглубь на 50–60 м в диаметре до 4 м.

На месторождении Аксыкан каменная соль слагает положительные формы рельефа, а глинистые осадки – отрицательные, причем, первые, как правило, слагают водораздельные части долин, служит указанием того, что в условиях резко континентального пустынного климата каменная соль лучше противостоит процессам выщелачивания, чем глинистые осадки. Что полностью соответствует наблюдениям за развитием карстового процесса. Если каменная соль (в пределах обнаженной своей части на поверхности земли) подвержена карстопроявлениям в виде спорадически развитых воронок, поноров и карровых полей, то глинистые отложения в силу структурных особенностей сильно засоленных осадков интенсивно раскарстованы. Здесь значительная роль принадлежит явлению суффозии – вымыванию глинистых частиц, утративших свои структурные связи за счет выщелачивания солей. При наличии значительных уклонов рельефа этот процесс развивается очень быстро.

Карстовые формы по геоэкологическим признакам подразделяются на поверхностные, подземные, погребенные и глубинные. Поверхностные формы представлены каррами, воронками, слепыми балками и оврагами,

карстовыми желобами, котловинами, понижениями, понорами, отверстиями устьев естественных колодцев и шахт, открытыми гротами и входами в пещеры, а также карстовыми останцами.

В полевых условиях нами исследованы такие поверхностные карстовые формы, как карры, распространенные на поверхности северо-западной и северо-восточной части Кукурака (рис. 1).



Рис. 1. Карры в северо-западной части Кукурака

Карры здесь представляют собой углубления, напоминающие борозды, канавы, щели, дыры и т.п. глубиной (возрастающий с юга на север) от нескольких сантиметров до 1 редко 3 м. Их происхождение связано с растворяющим воздействием атмосферных вод на породы в краях трещин, растворяющих массивы. В формировании карров на крутых склонах Акбела, Акчапа, Супетау принимает участие и размыв. Просачиваясь при движении по трещинам, вода растворяет и выносит отдельные частицы соли, гипса, песка расширяя трещины и принимает тончайшие поры.

Поноры (вертикальные или наклонные отверстия, поглощающие поверхностную воду) выделяются на северном склоне Супетау, в местах пересечения и развития крупных трещин, уходящих в глубь карстовых массивов и представляющих собой лёгкие пути циркуляции воды.

Воронки (замкнутые впадины) различных размеров встречаются в прибрежной части реки Сырдарья до выхода на территории Узбекистана, особенно на Согаро-Аштских возвышенностях. Представлены собственно воронками (Бахмалтепа и Супетау) с достаточно крутыми склонами, иногда в форме чаш или блюдца с пологими склонами и небольшой глубиной. Их диаметр изменяется от 1 до 40 м и только в отдельных районах Супетау достигает 80 м и более. Глубина воронок не превышает 10-20 м. Количество

воронок на единице площади территории характеризует степень ее закарстованности. В окрестностях Камышкурган встречается два типа воронок: а) воронки поверхностного выщелачивания, б) провальные воронки. Они распространены в пределах растворимых пород, где отложения перекрыты песчано-глинистой толщей. Такие карстовые воронки провального типа развиты в восточной части Султанабада и Науката.

Среди карстовых пещер наибольшее внимание привлекают пещера Ходжагор (находится южнее селения Чоркух). Она сформировалась вблизи верхней границы зоны насыщения, где подземные воды движутся по закарстованным трещинам и создаются наиболее благоприятные условия для развития подземных карстовых форм. Пещера Ходжагор представляет собой систему моноклинальных близких к горизонтальным каналов, соединенных узким небольшим ходом, образующих внутри значительные по размерам пространства. Сверху воды просачиваются и движутся по трещинам. С учетом CO_2 , связанной с карбонатными породами, значительно увеличивается растворяющая способность. Воды, растворяя по пути своего движения, известняки (в зоне аэрации), насыщаются углекислым кальцием в виде бикарбоната $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Бикарбонат переходит в карбонат кальция (CaCO_3), который частично выпадает в осадок в момент, когда капли воды находятся еще на потолке пещеры. Так из капель просачивающейся воды с потолка пещер формируются натечные образования, называемые сталактитами.

Выводы

В районах развития карстового процесса применяются различные способы противокарстовых мероприятий. К ним относятся: регулирование поверхностного и подземного стока; тампонирующее карстовых пустот путём нагнетания цементного, глинистого и битумного растворов; специальные устройства и сооружения (фундаменты с учётом специфики территории, армирование, ограничение этажности и плотности застройки и др.); устройство противофильтрационных завес и др. Строительное и хозяйственное освоение закарстованных областей требует проведения комплексных инженерно-геологических изысканий с применением съёмки, разведки, геофизических, стационарных, лабораторных и других видов исследований. В практических целях карст используется путём каптажа карстовых источников, дренирующих галерей, колодцев; учитывается при разработке месторождений, формирование которых связано с палеокарстом. Карстовые пустоты используются в качестве подземных хранилищ, а также как туристические объекты.

Библиографический список

1. Васильковский Н. П. К стратиграфии четвертичных отложений Ферганы // Материалы по геологии Средней Азии, 1935. Вып. 2. С. 62–87.

2. Геоморфология и строительство. М., « Мысль», 1979. 203 с.

3. Инженерная геология СССР. Средняя Азия. Том 7 Изд. МГУ, 1978.3514. Современные экзогенные процессы рельефообразования // Материалы У11 пленума геоморфологической комиссии АН СССР. М.: Изд-во «Наука», 1970. 222 с.

УДК 551.435.8

Бажутин П.И., Щербаков С.В., Золотарев Д.Р., pavel.bazhutin.96@mail.ru,
*Пермский государственный национальный исследовательский университет,
г. Пермь, Россия*

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ДИАМЕТРОВ КАРСТОВЫХ ПРОВАЛОВ. ПРОБЛЕМЫ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ПРИМЕНИМОСТЬ В КАРСТОЛОГИЧЕСКОМ ПРОГНОЗЕ

В статье рассмотрены преимущества и недостатки численных и аналитических методов расчета диаметров карстовых провалов. Приведен авторский подход к оценке морфометрических параметров трубообразных каналов-полостей. Выполнен сравнительный анализ вычисленных значений диаметров карстовых провалов с поверхностными карстопроявлениями.

Ключевые слова: карст, расчетный диаметр провала, аналитические методы расчета, трубообразные каналы, органные трубы.

Bazhutin P.I., Shcherbakov S.V., Zolotarev D.R., pavel.bazhutin.96@mail.ru,
Perm State University, Perm, Russia

METHODS OF CALCULATING DIAMETERS OF KARST COLLAPSE. PROBLEMS AND PRACTICAL APPLICABILITY IN KARST FORE- CAST

The article considers the advantages and disadvantages of numerical and analytical methods for calculating the diameters of karst collapse. The author's approach to assessment of morphometric parameters of piping is given. Comparative analysis of calculated values of diameters of karst collapse with surface karst forms is performed.

Keywords: karst, calculated collapse diameter, analytical calculation methods, piping, organ pipes.

Введение

Тема прогноза размеров возможных карстовых деформаций является довольно острым вопросом при выполнении изысканий в районах развития

карста. Согласно СП 22.13330.2016, при проектировании сооружений на закарстованных территориях, для обеспечения их прочности и устойчивости требуется определение расчетных параметров возможных карстовых деформаций. Допускается их определять численными и аналитическими методами. Однако, прогнозная точность данных методов, в различных геологических условиях, является не определенной.

Численные методы отражают распространение напряжений в грунтовой толще, которые предопределяют возможность выхода деформации на поверхность земли. Как ни парадоксально, преимущества численных методов являются и их недостатком, выражающемся в субъективизме при построении карстологической модели. Субъективизм заключается в выборе положения и размера вторичных полостей, формирующихся в результате внутреннего вывала грунта. Как правило, такие полости, закладываются экспертно, в зоне затухания деформаций от нижележащей полости, размер вторичных полостей, также, принимается экспертно. Также, серьезными недостатками метода являются невозможность прогнозирования суффозионного истечения грунтов и учета аккумуляционной емкости растворимых пород, во многом предопределяющих возможность выхода провала на поверхность земли.

При рассмотрении аналитических методов расчета, можно отметить, что большинство существующих подходов базируются на модели смещения грунта по круглоцилиндрической поверхности или иначе называемой – модели Бирбаумера.

Несмотря на низкий порог вхождения для использования аналитических методов, с их помощью можно получить конкретный результат с однозначной трактовкой. Различные аналитические методы позволяют учитывать возможность суффозионного истечения грунтов, а также аккумуляционную емкость растворимых пород.

К недостаткам аналитических методов следует отнести тот факт, что модель Бирбаумера имеет ряд допущений, в связи с чем вычисляемые значения, нередко, оказываются завышенными. Однако, учитывая преимущества и недостатки численных и аналитических методов, авторы склонны считать, что именно аналитические методы должны занимать ведущую роль при прогнозе размеров возможных карстовых деформаций.

В первом масштабном приближении, механизмы деформирования грунтов над полостью можно описать обвальным и суффозионным типами.

Обвальный тип может развиваться по двум сценариям:

- происходит смещение цилиндра грунта в нижележащую карстовую полость, описываемое моделью Бирбаумера;
- полное обрушение слоя не происходит, а формируется трубообразный канал путем длительного обрушения грунта в своде карстовой полости.

Суффозионный тип деформирования, представляет собой случаи, когда в разрезе присутствует грунтовый слой, обрушение которого не происходит, а образуется локальное нарушение, являющееся каналом суффозионного выноса вышележащих несвязных отложений.

При этом, стоит отметить, что модель Бирбаумера, базируется на параметре критического диаметра карстовой полости. Расчет сводится к определению, произойдет ли полное обрушение слоя, или полость не проявит себя на поверхности земли.

Если рассматривать карстовые пещеры с позиции модели Бирбаумера, то должно происходить либо полное обрушение свода пещеры, либо на поверхности земли над пещерой должны отсутствовать карстопроявления. Очевидно, такой механизм противоречит природе карстового процесса и чаще процесс развивается именно по типу трубообразного канала. Такие каналы, как можно увидеть на рисунке 1, формируются в пределах тектонически ослабленных зон. Данное явление отметили исследователи-карстоведы Пермской школы еще во второй половине XX века. Наиболее полно, данное явление описано в работах Андрейчука [1], где описывается их формирование на примере территорий Предуралья и Западной Украины. В дальнейшем, исследования трубообразных каналов продолжались в 2006-2010 годах, в рамках крупного регионального проекта по мониторингу карстовых процессов Пермского края, в результате которого была сформирована база данных, содержащая сведения о зафиксированных каналах и получены некоторые статистические зависимости.

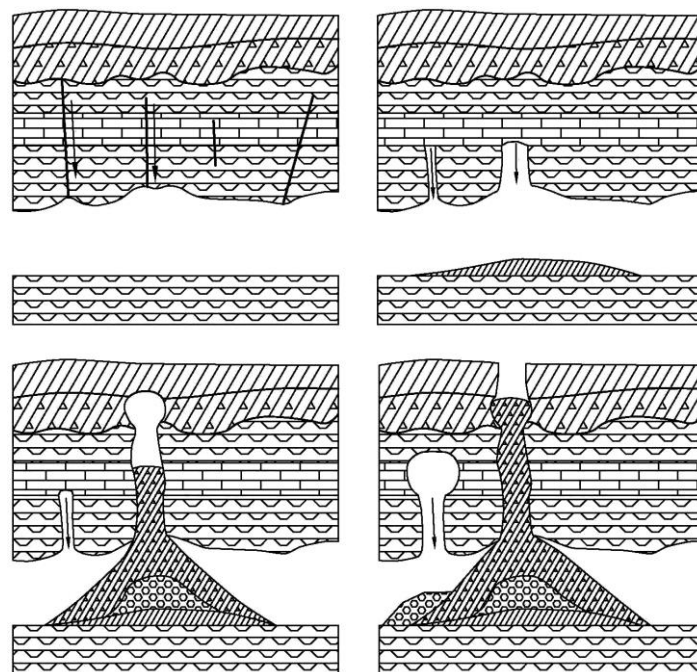


Рис. 1. Образование провалов по механизму органичных труб (по В.Н. Андрейчуку)

Стоит отметить, что вскрытие трубообразных каналов буровыми работами носит не более чем случайный характер. А изучение путем прямых наблюдений в пещерах, в большинстве случаев невозможно. Поэтому количественная оценка трубообразных каналов может быть выполнена лишь косвенно, посредством анализа поверхностных карстовых форм.

Материалы и методы исследования

Для оценки морфометрических параметров трубообразных каналов нами применена следующая методика исследования, принципиально изложенная на рисунке 2.

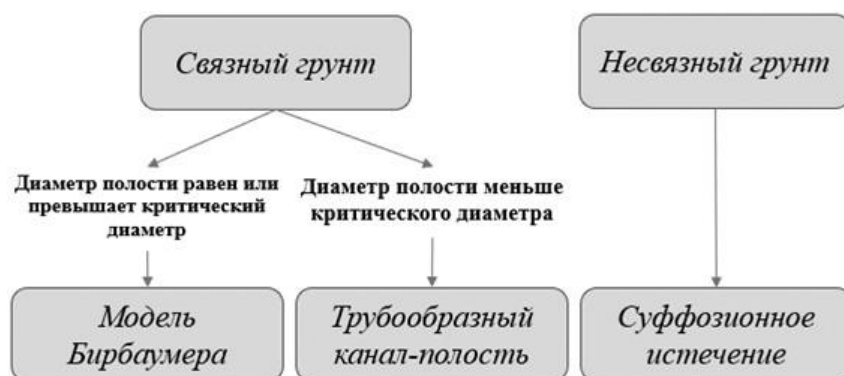


Рис. 2. Принципиальная схема вычисления расчетного диаметра карстовой деформации

На контакте карстующихся пород и перекрывающих отложений закладывается полость, над которой могут залегать связные или несвязные отложения. Для связного грунта, производится расчет критического диаметра полости при котором произойдет обрушение слоя, если размер полости достаточен для его обрушения, тогда механизм деформирования рассматривается согласно модели Бирбаумера. Если же слой грунта способен удерживаться над полостью, в таком слое принимается возможность развития трубообразного канала, диаметр которого определяется по зависимости, выведенной в Пермском университете:

$$D_{pipe} = e^{I_L} D_{fis} \frac{9,8 \rho t}{c}$$

где e – коэффициент пористости, д.е.; I_L – показатель текучести, д.е.; ρ – плотность грунта, г/см³; t – мощность грунтового слоя, м; D_{fis} – суммарная ширина раскрытия трещин в связных и полускальных грунтах, м; c – удельное сцепление, кПа.

В случае если над полостью залегает несвязный грунт, механизм его деформирования оценивается как суффозионное истечение, на основе зависимостей описанных в монографии А.В. Аникеева [3].

Как правило, при вычислении диаметра карстового провала, у инженера-геолога есть лишь ориентировочные значения размера карстовой полости, аккумуляционной емкости массива, а физико-механические свойства грунтов весьма изменчивы в пространстве. Поэтому перед началом вычислений, были заданы определенные пределы возможных размеров карстовой полости, объема аккумуляционной емкости массива и интервалы изменения свойств грунтов, равные коэффициенту вариации. Таким образом, расчет выполняется тысячи раз с изменением данных параметров. Результатом выполняемых вычислений является многочисленная выборка возможных диаметров карстовых деформаций и механизм их образования. На основе которой строятся кривые распределения по каждому типу провалообразования (рисунок 3).

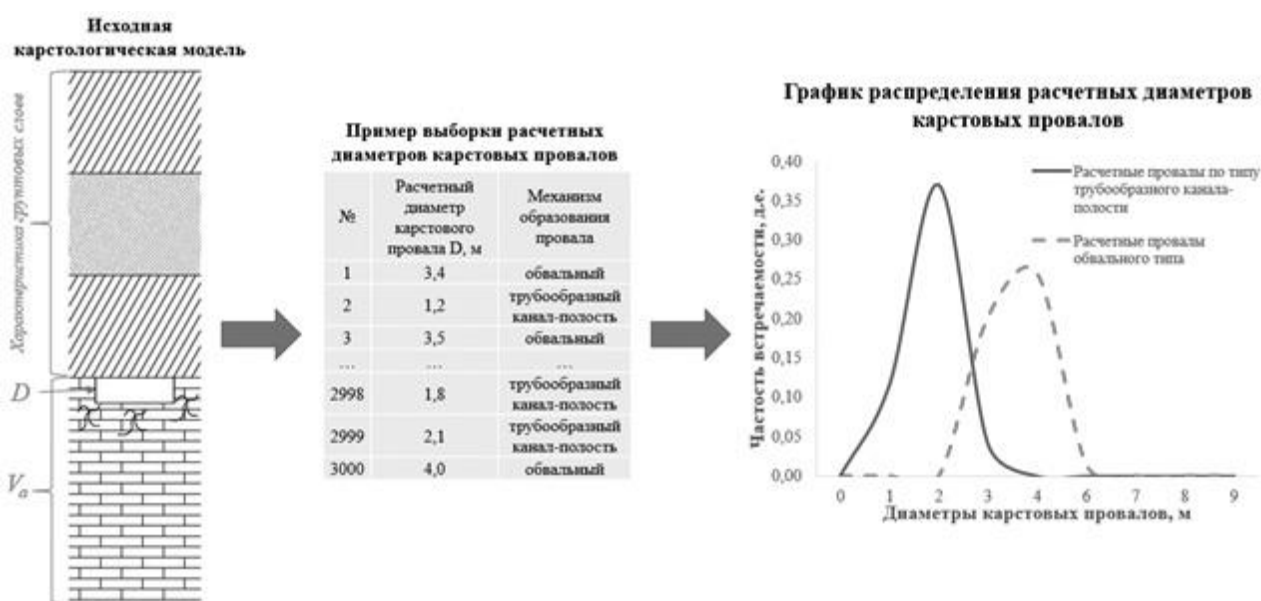


Рис. 3.Схема построения графиков распределения расчетных диаметров карстовых деформаций

Участком апробирования обсуждаемого метода исследования явился наиболее интенсивно закарстованный участок строящейся автомобильной дороги М-12 «Казань-Екатеринбург», расположенный в юго-восточной части Пермского края. Протяженность участка составляет 11,6 км.

В тектоническом отношении участок располагается в пределах Башкирского свода. На водораздельной части рек Атер и Алмаз. Абсолютные отметки поверхности земли изменяются от 200 до 250 м. Объект исследования располагается в Иренском карстовом районе, характеризующемся сульфатным типом карста, в частности ангидритами кунгурского яруса. Покровные отложения представлены глинистыми грунтами элювиального генезиса нижнепермских возраста и аллювиально-делювиальными грунта четвертичного возраста.

В результате рекогносцировочного обследования, на данном участке были зафиксированы 352 шт. различных карстопроявлений, среди которых 248 шт. являются воронками. Согласно СП 11.105.97, ч. II, интенсивность провалообразования данного участка составляет 0,77 шт./км × год, что соответствует II категории устойчивости.

Ввиду высокой степени закарстованности, участок отличается хорошей изученностью геологических условий. В исследовании рассмотрены геологические разрезы 9 скважин, расположенных на расстоянии 1,0–2,0 км (рисунок 4).



Рис. 4. Наиболее интенсивно закарстованный участок строящейся автомобильной дороги М-12 «Казань-Екатеринбург»

Каждая скважина явилась отдельным участком исследования, вблизи которой были выделены морфологически схожие карстовые воронки, находящиеся в однородных геоморфологических условиях. В результате появилась возможность оценить распределение диаметров морфологически схожих воронок. Важно отметить, что при определенной частности разбивки диапазона изменения величины, начинает проявляться бимодальный характер дифференциальной кривой распределения, что указывает на различные механизмы их образования (рисунок 5А).

Анализ результатов

В результате выполненных вычислений и проведенного анализа поверхностных карстовых форм, была получена возможность совместить кривые расчетных диаметров карстовых провалов и диаметров существующих карстовых форм (рисунок 5). Как можно заметить, графики отличаются общим видом, однако, кривая расчетных провалов несколько «отстает» от фактически зафиксированных воронок. Это легко объясняется тем фактом, что вычисление расчетного диаметра провала производится на момент его образования, без учета дальнейшего выполаживания бортов.

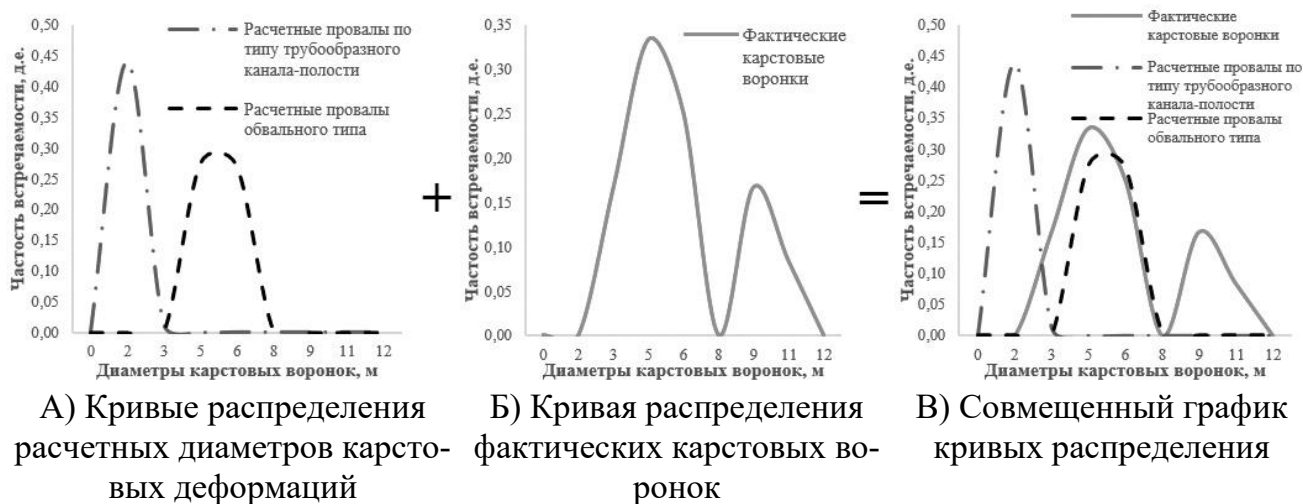


Рис. 5. Порядок построения совмещенного графика кривых распределения диаметров расчетных деформаций и фактически зафиксированных карстовых форм

В работе В.В. Толмачева и Ф. Ройтера [4] отмечается, что при выполаживании бортов провалов, их размер, в общем случае, увеличивается в 1,5-2,0 раза. Применяв данный коэффициент к величинам диаметров существующих карстовых воронок, можно оценить правомерность применения обсуждаемого расчетного метода. На рисунке 6 приведены совмещенные графики кривых распределения расчетных диаметров провалов с диаметрами фактических карстовых воронок (рисунок 6А) и с предположительными диаметрами карстовых воронок в момент их возникновения (рисунок 6Б).

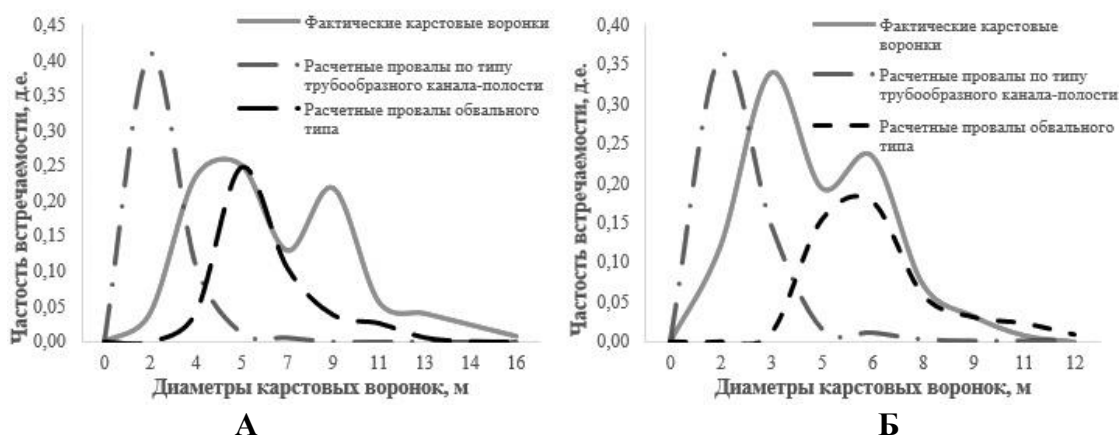


Рис. 6. Совмещенные графики кривых распределения расчетных диаметров провалов с диаметрами фактических карстовых воронок (А) и с предположительными диаметрами карстовых воронок в момент их возникновения (Б)

Можно отметить, что на рисунке 5Б кривые распределения стали в большей мере описывать друг друга, но не наблюдается идентичное совпадение. Очевидно, что такое упрощение при вычислении начального диаметра карстовой воронки до выполаживания бортов не описывает природу

процесса, и допускается применять лишь для получения ориентировочных значений. Тем не менее, в первом масштабном приближении, можно отметить сходимость кривых распределения, а соответственно правомерность применения предлагаемого расчетного метода.

Выводы

В заключение, необходимо подчеркнуть, что предлагаемая методика исследования оказалась правомерной применительно к рассматриваемому объекту исследования, однако, нуждается в апробации в иных геологических условиях и в дальнейшем может корректироваться.

Библиографический список

1. *Андрейчук В.Н.* Провалы над гипсовыми пещерами-лабиринтами и оценка устойчивости закарстованных территорий. Черновцы: Прут, 1999. 52 с.
2. *Андрейчук В.Н., Дорофеев Е.П., Лукин В.С.* Органные трубы в карбонатно-сульфатной кровле пещер // Пещеры. Проблемы изучения: Межвузовский сборник научных трудов; Пермь, 1990. С. 16–23.
3. *Аникеев А.В.* Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска // Москва: РУДН, 2017. 328с.
4. *Толмачев В.В., Ройтер Ф.* Инженерное карстоведение. М.: Недра, 1990. 151 с.

К ВОПРОСУ ИЗУЧЕНИЯ ОЦЕНКИ КАРСТОВОЙ ОПАСНОСТИ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

В статье рассматриваются особенности изучения закарстованности урбанизированных территорий, для которых в силу высокой плотности населения, высокой стоимости городских земель, объектов недвижимости характерна существенно большая опасность карстового процесса и наносимого им ущерба: социального, экономического, экологического, по сравнению с менее освоенными участками. В рамках данной работы в качестве изучаемой выбрана территория окрестностей г. Уфы, где по совокупности значений, описывающих природные и техногенные условия, проведен многофакторный анализ методом главных компонент (МГК). На основании проведенного исследования сделаны выводы, что применение многофакторного анализа весьма полезно при оценке карстоопасности, так как позволяет оперативно определить перечень существенных факторов, влияющих на развитие и проявление карстового процесса в конкретной обстановке.

Ключевые слова: карстовая опасность, многофакторный анализ, метод главных компонент, урбанизированные территории.

Drobinina E.V., alenadrobinina@yandex.ru

Perm State University, Perm, Russia

SPECIFICS OF KARST HAZARD ASSESSMENT WITHIN URBANIZED AREAS

The article deals with the specifics of karst hazard assessment within urbanized areas, which due to high population density, high value of urban land and real estate are characterized by significantly greater danger of karst process and the damage it causes: social, economic, environmental, compared with the less developed areas. The territory of Ufa's outskirts was chosen as the study area in the research. A multifactor analysis using the principal component method (PCA) was conducted on a set of values describing natural and technogenic conditions. As a result, conclusions are drawn that application of the PCA is rather useful at karst hazard assessment. It allows to promptly define the list of the essential factors influencing on development of karst process and its phenomenon within specific areas.

Keywords: karst hazard, multivariate analysis, principal components method, urbanized areas.

Введение

По данным Рагозина А.Л. [5] на начало XXI в. в России проявлениям карстового процесса было подвержено около 13% территории, в том числе

в пределах более 300 городов и тысяч поселений, в которых уже тогда проживало ориентировочно 19% населения страны. Освоение новых участков под городскую застройку и увеличение плотности последней определяет специфику протекания в пределах урбанизированных территорий опасных геологических процессов.

Для урбанизированных территорий в силу высокой плотности населения, высокой стоимости городских земель, объектов недвижимости характерна существенно большая опасность карстового процесса и наносимого им ущерба: социального, экономического, экологического, по сравнению с менее освоенными участками. Под урбанизированной территорией подразумевается сложная природно-техническая система, характеризующаяся взаимодействием природной и техногенной компонент, оказывающих существенное влияние друг на друга. К природным источникам опасности на таких территориях относятся опасные геологические и инженерно-геологические процессы, активность которых во времени и в пространстве определяется здесь техногенными факторами [4]. Урбанизированные территории можно отнести к так называемым районам «нереализованной, ожидаемой опасности» [2], где имеются все условия развития карстового процесса, а поверхностные формы его проявления не зарегистрированы по причине техногенного изменения рельефа местности.

К наиболее значимым техногенным факторам развития карста в пределах градопромышленных агломераций относятся утечки из водонесущих коммуникаций, дополнительные нагрузки от зданий и сооружений, интенсивные откачки из водоносных горизонтов, нарушение сплошности покровных отложений. Откачки являются одним из наиболее важных видов техногенного воздействия, играющего большую роль в потере устойчивости закарстованных территорий в связи с разрушением слабопроницаемых пластов [2].

Цель данного исследования рассмотреть совокупность природных и техногенных факторов развития карстового процесса и оценить вклад последних, недоучет которых при проведении оценки карстовой опасности может привести к весьма негативным последствиям. В качестве природных факторов выбраны: неотектонические (плотность линеаментов, $км/км^2$ и количество их пересечений – узлов, $шт./км^2$), геоморфологические (удаленность от водотоков, $м$) и геологические (глубина залегания, $м$, и уклон поверхности карстующихся сульфатных пород кунгурского яруса нижней перми, $град.$). В качестве техногенных факторов рассмотрены: плотность застройки, $шт./км^2$, плотность дорожной сети, $км/км^2$, удаленность от дорог, $м$.

В рамках данной работы в качестве изучаемой выбрана территории окрестностей г. Уфы. Поверхностные карстовые формы представлены

здесь в основном воронками провального генезиса, диаметром 10–90 м, нередко – 200 м, глубиной от 50 до 40 м. На дне воронок часто встречаются поноры, поглощающие дождевые и талые воды, а также воды водоносных горизонтов в перекрывающей толще. Часто встречаются погребённые карстовые формы, выполненные глинистым материалом. Формы подземного карста, иногда заполненные глиной: каверны, полости, пещеры – приурочены к интервалам сезонных колебаний уровня подземных вод [1].

Карстопроявления концентрируются вдоль склонов и бортов речных долин и оврагов, что связано с частым обнажением на этих участках карстующихся пород, их выветриванием, развитием трещин бортового отпора. Участками трещины бортового отпора расширены выщелачиванием и выполнены песчано-глинистым материалом. Ширина трещин варьирует от нескольких сантиметров до нескольких метров. Кроме того, в основании склонов карстующиеся сульфатные породы могут непосредственно контактировать с речными водами. В районе г. Уфы около 85% всех зафиксированных поверхностных карстопоявлений локализовано вдоль склонов рек [1].

Отмечается активизация карстового процесса на территории г. Уфы вследствие подрезки склонов, закладки глубоких котлованов, прокладки водонесущих котлованов с неизбежными утечками, эксплуатацией водоносных горизонтов и др. [1].

Материалы и методы исследования

Сложность изучения геологических процессов обусловлена затруднительностью, а иногда невозможностью непосредственного наблюдения и измерения факторов их протекания. Зачастую об опасных геологических процессах можно судить лишь по проявлениям [3].

В данной работе исследование природных и техногенных условий в окрестностях города проводилось посредством многофакторного анализа методом главных компонент (МГК), который выполняет роль метода редукции, сжатия информации и метода, способствующего вскрытию причинно-следственных связей, выявлению закономерностей и т.п. [3]. Преимуществом МГК является уменьшение количества переменных в наборе входных данных при минимальной потере информации, иными словами, с его помощью из всего перечня факторов можно выбрать существенные, которыми в конкретной обстановке контролируется карстовый процесс. Данный анализ осуществлен в программе RStudio, представляющей собой свободную среду разработки программного обеспечения с открытым исходным кодом для языка программирования R, предназначенного для статистической обработки данных с возможностью графической интерпретации результатов.

Концептуально идея применения многофакторного анализа в работе реализована следующим образом. Вся совокупность поверхностных карстовых форм, зафиксированных на изучаемой территории разделена на две выборки относительно расположения: в черте населенных пунктов и за их пределами. В точки локализации карстопроявлений с частных растровых моделей изучаемых факторов извлечены значения последних. Все значения впоследствии нормализованы путем их деления на максимальное значение соответствующего фактора в выборке. Построение растровых моделей изучаемых факторов проводилось с применением геоинформационных систем (ГИС): созданы карты плотности линеаментов, их узлов, дорожной сети, застройки, удаленности от дорог, рек, глубины залегания кровли кунгурских гипсов и ее уклона.

Затем с помощью RStudio осуществлен многофакторный анализ методом главных компонент с последующей визуализацией облаков точек обеих выборок относительно осей двух первых главных компонент, в большинстве описывающих дисперсию. Благодаря такой визуализации стал очевидным значительный вклад техногенных факторов в распределении карстовых форм в пределах населенных пунктов (рис.1). На рис. 1 видно, что добавление в анализ техногенных факторов значительно изменяет характер распределения точек в зависимости от главных компонент.

На рис. 1 изображены векторы, соответствующие переменным – факторам – в исходном наборе данных. Направление относительно осей графика свидетельствует о характере связи каждого из исследуемых факторов с главными компонентами. Так, если вектор сонаправлен с осью, то между ними есть положительная связь, и наоборот. Косинус угла между векторами и осями графика – это коэффициент корреляции между показателями, поэтому чем меньше угол, тем сильнее связь. Если векторы перпендикулярны друг другу или осям графика, то показатели совсем не связаны, коэффициент корреляции равен 0.

Далее для оценки влияния каждого из исследуемых факторов на изучаемой территории проведен графический анализ с оценкой корреляционной связи каждого фактора с главной компонентой: чем выше корреляции фактора с последней, тем выше его влияние среди прочих факторов – тем больше внимания нужно уделять его изучению при карстологических исследованиях.

Анализ результатов

В результате проведенного анализа сделаны выводы о необходимости учета техногенных факторов, таких как плотность застройки, плотность дорожной сети при оценке карстовой опасности в пределах освоенных территорий. Из природных факторов наиболее значимыми оказались неотекто-

нические, что вполне согласуется с природными условиями изучаемой территории. Еще в 70-х годах XX века отмечалось, что активность карстового-суффозионного процесса в долинах рек Белой и Уфы находится в прямой зависимости от неотектонических подвижек [6]. Максимальная плотность карстовых воронок отмечается на участках наиболее интенсивных тектонических поднятий [1].

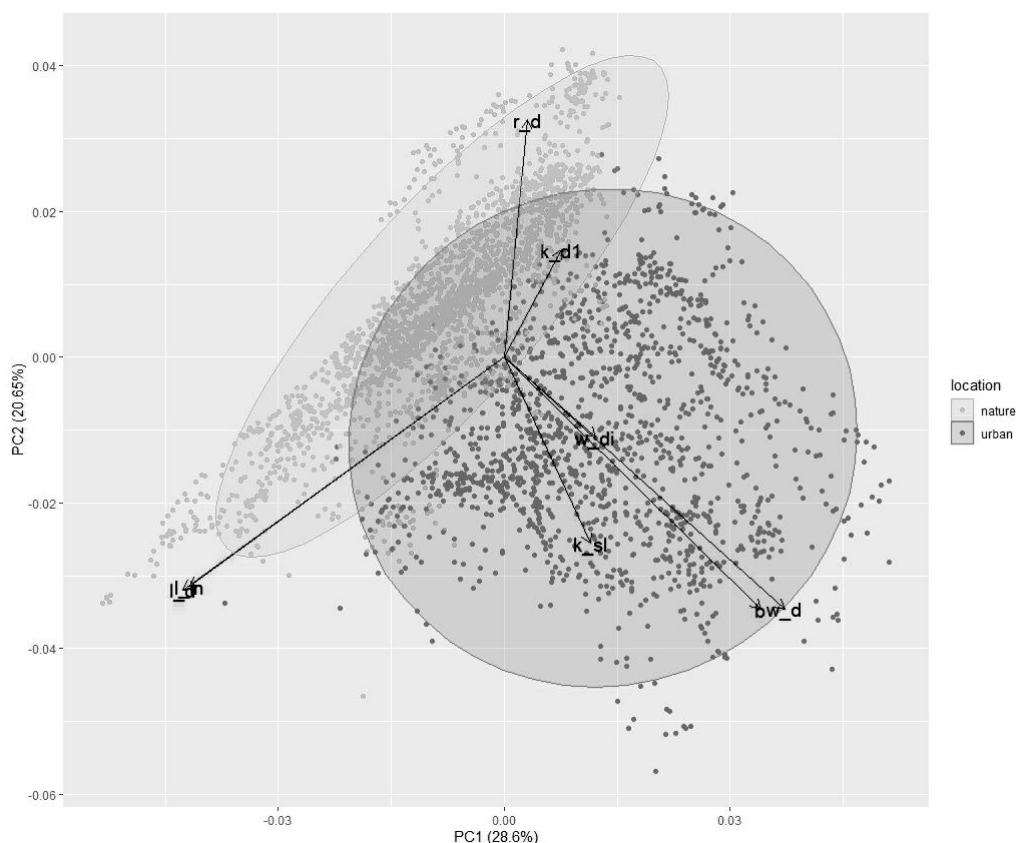


Рис. 1. Облака точек двух выборочных совокупностей (urban – в пределах населенных пунктов, nature – за их пределами) в координатах двух главных компонент PC1 и PC2 и векторы исследуемых факторов (l_d – плотность линейментов, l_in – плотность пересечений линейментов (узлов), k_d1 – глубина залегания кровли гипсов, k_sl – уклон кровли гипсов, r_d – удаленность от водотоков, b – плотность застройки, w_d – плотность дорожной сети, w_di – удаленность от дорог)

Если оценивать отношение каждого фактора к главной компоненте за пределами застроенных территорий, то несложно заметить, что в тесной корреляционной связи с ней находятся неотектонические факторы, на втором месте отмечаются: удаленность от водотоков и глубина кровли кунгурских гипсов (рис. 2). То есть именно эти факторы из перечня изучаемых на данной территории контролируют распределение поверхностных карстовых форм. Однако при рассмотрении застроенных территорий и введении в анализ техногенных факторов, последние оказываются на втором месте по степени влияния на распределение карстовых воронок (плотность застройки и плотность дорожной сети, рис. 3) после неотектонических. При-

мечательно, что в целом картина меняется: на участках техногенного воздействия здесь следующими по важности оказываются геологические факторы, отодвигая геоморфологические, что может быть связано с изменением гидрогеологических условий при техногенной планировке территории и эксплуатации сооружений. То есть, на застроенных территориях доступ пресных вод к карстующимся отложениям уже контролируется в большей мере техногенными факторами.

Результаты многофакторного анализа подтверждают выводы о том, что проявления карстовых форм в районе г. Уфы напрямую не зависят от рельефа кровли кунгурских гипсов. Проявления карстового процесса на поверхности водораздельного плато имеют связь с карбонатной толщей, дизъюнктивной тектоникой, и новейшими подвижками, которые нарушили сплошность водоупора и обусловили нисходящее движение пресных вод с поверхности в карстовый массив и циркуляцию вод между уфимским и кунгурским ярусами [1]. Разумеется, речь идет не о полном отсутствии связи карста с характером кровли карстующихся гипсов, а лишь о том, что на изучаемой территории в качестве определяющих факторов развития карстового процесса выступают неотектонические и техногенные.

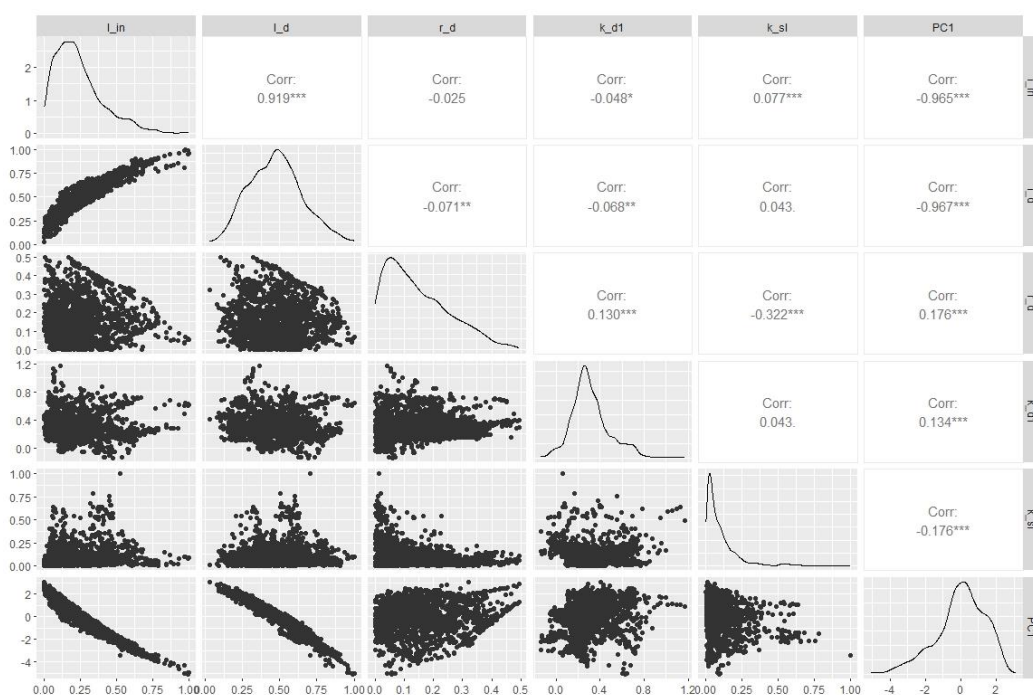


Рис. 2. Матрица диаграмм рассеяния природных факторов и их корреляция с главной компонентой (PC1). (Условные обозначения: L_d – плотность линейментов, L_in – плотность пересечений линейментов (узлов), k_d1 – глубина залегания кровли гипсов, k_sl – уклон кровли гипсов, r_d – удаленность от водотоков; corr – коэффициент корреляции с PC1)

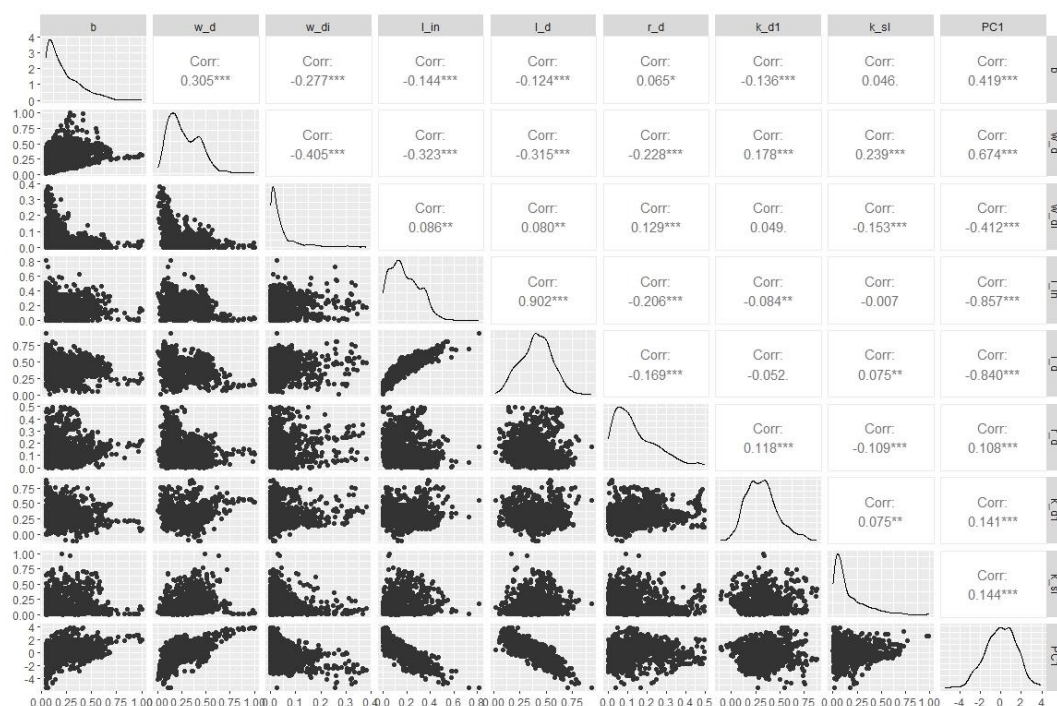


Рис. 3. Матрица диаграмм рассеяния природных и техногенных факторов и их корреляция

с главной компонентой (PC1). (Условные обозначения: l_d – плотность линеаментов, l_in – плотность пересечений линеаментов (узлов), k_d1 – глубина залегания кровли гипсов, k_sl – уклон кровли гипсов, r_d – удаленность от водотоков, b – плотность застройки, w_d – плотность дорожной сети, w_di – удаленность от дорог; corr – коэффициент корреляции с PC1)

Выводы

Таким образом, применение многофакторного анализа весьма полезно при оценке карстоопасности, так как позволяет оперативно определить перечень существенных факторов, влияющих на развитие и проявление карстового процесса в конкретной обстановке. Так, на изучаемой территории г. Уфы и окрестностей к числу существенных следует отнести неотектонические и техногенные факторы. При оценке карстоопасности на освоенных территориях необходимо, кроме природных факторов, включать в анализ техногенные, которыми в значительной мере контролируются развитие карстового процесса и его проявления на земной поверхности.

Библиографический список

1. Абдрахманов Р.Ф., Мартин В.И., Попов В.Г., Рождественский А.П., Смирнов А.И., Травкин А.И. Карст Башкортостана. Уфа, 2002. 384 с.
2. Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. Москва: РУДН, 2017. 328 с.
3. Белонин М.Д., Голубева В.А., Скублов Г.Т. Факторный анализ в геологии. М.: Недра. 1982. 269 с.

4. Геологический риск урбанизированных территорий: монография / В.И. Осипов, А.В. Аникеев, В.Н. Бурова [и др.]; под редакцией В.И. Осипова. Москва: РУДН, 2020. 312 с.

5. Рагозин А.Л. Общие закономерности формирования и количественная оценка природных рисков на территории России // Вопросы анализа риска. 1999. Т. 1. № 2 4. С. 28–47.

6. Рождественский А.П. Новейшая тектоника и развитие рельефа Южного Приуралья. М.: Наука, 1971. 303 с.

УДК 551.44

Килин Ю.А., Минькевич И.И., iks-org@mail.ru

*Пермский государственный национальный исследовательский университет,
г. Пермь, Россия*

ДИНАМИКА ОБРАЗОВАНИЯ КАРСТОВЫХ ВОРОНОК НА ЯСЫЛЬСКОМ ПОЛИГОНЕ

Исследования выполнены в Пермском крае, где широко развит современный и древний карбонатный и сульфатный карст. Общая площадь карстовых районов края составляет 45,9 тыс. км², а площадь карбонатных и сульфатных карстующихся пород равна 35,5 тыс. км². В тектоническом отношении карстующиеся отложения распространены на окраине Восточно-Европейской платформы, Предуральского прогиба, Западно-Уральской складчатой зоны и Центрально-Уральского поднятия. Каждая геотектоническая обстановка характеризуется особым тектоническим режимом, что находит свое отражение в мощности зоны активного водообмена и карстообразования. В работе используются материалы многолетних экспедиционных исследований авторов, исследовательских работ сотрудников кафедры динамической геологии и гидрогеологии, проводимых под руководством, заведующего кафедрой профессора Катаева Валерия Николаевича.

Ключевые слова: карст, карстовые воронки, полости, Иренинский карстовый район, Ясылский полигон.

Kilin Yu.A., Minkevich I.I., iks-org@mail.ru

Perm State University, Perm, Russia

DYNAMICS OF FORMATION OF KARST CRATERS AT THE YASYLSKY LANDFILL

The research was carried out in the Perm Region, where modern and ancient carbonate and sulfate karst is widely developed. The total area of the karst areas of the region is 45.9 thousand km², and the area of carbonate and sulfate karst rocks is 35.5 thousand km². Tectonically, karst deposits are common on the outskirts of the East European Platform, the Pre-Ural

Trough, the West Ural Folded Zone and the Central Ural Uplift. Each geotectonic situation is characterized by a special tectonic regime, which is reflected in the capacity of the zone of active water exchange and karst formation. The work uses the materials of long-term expeditionary research of the authors, research works of the staff of the Department of Dynamic Geology and Hydrogeology, conducted under the guidance of the head of the department, Professor Kataev Valery Nikolaevich.

Keywords: karst, sinkholes, cavities, Irensky karst area, Yasylsky landfill.

Введение

В Пермском крае особенно интенсивно развивается карст на участках выхода отложений кунгурского яруса, которые развиты в восточной части платформы и прогибе. Здесь выделяются филипповский и иренский горизонты. В основании кунгурского яруса залегают доломиты и известняки филипповского горизонта, мощностью 50–60 м. Выше по разрезу залегает сульфатно-карбонатная толща иренского горизонта, представленная четырьмя сульфатными пачками: лунежской, демидковской, шалашнинской и ледяно-пещерской, которые разделены маломощными карбонатными пачками – тюйской, елкинской и неволинской. Формирование химического состава подземных вод зоны активного водообмена зависит от литологического состава карстующихся пород, геотектонической обстановки, климатических и гидрогеологических условий района. Характерной особенностью иренского горизонта служит закарстованность сульфатных пачек. Мощность горизонта изменяется в зависимости от структурно-тектонической обстановки, геоморфологического положения участка, что объясняется различной степенью трещиноватости и закарстованности. На территории Иренского карстового района, где расположен Ясылский полигон, общая мощность горизонта (всех его пачек) составляет 130 м.

Материалы исследования

Иренский карстовый район является классическим районом проявлений гипсового карста, к которому относится Ясылский полигон. Здесь выявлены следующие типы карста (по классификации Г.А. Максимовича, 1963): 1) голый – карстующиеся породы выходят на поверхность земли; 2) задернованный – на выровненных участках или в понижениях рельефа карстующиеся породы задернованы; 3) подэлювиальный и подаллювиальный – под отложениями соответствующего генезиса; 4) закрытый – под коренными соликамскими породами (рис. 2).

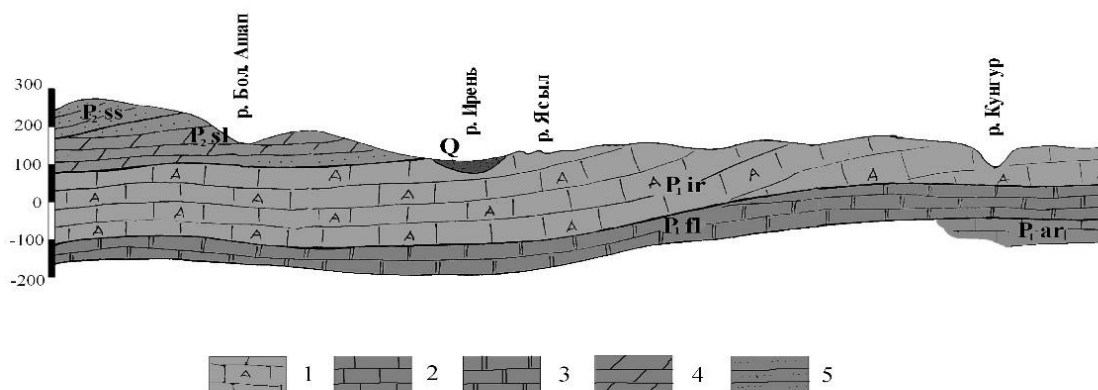


Рис. 1. Геологический разрез Иренского карстового района

1 – гипсы и ангидриты; 2 – известняки; 3 – доломиты; 4 – мергели; 5 – аргиллиты и алевролиты; 6 – песчаники. P₁šš – шешминский горизонт, уфимский ярус, нижний отдел пермской системы; P₁sl – соликамский горизонт, уфимский ярус, нижний отдел пермской системы; P₁ir – иренский горизонт, кунгурский ярус, нижний отдел пермской системы; P₁fl – филипповский горизонт, кунгурский ярус, нижний отдел пермской системы, P₁ar – артинский ярус, нижний отдел пермской системы.

Отличительная особенность района заключается в большом количестве провальных и суффозионно-карстовых воронок, увеличении глубины карстовых форм с востока на запад, омоложении карста – «дочерние воронки», резко обрывающимся склонам воронок с оползанием дерна. Наибольшей закарстованностью отличаются участки лунежских гипсов, выходящих на поверхность и перекрытых почвенным слоем или незначительным чехлом элювиальных отложений. На этих участках встречаются карстовые поля и гнезда с плотностью 85–95 воронок на 1 га (8500–9500 шт/км²). Площадной коэффициент закарстованности составляет более 50%, объемный показатель поверхностной закарстованности – 570 мм [3].

Больше всего изучены карстовые процессы в районе прохождения трасс магистральных газопроводов через Ясылское карстовое поле. Здесь создан полигон, на котором в течение 25 лет проводились карстологические исследования, с 2007г выполняется мониторинг за карстовыми процессами [1,2]. Для объективной оценки закарстованности выполнено карстологическое исследование и прилегающей территории (буровые и геофизические работы, лабораторные исследования грунтов и карстующихся пород, поверхностных и подземных вод). В результате были получены сведения о поверхностных и подземных проявлениях карста. В зависимости от разных геологических условий в зонах вертикальной нисходящей циркуляции, переходной и горизонтальной циркуляции трещинно-карстовых вод образовались воронки разного генезиса: коррозионно-провальные, коррозионно-суффозионные, коррозионно-просадочные, коррозионно-эрозионные, провальные и полигенетические. Интенсивность провалообразования еще при

строительстве газопроводов в 1984–1985 гг. на отдельных участках голого, задернованного и покрытого карста достигала 130–250 и более случаев на 1 км² [3].

Анализ результатов исследования

По данным многолетнего мониторинга с 2007 по 2022 г. в пределах полосы шириной 200м и длиной 5,0км было зафиксировано 817 провалов, в среднем 51 провал на 1 км² в год. Наибольшее количество карстовых воронок и просадок зафиксировано в многоводные годы, когда в летний период выпадает значительное количество дождевых осадков и дожди носят ливневый характер (рис. 2).

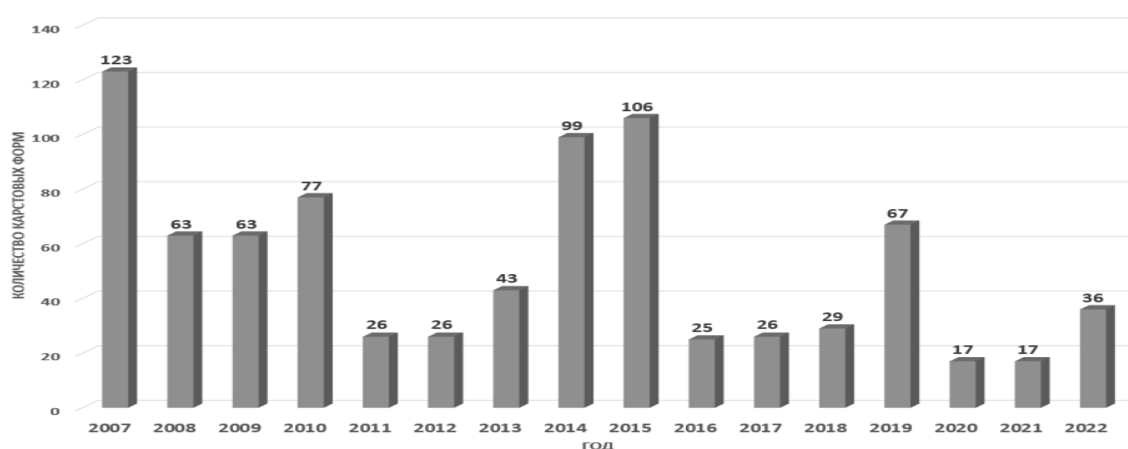


Рис. 2. Количество карстовых воронок, просадок на полигоне площадью 1 км² в год

Воронки по диаметрам распределились следующим образом: мелкие воронки диаметром до 2 м составляли – 46%; 2–4 м – 19% и более 4 м – 35%. Также зафиксированы три крупные вытянутые карстовые просадки грунта вдоль трассы газопроводов длиной 26–28 м (площадное карстово-суффозионное оседание грунта) (рис. 3). Наиболее распространены конусообразные, мешкообразные воронки с крутыми, обрывистыми стенками, с активным хорошо фильтрующим воду дном и понорами. Воронки округлой формы одиночные и расположены в виде гнезд. По возрасту это воронки свежие, образованные в паводковый период (апрель-май); возраст их составляет 2–3 месяца. Старые, древние воронки на прилегающих участках Иренского карстового района, как правило, больших размеров по данным В.Н. Катаева; их диаметры до 5м составляют 1,5%, от 10 до 25 м – 59%, 25–40 м – 32% (рис. 4) [4].

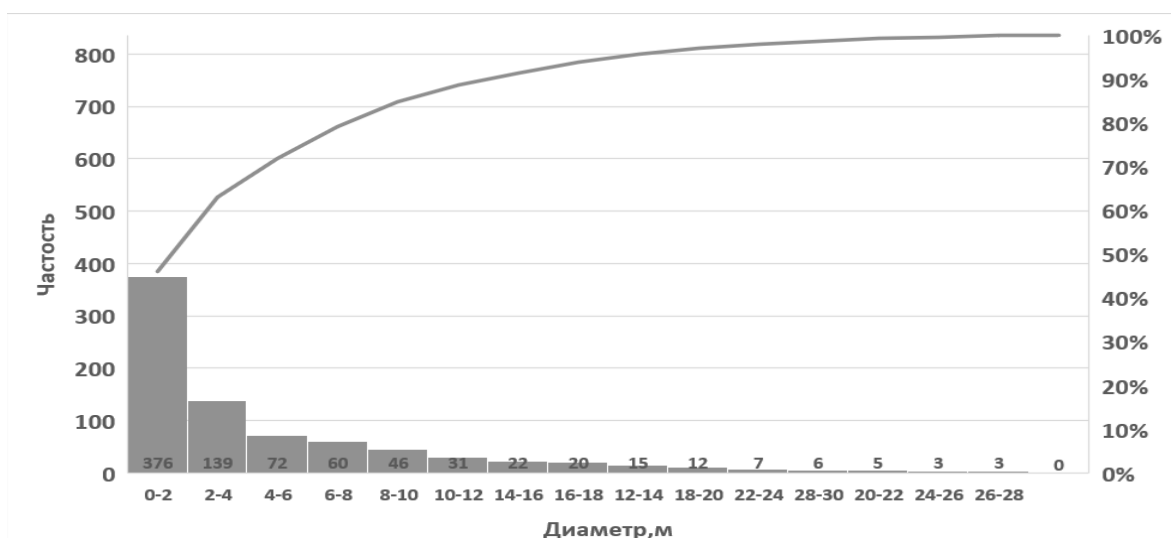


Рис. 3. Гистограмма и интегральная кривая распределения диаметров новых карстовых воронок

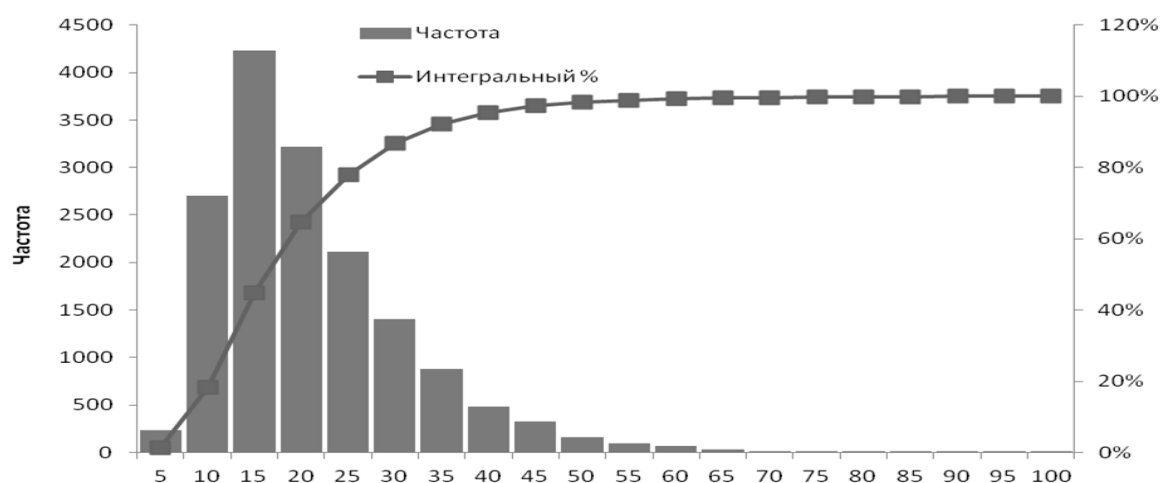


Рис. 4. Гистограмма и интегральная кривая распределения диаметров карстовых воронок в Иренском карстовом районе

Первоначальные диаметры карстовых воронок имеют небольшой размер, но при их слиянии могут образовываться значительные по размеру карстовые формы. Рост воронок в диаметре зависит от количества осадков, наличия подземных карстовых полостей, геологического разреза; так при благоприятных условиях при сильных дождях возможен быстрый рост диаметра воронки, по данным наблюдений скорость роста составляет 4–5 м в месяц. Глубины карстовых воронок небольшие, в основном до 2,0 м что составляет 78%. Одиночные провалы имеют глубины до 10,0 м (рис. 5).

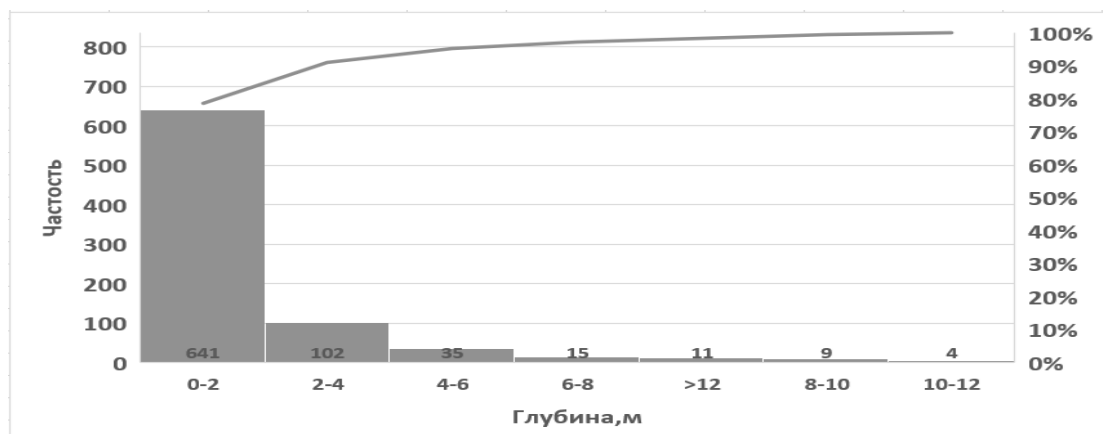


Рис. 5. Гистограмма и интегральная кривая распределения глубин новых карстовых воронок

Образование воронок напрямую связано с геологическим разрезом и наличием в карстующихся породах полостей. Отмечено, что большинство воронок возникает в местах, где карстующиеся гипсоангидриты перекрыты рыхлыми покровными отложениями: суглинками, глинами, супесями; генезис таких воронок, как правило, суффозионно-карстовый. Рыхлые отложения за счет дождевых и талых вод быстро выносятся в карстовые полости, заполняя их. Наибольшая плотность поверхностных карстовых форм на исследуемой территории (до 209 шт/км²) отмечается в пределах водораздела второго порядка – р.Ясыл и склонов ее логов (суходолов). В пределах поймы р.Ясыл и её притоков поверхностных карстопроявлений практически не наблюдается. На данных участках формируются суходолы. Образованные карстовые воронки образованные здесь быстро заполняются рыхлыми осадками; поверхностный сток переходит в подземный. На участках поглощения поверхностного стока формируются воронки поглощения, на участках выхода на поверхность – воронки выхода (рис. 6)



Рис. 6. Воронки поглощения и выхода руч. Арапов

Особенно активно карстовые процессы (до 180 шт/км² поверхностных карстопроявлений) отмечаются в пределах крутых склонов логов, характе-

ризующихся близким залеганием и выходом на дневную поверхность карстующихся гипсов с маломощными прослоями карстово-обвальных отложений, а также наличию трещин бортового отпора (рис. 7).



Рис. 7. Коррозионно-эрозионные воронки (поноры) на участках «голового» карста

По физико-механическим и водно-физическим свойствам обвальнo-карстовые отложения и перекрывающие элювиально-делювиальные суглинки относятся к хорошо водопроницаемым грунтам. В разрезе эти маломощные, но частые прослой, являются зонами инфильтрации поверхностных вод, что приводит к образованию суффозионно-карстовых воронок (рис.8).



Рис. 8. Суффозионно-карстовые воронки на участках покрытого карста

Установлено при близком от поверхности залегании подземных вод карстово-суффозионный процесс происходит более интенсивно с образованием мульд оседаний, многочисленных карстовых воронок. При глубоком залегании подземных вод (10,0-20,0м) происходит образование вертикальных карстовых каналов в зоне аэрации и рост суффозионно-карстовых провалов. В этой зоне их зафиксировано максимальное количество: карстовых воронок до 200 шт., карстовых полостей до 50 шт. (рис. 9).



Рис. 9. Суффозионно-провальные воронки на участках закрытого карста

Наиболее интенсивно карстовые воронки образуются на участках тектонических разломов и зон высокой трещиноватости горных пород. Подземные, а также инфильтрующиеся поверхностные воды образуют в уже существующих карстовых полостях системы подземного стока. Обладая агрессивностью к сульфатным породам, воды активизируют процессы выщелачивания и механического разрушения сульфатных и карбонатных пород, что в конечном итоге приводит к появлению на поверхности воронок.

Количество карстовых воронок и их размеры зависят от мощности перекрывающих отложений. На участке исследования зафиксировано увеличение к западу мощности покровных отложений (коренных песчаников, алевролитов (P_{1sl}), неоген-четвертичных (N-Q), элювиально-делювиальных (edQ) отложений), здесь формируются небольшое количество воронок, но они больших диаметров и глубин.

По данным бурения на полигоне было пробурено 146 скважин глубиной от 5,0 до 45,0 м. При бурении было вскрыто и зафиксировано 236 карстовых полостей, в отдельных скважинах фиксировались многоэтажные полости. Большинство полостей вскрыто в иренских сульфатно-карбонатных отложениях, в некоторых скважинах полости обнаружены в терригенных соликамских отложениях кунгурского яруса нижней перми. По литологической приуроченности полости образованы в гипсах, значительно реже в ангидритах. Открытые, незаполненные полости были вскрыты в 43 скважинах, всего 102 полости, что составляет 43% от общего количества полостей. Остальные 134 полости (57% от общего их количества) заполнены. По характеру заполнителя преобладают тонкодисперсные отложения – суглинки. Данный заполнитель был встречен в 90 полостях, что составляет 67% от их общего количества. Второе место в качестве заполнителя полостей составляет обломочный материал, представленный глыбами и щебнем гипса. Он наблюдается в 20 полостях (15% от общего количества заполнителя). На третьем месте находится суглинисто-щебенистый запол-

нитель, который был встречен в 13 полостях и составляет 9,7%. Заполнителем являются обвальнo-глыбовые отложения (в шести полостях) – 4,5%, щебенистый грунт (две полости) – 1,5%, а также глинистый, суглинисто-супесчаный, суглинисто-сульфатный материал.

Основное количество карстовых полостей вскрыта на глубине до 15 м. Интервалы их распределения находятся на глубинах 0–5, 5–10, 10–15 м (рис. 8). Количество полостей в этом диапазоне составляет 46, 95, 67 штук соответственно. Глубина вскрытия полостей изменяется от 0,6 до 39,5 м. Большинство полостей не превышает в высоту 2 м (рис. 10).

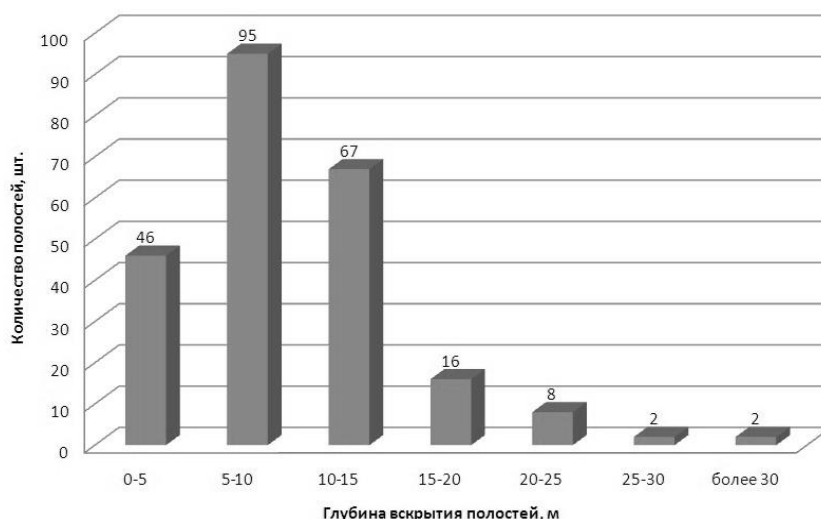


Рис. 10. Распределение карстовых полостей по глубине вскрытия

В основном распространены полости и полости-трещины, высота которых не превышает 0,2 м. Средняя высота полостей равна 1,7 м. Общая высота всех полостей – 416,7 м. Самая высокая полость – 12,4 м. Распределение карстовых полостей по мощности показано на рис.11.

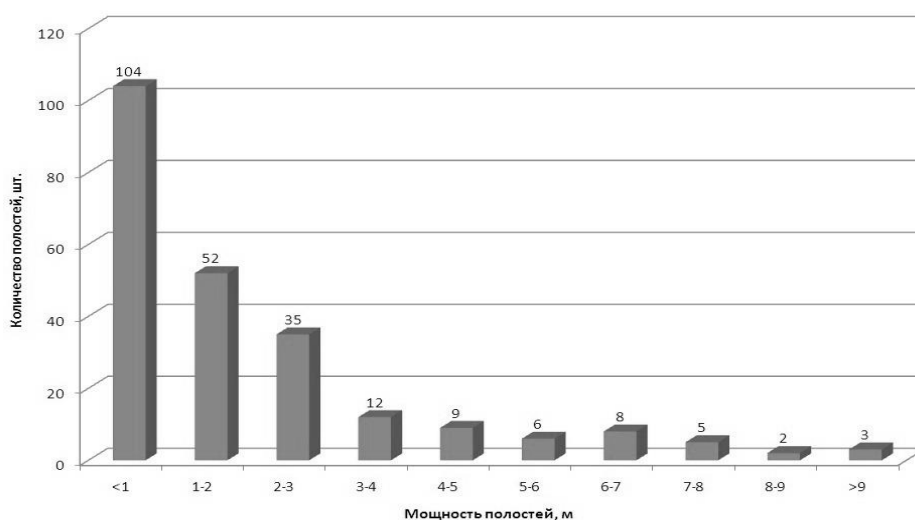


Рис. 11. Распределение карстовых полостей по мощности

Линейный коэффициент внутренней закарстованности составляет от 0,11 до 0,53 доли единицы. Ллинейный коэффициент открытой закарстованности составляет от 0,05 до 0,2 доли единицы. Формирование подземных карстовых форм происходит за счёт карстово-суффозионных процессов и горизонтального стока преимущественно в зоне сезонных и многолетних колебаний уровня трещинно-карстовых вод.

Выводы

Максимальное количество новых карстовых воронок различного генезиса, фиксируемое в течение 16 лет на полигоне с.Красный Ясыл Ординского района указывает на необходимость дальнейшего изучения гипсового карста. Подземная закарстованность носит площадной характер, буровыми скважинами вскрыты многоэтажные системы карстовых полостей, приуроченных к зонам вертикальной нисходящей, переходной и горизонтальной циркуляции трещинно-карстовых вод иренского горизонта кунгурского яруса нижней перми. Карстующиеся отложения представлены четырьмя сульфатными пачками – лунежской, демидковской, шалашнинской и ледяно-пещерской, которые разделены маломощными карбонатными пачками – тюйской, елкинской и неволинской, общей мощностью до 130м.

Количество суффозионно-карстовых провалов и посадок связано с количеством осадков и их интенсивностью. Установлено, что размер новых карстовых воронок (провалов) на спланированных участках меньше по сравнению с естественной, не подверженной техногенному воздействию территории. На территории перекрытого карста (под соликамскими терригенными отложениями) на глубинах 15–30 м в условиях техногенеза не приводит к значительному росту частоты провалообразования, но размеры провалов превышают средние значения.

Активизация карстового процесса вызвана техногенными факторами, связанными со строительством и эксплуатацией трасс газопроводов. При строительстве выполнялась свodka леса, планировка поверхности, засыпка существующих карстовых воронок дренирующим грунтом, проходка траншей при помощи взрывов. При эксплуатации газопроводов происходит активизация карста, вызванная повышением температуры за счет разогрева грунта вокруг трубы газопровода до 20–30°, что вызывает таяние снега и поступление воды в карстовый массив, которая интенсивно круглый год растворяет нижележащих гипсоангидриты. Исследования в Иренском карстовом районе подтверждают активизацию карстовых процессов, вызванных как природными, так и техногенными процессами.

Библиографический список

1. *Килин Ю.А., Минькевич И.И.* Полости Краснояылского карстового поля// Пещеры: Межвуз. Сб. науч. тр. / Перм. ун-т. Пермь, 1999. С. 52–57.

2. *Килин Ю.А., Минькевич И.И.* Карст и техногенез в Пермском крае // Гидрогеология и карстование: Межвуз. сб. науч. тр. вып. 17 / Перм. ун-т. Пермь, 2010. С. 26–47.

3. *Костарев В.П.* Провалы Кунгурско-Иренского междуречья // Карстовые провалы: Тезисы докладов конф. посвящ. 80-летию В.С. Лукина / Екатеринбург УИФ «Наука», 1994. С. 60–63.

4. *Щербаков С.В., Катаев В.Н.* К оценке морфометрических характеристик карстовых форм // Инженерная геология. 2013. №1. С. 14–22.

УДК 551.324.8

Мавлюдов Б.Р., bulatrm@bk.ru

Институт географии РАН, г. Москва, Россия

ЛЕДНИКОВАЯ ПЕЩЕРА У ПИКА ГОРАЦИО, ОСТРОВ КИНГ-ДЖОРДЖ (ВАТЕРЛОО), АНТАРКТИКА

Рассмотрена постоянная пещера в снежно-ледяном теле под пиком Горацио на острове Кинг-Джордж (Ватерлоо), которая является уникальной для этой территории. Однако подобные полости встречаются и в других полярных районах. Скорее всего, эти полости имеют одинаковый механизм образования, проходя этап открытых каньонов в снегу или льду, который впоследствии закрывается зимой снегом и промывается в нижней части водными потоками. Впоследствии зародившийся канал захоранивается под снегом и льдом, но продолжает ежегодно вскрываться водным потоком. Впоследствии такие каналы модифицируются теплыми воздушными потоками, превращаясь в ледниковые пещеры.

Ключевые слова: Антарктика, ледниковая пещера, термоэрозия, ветровая эрозия.

Mavlyudov B.R., bulatrm@bk.ru

Institute of geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

GLACIAL CAVE NEAR GORATIO PEAK, KING GEORGE (WATER- LOO) ISLAND, ANTARCTIC

The permanent cave in a snow-ice body near Horatio peak on King George (Waterloo) Island which is unique for this area is considered. However, similar cavities can meet and in other polar regions. Most likely, these cavities have the identical mechanism of formation, passing a stage of open canyons in snow or ice which is swept up subsequently in the winter by snow and is washed out in the bottom part by water streams. Subsequently the arisen channel is buried under snow and ice, but continues to be opened by water streams annually. Subsequently such channels were modified by warm air streams changing into glacial caves.

Keywords: Antarctic, glacial cave, thermoerosion, wind erosion.

Введение

Ледниковые пещеры формируются в ледниках и снежниках и довольно широко распространены. Механизмы формирования ледниковых пещер могут быть разными [1]: термоэрозионными и структурными или комбинированными. Пещеры могут располагаться как в толще льда, так и на контакте с ложем ледника или снежника.

Термоэрозионный механизм формирования полостей во льду подобен эрозионно-коррозионному механизму образования пещер в карстующихся породах [4]. Только вместо растворения горных пород при формировании полостей происходит плавление горной породы – льда. Самой важной особенностью ледниковых пещер является то, что горной породой и «растворителем» является одно и то же вещество в разных агрегатных состояниях: лед как порода и вода как растворитель. Для создания агрессивности текущей воды ко льду необходимо поддержание его температуры хоть чуть-чуть выше нулевой температуры льда. Если температура льда будет ниже нулевой, то текущая в полости вода станет намерзать на стенки канала, и формирующаяся наледь постепенно перекроет канал при реализации запаса холода во льду. Поэтому важно, чтобы лед имел температуру, близкую к нулевой или расход потока был очень большим.

Источником агрессивности воды ко льду является температура воды. Вода может нагреваться на поверхности как на льду, так и вне его. В последнем случае, попадая на лед, вода реализует тепло на таяние льда, углубление речных русел на льду и расширение трещин, что ведет к формированию каналов во льду. Однако, тепло, принесенное водой с поверхности ледников, быстро исчерпывается и, если бы не было других механизмов нагревания воды, то никаких полостей во льду не могло сформироваться. В некоторых случаях теплая вода в лед поступает из земных недр, что наиболее типично для вулканических районов с высокой геотермической активностью. В таком случае в прямом смысле горячая вода легко пропиливает каналы во льду, а конденсация пара на лед является дополнительным механизмом расширения каналов во льду, то есть способствует формированию ледниковых пещер. Однако чаще всего ледниковые пещеры формируются водами, текущими по поверхности ледников, то есть водами, чья температура лишь на десятые доли градуса выше температуры замерзания. Для формирования пещер такими холодными водами включается другой механизм – выделение тепла при переходе потенциальной энергии водного потока в кинетическую. Несмотря на то, что это не очень большой источник тепла, этого бывает достаточно для формирования ледниковых пещер. Особенно важно то, что выделение тепла происходит постоянно с одинаковой скоростью по мере гипсометрического понижения водного потока. Именно это способствует расширению каналов во льду не только на начальном

участке, где вода поступает в лед, но и на всем протяжении полости, то есть там, где течет вода.

Когда пещера во льду или под ним сформировалась, то в действие могут включаться и другие факторы. Поскольку лед – это пластичная горная порода, то любой канал во льду будет стремиться рано или поздно сомкнуться. Удержать канал от смыкания могут текущая вода или движущийся ветер, температура которого выше температуры льда. Движение воздуха в полостях может быть связано как с эжекторным эффектом, когда текущая вода увлекает с собой окружающий воздух, так и с эффектом печной тяги в полостях с несколькими входами на разных высотных уровнях, как это характерно для карстовых пещер. Поскольку относительно теплая вода и теплый воздух могут попадать в ледниковые пещеры только летом, то и расширять полости они могут только в это время года. Зимой ледниковые полости расширяться не могут, но могут сокращать свои размеры за счет пластических свойств льда. Препятствовать этому может промораживание полостей холодным зимним воздухом, если входы в полости не перекрыты снежными надувами, поскольку холодный лед менее пластичен. Следует добавить, что ледниковые полости очень динамичны, быстро формируются, эволюционируют и умирают. Последнее происходит, если полость теряет воду или исчезает лед, в котором эта полость формируется. Обычно такие полости формируются за месяца, а живут обычно несколько лет.

В этой статье автор рассмотрит одну из ледниковых пещер на острове Кинг-Джордж (Ватерлоо) в Антарктике, которую он наблюдал в течение нескольких лет.

Краткое описание региона

Остров Кинг-Джордж (Ватерлоо) – самый крупный остров в архипелаге Южных Шетландских островов, расположенном в Южном океане немного севернее северного окончания Антарктического полуострова. Остров вытянут с ЗЮЗ на ВСВ и имеет длину около 80 км и ширину до 30 км. С севера остров омывается водами пролива Дрейка, а с юга – пролива Брансфильда, отделяющего остров от Антарктического полуострова. Остров на 95% покрыт льдом, представляющим собой соединенные между собой ледниковые купола с выводными ледниками между ними или на их склонах. Самая высокая точка острова находится на поверхности ледникового купола и превышает 700 м н.у.м. В остающиеся 5% территории острова входят области, свободные ото льда. Самой большой из них является полуостров Файлдс, расположенный в ВЮВ части острова и имеющий площадь около 30 км². В ВСВ части полуостров примыкает к ледниковому куполу Беллинсгаузен, о пещерах которого упоминалось ранее [3]. Поверхность полуострова представляет собой прибрежную равнину, расположенную на высоте 40–45 м нум на севере полуострова, к которой примыкает

холмистая местность, разделенная руслами ручьев на отдельные горы и холмы. Береговая линия полуострова изрезана многочисленными бухтами и заливами (рис. 1). В западной части полуострова имеется бухта Географов, открытая в пролив Дрейка, на восточном берегу которой расположена обособленная гора Горацио высотой около 167 м н.у.м. К югу от горы имеется небольшая долина, частично занятая постоянно существующим снежно-ледяным телом размером 300 на 500 м. Тело сложено преимущественно льдом, прикрытое сверху слоем снега. Толщина льда, по-видимому, не превышает 10–15 м. Снежно-ледяное тело питается как выпадающим, там и наметаемым снегом и на протяжении многих лет находится в почти стабильном состоянии. Снег приносится на тело холодными юго-восточными ветрами, которые часто зимой дуют со стороны Антарктического полуострова. Именно в этом снежно ледяном теле и сформировалась интересующая нас пещера.

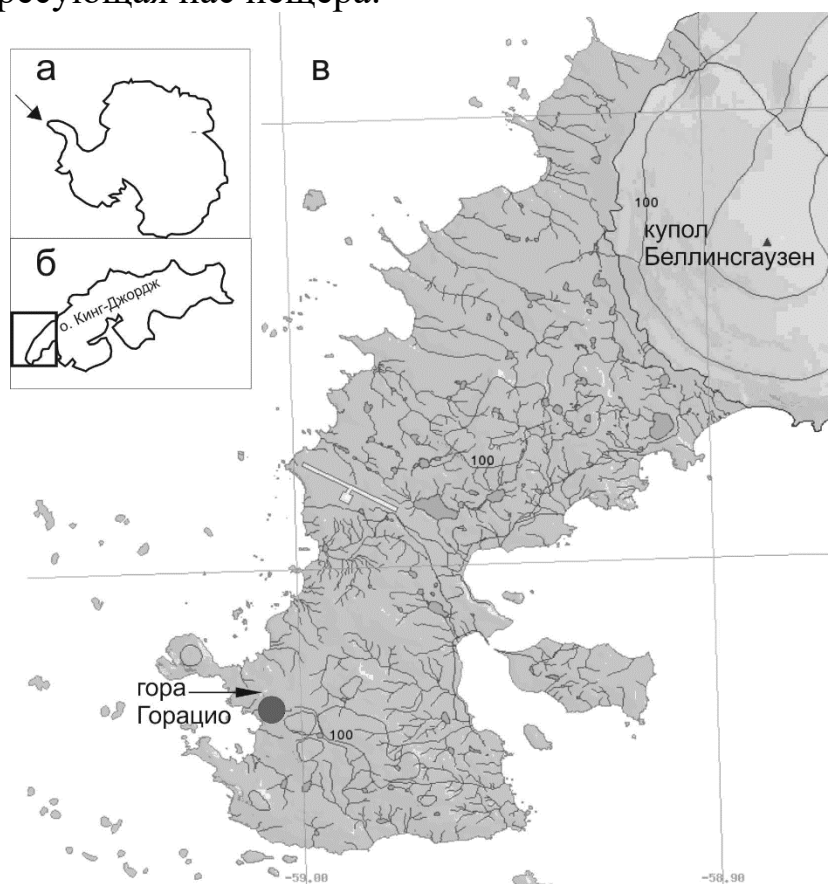


Рис. 1. Положение пещеры у пика Горацио на полуострове Файлдс. а – местоположение острова Кинг-Джордж (Ватерлоо) показано стрелкой, б – контур острова Кинг-Джордж, квадратом показано положение рисунка «в». в – полуостров Файлдс, черным кружком показано местоположение пещеры.

Климат на острове морской с относительно теплой зимой со средними температурами около -5°C и прохладным летом с температурой $2-4^{\circ}\text{C}$. Среднегодовая температура $-2,8^{\circ}\text{C}$. Несмотря на не очень низкие температуры на острове распространена сплошная мерзлота, которая отсутствует лишь под крупными непромерзающими зимой озерами. Летом осадки выпадают преимущественно в виде дождей, а зимой – преимущественно в виде снега. Но могут быть снегопады летом и дожди – зимой. Последнее

определяется вторжением теплых воздушных масс со стороны Тихого океана. Оттаивание грунтов летом происходит до глубины 1–1,5 м.

Описание пещеры

Пещера сформировалась в западной части снежно-ледяного тела и приурочена к тальвегу долины, перекрытой льдом. Пещера имеет 3 основных входа и несколько более мелких входов. Протяженность ходов пещеры по съемке 2012 г. около 300 м (рис. 2). Пещера подледная, то есть пол ее сложен коренными вулканическими породами или русловыми отложениями. По дну полости от верхнего входа к нижнему протекает ручей, который питается талыми водами небольших снежников и мерзлотными водами. В некоторые годы этот ручей может пересыхать. В средней части полости пещерный ручей получает справа приток, который сформировал средний вход в пещеру и который питается талыми водами снежно-ледяного тела. Поток вытекает из нижнего входа в пещеру и стекает в залив Географов.

Для пещеры характерны крупные галереи с обычной шириной 8–9 м и высотой до 3–4 м. Уклон пола большей части пещеры не превышает 10° и только в направлении верхнего входа наклон пола увеличивается до 20°. Верхний вход в конце лета имеет уплощенный свод высотой 1–1,5 м шириной 7–8 м и плоский пол, уходящий под уклон. Через 30 м наклонный ход раздваивается, и оба хода приводят в большой наклонный зал (уклон около 20°) шириной до 12 м и высотой в начале около 3 м и до 4–5 м ниже. Протяженность зала около 50 м. В конце зала уклон пола уменьшается и ход далее имеет арочную форму шириной около 8 м и высотой 3–4 м. Имея несколько изгибов, галерея доходит до участка, подходящего совсем близко к краю льда. Именно в этом месте к ней подходит приток справа (на топо съемке этот вход не обозначен). До выхода на поверхность здесь всего около 10 м. Этот ход в разные годы имел разную высоту от 0,5 до 1,5 м. После притока основная галерея уходит влево с небольшой ступенькой в русле ручья высотой около полуметра и поворачивает направо. Здесь образовался еще один зал шириной около 10 м и высотой до 4–6 м длиной 30–40 м. Зал почти повсеместно до высоты около 1 м имеет скальные или осыпные стенки, то есть фактически представляет собой дно скального каньона, перекрытого сверху льдом.

Далее ход понижается, но ширина его местами увеличивается и после нескольких поворотов выводит в конечную арочную галерею, выходящую на поверхность на нижнем краю снежно-ледяного тела.

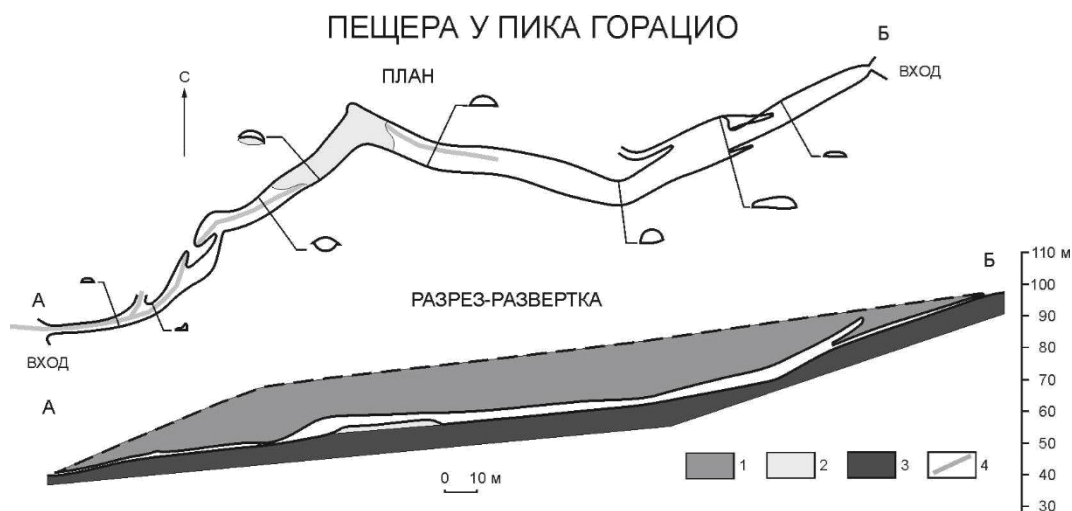
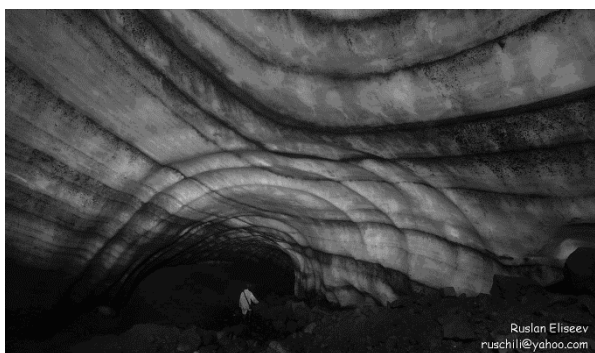
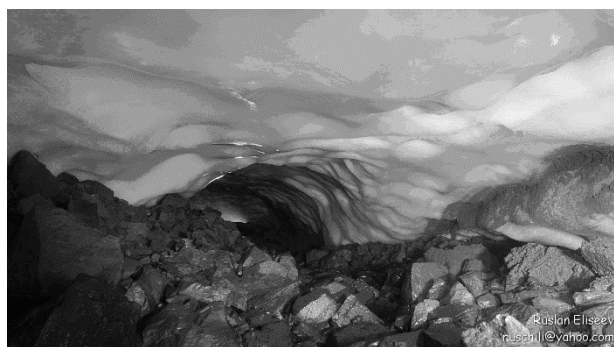


Рис. 2. План и разрез пещеры у пика Горацио. Съемка марта 2012 г. 1 – лед, 2 – снег в пещере, 3 – скальное основание пещеры, 4 – водные потоки. Средний вход во время съемки был запечатан снегом, вход расположен в углу канала у слова «План»

На всем протяжении пещеры было видно, что ее стены сложены слоистым льдом, слои которого представляли собой чередования чистого льда с грязевыми прослоями (рис. 3а). Чистый лед представлял собой накопления зимнего снега, а грязевые прослои формировались в результате летнего таяния. Дело в том, что зимой со скального окружения ветром на снег сносятся пыль и частицы разрушенных пород, которые при таянии снега концентрируются на поверхности снега. Следующей зимой все повторяется. В результате на стенах пещеры и видно это чередование слоев. Довольно выдержанные слои говорят об устойчивом положении снежно-ледяного тела, толщина которого почти ежегодно подновляется. Обычно даже в конце лета снег на его поверхности полностью не тает. Но в последние годы ситуация начала меняться и на поверхности снежника в конце лета стал обнажаться лед. Это может говорить о том, что снежно-ледяное тело перестало наращивать свои размеры и начало уменьшаться в размерах.



а



б

Рис. 3. В пещере у пика Горацио 24.03.2012. а – слоистость льда на стенах и своде пещеры, вид из верхнего зала. б – галерея в снегу предыдущей зимы от верхнего входа к верхнему залу. Фото Р. Елисеева.

Изменение пещеры во времени

Пещера была открыта в начале апреля 2009 г. биологом В. Семиным, который зимовал на станции Беллинсгаузен. Автор также был на станции в течение летнего сезона 2008/09 г., но пещеру найти не смог, поскольку в летний сезон ее входы были перекрыты снегом. Автору посчастливилось попасть в пещеру в следующий летний сезон и тогда же провести топо съемку в ней. Поскольку входы в пещеру довольно крупные, они легко заматаются снегом. И поэтому входы в пещеру открываются в зависимости от характера зимы и лета. Если за зимой с обильными снегопадами и сильными ветрами следует прохладное лето, то пещера за лето может и не вскрыться. Собственно, заматаются только входные участки пещеры, а сами залы и галереи остаются открытыми.

В первое посещение в марте 2010 г. снежный надув из среднего входа полностью перекрыл его, сильно уменьшив снизу сечение основной галереи. Но доступ в пещеру оставался через верхний и нижний вход. Пещеру удалось посетить и на следующий год, когда к концу лета вскрылся и средний вход, через который выбраться на поверхность можно было только, передвигаясь по-пластунски. Это хорошо было делать изнутри, поскольку приходилось ползти вверх. Если же заползать с поверхности, то приходилось ползти вниз головой вперед без уверенности, что можно попасть в основную галерею и в случае неудачи не иметь возможность развернуться для отступления назад.

В годы после многоснежной зимы 2012 г. и холодных летних периодов 2013-2016 гг. пещера не вскрывалась, и ее входы оставались перекрытыми снегом. Потом последовала череда лет с более теплым летним сезоном, и пещера вскрылась в 2017 г. Попасть в нее удалось только через верхний вход. В целом, крупных изменений в пещере не произошло, но только высота галерей заметно уменьшилась с 4 до 2,5 м. Впоследствии с каждым годом начал увеличиваться размер среднего входа и в 2022 г. в него можно было заходить лишь пригнувшись. Кроме того, средний вход стал открываться первым, и именно через него летом стало удобнее всего посещать пещеру.

Год от года пещера мало изменялась. Но после вскрытия верхнего и нижнего входов в пещере возникала печная тяга воздуха, что приводило к повышению высоты сводов. После нескольких теплых летних сезонов в левой по ходу части верхнего зала появилось окно на поверхность, где было видно, что толщина льда над пещерой составляет всего около 3–4 м. Окно имело размер 1,5х3 м и представляло собой вход в вертикальный колодец с одной скальной стенкой. Глубина колодца составляла 6–7 м.

Вблизи верхнего входа появились низкие дополнительные входы, образованные стекающими весной по склону временными ручейками, но для

человека они были недоступны из-за высоты не более 0,2 м. В начале зимы эти входы заметались снегом первыми. В верхней части верхнего зала и в галерее к верхнему входу появилось несколько дополнительных небольших галерей, которые заканчивались тупиками, то есть были полностью перекрыты снегом.

В 2023 г. в конце лета пещера была доступна через все три входа и все участки пещеры оказались настолько высокими, что через пещеру можно было пройти насквозь в полный рост и только в нижней части приходилось идти пригнувшись.

В начале лета и осенью в пещере в местах просачивания воды можно было видеть ледяные сталактиты и сталагматы.

Происхождение пещеры

О происхождении пещеры ничего не известно, и мы можем говорить о нем только в качестве предположения. Поскольку все горные породы на острове заморожены, то под всеми снежниками сохраняется мерзлота. Это означает, что под снежник вода проникнуть не может, даже если будет течь на него по склону сверху. В лучшем случае текущая вода станет врезаться в снег и лед, формируя заглубленное в лед русло. Если воды на снежник приходит много, и она предварительно нагрета солнцем, протекая по открытому грунту, то в снегу и льду снежника может возникнуть каньон с ледяными стенками, который будет углубляться в лед до тех пор, пока не дойдет до основания снежника. Скорее всего, именно такой ледяной каньон и явился первоосновой нашей пещеры. Это могло произойти тогда, когда снежно-ледяное тело имело небольшие размеры. Известно, что перед малым ледниковым периодом на этой территории был довольно теплая время, когда все снежники на полуострове могли полностью исчезать [6]. Во время малого ледникового периода снежники стали расти и, вероятно, в это время и мог зародиться ледяной каньон. Это могло произойти и позже во время одного из потеплений в течение малого ледникового периода. В следующую зиму после формирования ледяного каньона его полностью заметает снегом. Но следующим летом вода сможет проникнуть в каньон, просачиваясь сквозь снег и формируя в нем зачаточный канал. При этом сам каньон остается запечатанным снегом. Если на снежнике продолжится накопление снега, то бывший ледяной каньон окажется полностью погребенным под ежегодно накапливающимся снегом, но возникший в его нижней части канал стока воды может сохраняться и ежегодно подновляться текущей водой. Так мог и возникнуть пещерный канал. В дальнейшем канал был расширен в теплые летние периоды, как текущей водой, так и воздушными потоками, благодаря тяге воздуха из-за печного эффекта, ведь входы в пещеру расположены на разных высотах (перепад более 30 м). Теплый воздух стремится протекать по пещерным галереям под сводами, что способствовало

увеличению высоты галерей, как это происходило в последние годы. Если же входы на какой-то период времени блокировались снегом, и пещера длительное время не вскрывалась, то из-за пластической деформации своды галерей понижались, как это было отмечено во время похолодания 2012-2016 гг. Но, вероятно, своды полости не опускались полностью, раз пещера осталась существовать.

Мы несколько раз устанавливали реперы в стенах галереи, что выяснить скорость таяния льда. Реперы в виде круглого деревянного стержня устанавливались в марте в отверстие, пробуренное ледобурным крюком на глубину 15 см. К сожалению, каждый раз при повторном посещении на следующий год репера находили вытаявшими и лежащими в основании ледяной стены. Это означало таяние более 15 см. И только в 2023 г. реперы, которые были установлены в марте, удалось измерить в конце мая. На одном из реперов за 52 дня слой таяния льда составил 5 см, на другом – 1,5 см, что соответствует скорости таяния льда на стенах около 1 и 0,3 мм/сутки, соответственно. Вероятно, в летнее время скорости таяния льда на стенах превышают эти значения.

Анализ результатов

Пещера под пиком Горацио представляет собой уникальное явление, поскольку больше ни одной такой пещеры на полуострове Файлдс и на всем острове Кинг-Джордж обнаружено не было. Это связано, вероятно, с тем, что пещера возникла в достаточно уникальных условиях и в уникальном месте. Она возникла на месте прежнего скального каньона, образовавшегося до формирования снежно-ледяного тела. Уникальность этого места заключается и в том, что на полуострове не имеется ни одного больше обособленного крупного снежника, который не таял бы во время длительных потеплений. Есть постоянные небольшие снежники на южных склонах Центрального массива в северо-восточной части полуострова, но их не пересекают крупные водные потоки. У потока, образовавшего пещеру в снежно-ледяном теле, имеется достаточно большой по площади водосборный бассейн. Именно это позволяет формироваться водному потоку, втекающему в пещеру, который ежегодно промывает снежные пробки, которые возникают во входах в зимнее время.

То, что пещера во входных участках сильно меняется, видно по характеру снежно-ледяной толщи. Повсеместно у входов в галереях отсутствует чередование слоев, которое видно в средней части пещеры. Оно заменяется однородной неслоистой ледяной массой, которая представляет собой снег, превращенный впоследствии в лед, который некогда заполнял входы в пещеру (Рис. 36). Это говорит о том, что и ранее размеры пещеры могли сокращаться со стороны входом, и ее протяженность уменьшалась по сравне-

нию с современной. Это также означает, что размеры полости могут изменяться во времени в зависимости от характера снегонакопления и от того насколько будет теплым летний сезон.

Какова продолжительность существования этой пещеры неизвестно. Ее наблюдают на протяжении последних 14 лет, что, вообще-то, не обычно для ледниковых пещер, имеющих обычно короткий срок жизни. Вероятно, возраст пещеры гораздо больше, но выяснить его не представляется возможным. Судя по ненарушенной структуре слоев в стенах пещеры, которых местами удастся насчитать до 33, возраст полости может превышать эту величину. Столь солидный возраст определен подледным положением полости и устойчивым состоянием снежно-ледяного тела.

Не исключено, что может существовать некоторая цикличность открытия и закрытия входов в пещеру. Во всяком случае, в апреле 2009 г. средний вход был большим по размерам, а потом он исчез полностью на период похолодания, когда закрылись и остальные входы в пещеру. После прекращения похолодания этот вход начал ежегодно увеличиваться, пока не достиг в настоящее время размеров 2009 г. Однако, если в ближайшее время не будет похолоданий климата или выпадения большого количества зимних осадков, то размеры пещеры станут сокращаться, как это произошло летом 2023 г, когда верхний и нижний вход отошли от своего прежнего положения на 20–30 м. Если сокращение снежно-ледяного тела продолжится со стороны среднего входа, тогда пещера может со временем оказаться разъединенной на две самостоятельные части. В тоже время, сильное понижение поверхности снежно-ледяного тела при изменении климата может привести к полному вскрытию пещеры и прекращению ее существования.

Подобный механизм формирования полостей во льду был ранее отмечен на краю ледникового купола Беллинсгаузен [3], где талая вода, стекающая с нунатака, нагревалась, протекая по обнаженной скальной поверхности, и попадала на край льда. Мы смогли наблюдать эволюцию этой полости от полноценной пещеры до почти полностью открытого каньона. Этот каньон был засыпан снегом и через несколько лет он превратился опять в полноценную пещеру, которая с уменьшением поступления зимнего снега стала превращаться в открытый каньон. Однако в этом случае толщина свода у полости не превышала нескольких метров, и он на протяжении нескольких лет полностью разрушался. Этого не было у пещеры под пиком Горацио.

Собственно, такой механизм формирования пещер на основе каньонов в скальных породах не является уникальным явлением. Мы наблюдали подобные полости на Шпицбергене, но они были сезонными. Аналогичные полости были обнаружены на северном острове Новой Земли [5]. Это означает, что такие полости в скальных каньонах могут образоваться во многих

полярных районах. А вот будут они многолетними, как пещера под пиком Горацио на острове Кинг-Джордж (Ватерлоо), или сезонными, как на архипелаге Шпицберген, зависит от конкретных условий рельефа и климата.

Исследование ледниковых пещер важно, как самостоятельное направление в спелеологии. В тоже время, поскольку ледниковые пещеры являются точными морфологическими копиями карстовых пещер, но формируются и разрушаются они очень быстро, это позволяет использовать их в качестве натуральных моделей, что позволяет *in situ* изучать процессы, происходящие в карстовых полостях [2].

Выводы

Мы рассмотрели постоянную пещеру, находящуюся в снежно-ледяном теле под пиком Горацио на острове Кинг-Джордж (Ватерлоо), которая является уникальной для этой территории. Уникальным является большой возраст пещеры, что связано с подледным положением полости и устойчивостью снежно-ледяного тела, в котором она находится. В зимние месяцы входы в пещеру закрываются снегом, хотя средняя часть полости сохраняется в почти неизменном состоянии. Вскрытие пещеры летом происходит из-за проплавления каналов в снежных пробках термоэрозией под действием водных потоков, поступающих в пещеру с окружающей территории. После вскрытия в пещере начинает действовать механизм ветровой эрозии из-за движения воздуха от нижнего входа к верхнему, что вызвано печным эффектом. Движение теплого внешнего воздуха под сводами приводит к увеличению высоты сводов полости. Подобные полости встречаются и в других полярных районах. Скорее всего, все эти полости могут иметь одинаковый механизм образования, проходя этап открытых каньонов в снегу или льду, который впоследствии закрывается зимой снегом и промывается в нижней части водными потоками. Впоследствии зародившийся канал захоранивается под снегом и льдом, но продолжает ежегодно вскрываться водным потоком. Впоследствии такие каналы модифицируются теплыми воздушными потоками.

Работа поддержана Российской Антарктической Экспедицией и госзаказом АААА-А19-119022190172-5 (FMGE-2019-0004).

Библиографический список

1. Мавлюдов Б.Р. Внутренние дренажные системы ледников. М.: Институт географии РАН, 2006, 396 с.
2. Мавлюдов Б.Р. Ледниковые пещеры, зачем их нужно изучать // Пещеры: сб. науч. тр. / Перм. гос. ун-т. – Пермь, 2008. Вып. 31. С. 30–46.
3. Мавлюдов Б.Р. Пещеры острова Кинг-Джордж, Антарктика // Пещеры: сб. науч. тр. / Перм. гос. ун-т. – Пермь, 2009. Вып. 32. С. 26–35.

4. Мавлюдов Б.Р. Ледниковый и классический карст – сходство и различие // Вопросы географии. Геоморфология. 2015. Вып. 140. М.: Издат. дом Кодекс. С. 201–216.

5. Мавлюдов Б.Р. Арктическая спелеологическая страна // Атлас пещер России. / гл. ред. А. Л. Шелепин. Русское географическое общество, Российский союз спелеологов. М., 2019. С. 193-200.

6. *Barión P.H., Roberts S.J., Spiegel C., et al.* Holocene deglaciation and glacier readvances on the Fildes Peninsula and King George Island (Isla 25 de Mayo), South Shetland Islands, NW Antarctic Peninsula. Preprint. 2022. 54 p.

УДК 624.15:551.435.8

Уткин М.М., Уткин М.В.,
geokarst@mail.ru, mike531900@gmail.com
АО «Гео Палитра», г. Нижний Новгород, Россия

ОЦЕНКА СУФФОЗИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ МЕЛОВЫХ ПОРОД ПРИ ИХ ВОДОНАСЫЩЕНИИ АТМОСФЕРНЫМИ ОСАДКАМИ

На одном из объектов в Брянской области выполнено лабораторное экспериментальное испытание меловой породы для случая ее водонасыщения атмосферными осадками. Планирование эксперимента осуществлялось исходя из основных факторов, влияющих на механическую и химическую (растворение) суффозию. Непосредственно само испытание проводилось на специально разработанном фильтрационно-суффозионном приборе. На основании результатов эксперимента для природных условий выполнена количественная оценка суффозионной устойчивости породы и скорости протекания комплексного суффозионного процесса. Подтверждено, что для мела механическая суффозия значительно опаснее, чем химическая.

Ключевые слова: меловой карст, суффозионная устойчивость пород, скорость суффозионного процесса, скорость растворения карстующихся пород.

Utkin M.M., Utkin M.V.,
geokarst@mail.ru, mike531900@gmail.com
JSC Geo Palitra, Nizhny Novgorod, Russia

ASSESSMENT OF SUFFOSION STABILITY OF CHALKY ROCKS WHEN THEIR WATER SATURATION WITH ATMOSPHERIC PRECIPITATION

At one of the facilities in the Bryansk region, a laboratory experimental test of chalk rock was performed for the case of its water saturation with atmospheric precipitation. The

experiment was planned based on the main factors affecting the mechanical and chemical (dissolution) suffusion. The test itself was carried out on a specially designed filtration-suffusion device. Based on the experimental results for natural conditions, a quantitative assessment of the suffusion stability of the rock and the rate of the complex suffusion process was performed. It has been confirmed that mechanical suffusion is much more dangerous for chalk than chemical suffusion.

Keywords: chalk karst, suffusion stability of rocks, the rate of the suffusion process, the rate of dissolution of karst rocks.

Введение

В настоящее время меловой карст, являющийся подтипом карбонатного, изучен в меньшей степени несмотря на то, что он достаточно широко распространен на юге и юго-западе Европейской части РФ (в частности, на территории Брянской, Воронежской, Курской областей).

Писчий мел, практически полностью состоящий из карбоната кальция, характеризуется относительно рыхлым сложением при общей пористости более 40%, слабой цементацией составляющих частиц, высокой дисперсностью (средний размер частиц 3 мкм), малой гигроскопичностью (3% и менее) и незначительной химической стойкостью [5]. Для меловых пород в целом характерна легкая размываемость, значительное снижение несущей способности при увлажнении и возможность перехода обводненного мела в разжиженное состояние при динамических (особенно вибродинамических) воздействиях [6]. Трещиноватость и водопроницаемость мела различны и неравномерны. На участках сильной трещиноватости и закарстованности коэффициент фильтрации может достигать десятков метров в сутки и даже более [6].

При проектировании зданий и сооружений на закарстованных территориях необходимо учитывать скорость растворения карстующихся пород [7, 8]. Однако, растворимость мела, как и других карбонатных пород, как правило, низкая. При этом мел подвержен в намного большей степени механической, нежели химической суффозии (растворению) [5, 6].

Таким образом, для меловых пород актуальной является оценка механической или комплексной (химико-механической) суффозионной устойчивости. Получаемую при этом скорость протекания суффозионного процесса возможно использовать при оценке карстовой опасности территории вместо скорости растворения, которая в таблице 6.15а СП [7] для мела не приводится.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования выбрана площадка строительства капитальных сооружений, расположенная в Выгоничском районе Брянской области, в непосредственной близости от р. Десна. Кратко охарактеризуем ее инженерно-геологические условия.

В тектоническом отношении изучаемая площадка находится в пределах верхнегерцинского структурного яруса Воронежской антеклизы, а в геоморфологическом – средненеоплейстоценовой аллювиальной равнины. На дочетвертичную поверхность выходят породы верхнего мела: опоковидные глины, трепела с прослоями писчего мела, стратиграфически относящиеся к сантонскому ярусу, подстилающая их толща писчего мела туронского-коньякского ярусов и залегающие ниже среднезернистые кварцевые пески сеноманского яруса. Гидрогеологические условия связаны с сеноманским водоносным комплексом, приуроченным к песчаным отложениям. Воды слабонапорные (высота напора до 3,4 м), по химическому составу – гидрокарбонатные кальциевые с минерализацией 0,32–0,34 г/л.

Планирование лабораторного экспериментального испытания осуществлялось исходя из специфических особенностей мела, с учетом основных факторов, влияющих на скорость химической и механической суффозии.

Общеизвестно, что скорость растворения (*химической суффозии*) карстующихся пород зависит от 4 основных факторов – химического состава и состояния пород, химсостава и скорости движения вод, приуроченных к карстующимся породам.

При проходке карстологической скважины были отобраны образцы мела ненарушенной структуры. Впоследствии в лабораторных условиях один из образцов вдавливался в режущее кольцо, которое затем устанавливалось в прибор. Таким образом, в экспериментальном испытании были учтены первые два фактора.

Поскольку атмосферные осадки, как правило, являются пресными, то в качестве растворителя использовалась водопроводная вода, также являющаяся пресной. Годовой расход растворителя определялся на основании инженерно-гидрометеорологических изысканий. Следовательно, в эксперименте были учтены вторые два фактора.

Скорость протекания *механической суффозии*, являющейся в данном случае внутренней [2, 3], также зависит от 4 основных факторов – напряженно-деформированного состояния и неоднородности гранулометрического (зернового) состава пород, скорости движения вод в породах и объема зоны-приемника для вынесенных фильтрационным потоком продуктов суффозии (мелких частиц).

Природное напряженно-деформированное состояние испытуемого образца моделировалось посредством его нагружения статической нагрузкой до давления, вычисленного от собственного веса вышележащей толщи пород. При нагружении учитывались указания ГОСТ [1].

Одним из главных моментов в оценке устойчивости пород к внутренней суффозии является определение расчетного поперечника d_0 поровых каналов в породе, который примерно равен просвету в местах их сужений

и может быть принят в качестве гидравлически эквивалентного диаметра поровых каналов. Величина d_0 оценивается на основании геоструктурных и фильтрационных характеристик пород [2-4].

Определение диаметра максимального фильтрационного хода d_0^{\max} в породах обычно выполняется двумя расчетными способами. В первом способе главным образом учитывается гранулометрический состав и пористость породы, во втором – ее ламинарный коэффициент фильтрации и также пористость, форма и шероховатость фракций породы [2, 4].

Учет в экспериментальном испытании диаметра фильтрационного хода предложено выполнить путем установки внизу и сверху режущего кольца тканых сеток с соответствующим размером ячейки.

Таким образом, первый фактор, оказывающий влияние на механическую суффозию учтен посредством загрузки испытуемого образца бытовым давлением, второй – путем установки на режущее кольцо тканых сеток, третий – учтен ранее (при рассмотрении факторов, влияющих на химическую суффозию), касаясь четвертого – принято допущение о неограниченном объеме зоны-приемника для вынесенных частиц.

Экспериментальное испытание меловой породы проводилось на фильтрационно-суффозионном приборе, разработанном авторами настоящей статьи с учетом ряда моментов, изложенных в Рекомендациях [2, 3]. Общий вид прибора показан на рис. 1.

Подготовка к испытанию и его проведение выполнялись следующим образом.

Первоначально к низу и верху режущего кольца (внутренний диаметр и высота 8 см), в котором находилась высушенная меловая порода, являющаяся очень неоднородной (коэффициент разнородности или неоднородности $\eta_x = k_{60,10} = 37,2 > 25$ [2]) и сильнопористой (пористость $n = 59,5\% > 30\%$), прикладывалась тканая сетка. Поскольку в рассматриваемом случае водоносный горизонт в меловой толще отсутствует, то диаметр максимального фильтрационного хода d_0^{\max} оценивался только по первому расчетному способу и составил 0,021 мм [4]. В эксперименте применена тканая сетка с размером ячейки 0,03 мм (в чистоте), так как в широкой продаже сеток с меньшей ячейкой авторам найти не удалось. Применение более крупной сетки обеспечивает некоторый запас надежности.

После сеток, снизу к кольцу прикладывалась перфорированная опорная пластина, а сверху – перфорированный штамп со штоком. Затем собранная конструкция помещалась в рабочее кольцо прибора.

Далее производилось увлажнение испытуемого образца до природной влажности ($W = 31,2\%$), полученной на момент проведения изысканий. Для этого в рабочее кольцо прибора было вылито около 160 г водопроводной воды. Через несколько часов после увлажнения на рабочее кольцо устанавли-

ливалось накидное кольцо вместе с центрирующим, а на шток – балка с закрепленным индикатором часового типа. После осевого центрирования рабочего кольца, оно прижималось к основанию стола крепежными полукольцами.

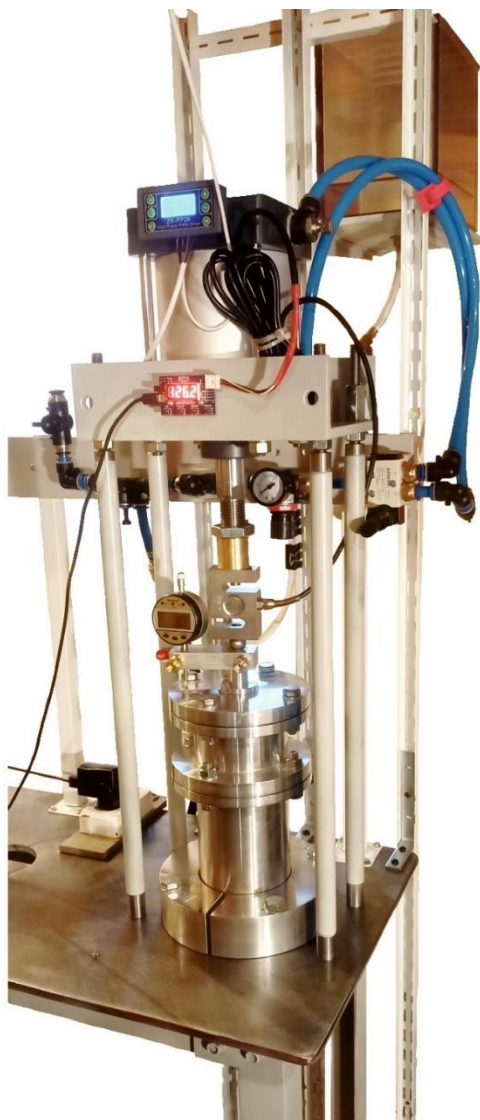


Рис. 1. Общий вид фильтрационно-суффозионного прибора

На следующем этапе выполнялось ступенчатое нагружение испытуемого образца статической сжимающей нагрузкой до давления, соответствующего бытовому (243,5 кПа). Примечательно отметить, что данное бытовое давление соотносится со средним давлением под подошвой фундаментов зданий и сооружений массового строительства. Все ступени нагрузки прикладывались равномерно, без ударов. Количество ступеней и значения давления на них, время условной стабилизации деформации образца принимались в соответствии с положениями ГОСТ [1]. На момент завершения последней ступени нагружения вертикальная деформация (осадка) образца составила 0,21 мм.

После того как было смоделировано природное напряженно-деформированное состояние образца, с целью его водонасыщения внутрь прибора подавался растворитель с минимальным расходом. В качестве растворителя применялась водопроводная вода с минерализацией 0,116 г/л. Для недопущения возникновения в испытуемом образце пневмокольтматажа (закупорки пор породы воздухом, который может выделяться из протекающей через образец воды), использовался растворитель комнатной температуры и отстоявшийся в течение нескольких суток в напорном баке [2, 3].

Через 3 часа после подачи растворителя зафиксировано начало значительного возрастания осадки образца при постоянном давлении, а именно за 1 час 40 мин осадка увеличилась с 0,22 до 0,91 мм (+0,69 мм). При этом ее значение через сутки возросло до 0,95 мм, а через 11,5 сут – до 1,03 мм. График изменения осадки образца в первые сутки эксперимента приведен на рис. 2.

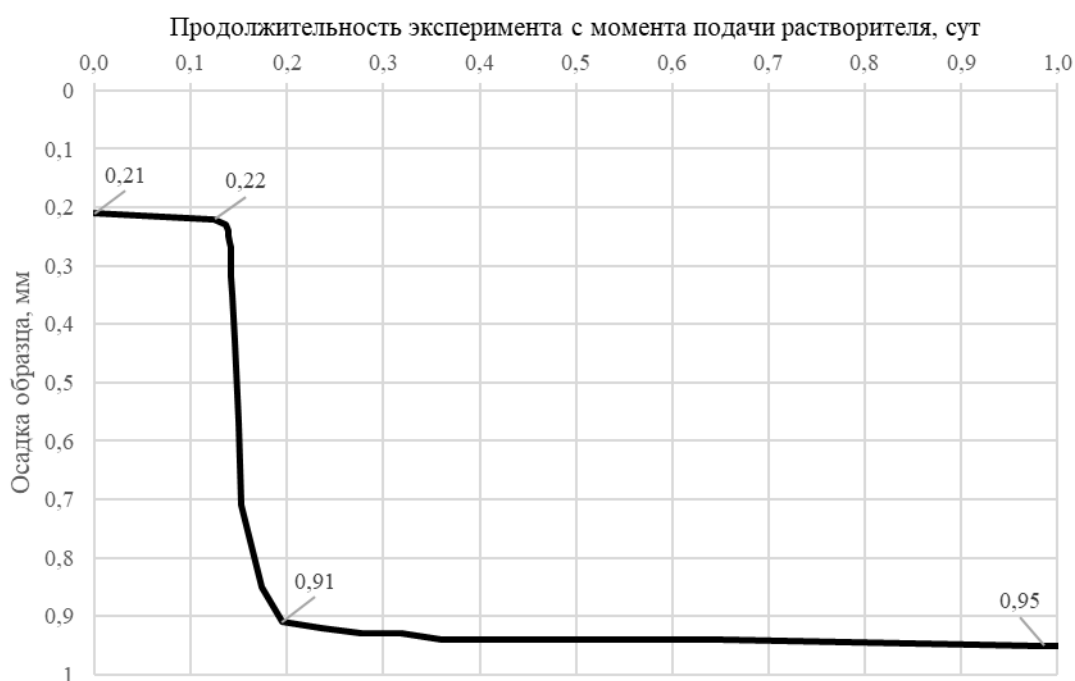


Рис. 2. График изменения осадки испытуемого образца в первые сутки эксперимента

Обращает на себя внимание небольшое время (3 ч), после которого наблюдался интенсивный рост осадки испытуемого образца. Оно вполне объяснимо, поскольку влажность образца W на момент окончания испытания составила 37,2% (относительно природной увеличилась всего на 6,0%). Следовательно, для значительного роста осадки в образец дополнительно должно поступить всего лишь около 30 г растворителя (среднечасовой его расход приведен ниже). Отметим, что в начале и конце эксперимента образец характеризовался степенью водонасыщения S_r соответственно 0,64 и 0,70.

Согласно результатам инженерно-гидрометеорологических изысканий, среднее количество осадков за год на территории района строительства составляет 683 мм. При этом на теплый период (апрель-октябрь) приходится около 66% (452 мм) годового количества осадков, на холодный (ноябрь-март) – 34% (231 мм). Исходя из диаметра испытуемого образца получено, что расход растворителя через образец составляет 3,44 л/год.

Таким образом, в данном случае после протекания 3,44 л растворителя через испытуемый образец эксперимент может быть завершен. За 11,5 сут через образец прошло 3,65 л растворителя. Следовательно, среднесуточный и среднечасовой его расходы составили 317,4 г/сут и 13,2 г/час.

Теперь перейдем к обработке и *анализу результатов* эксперимента, а именно к оценке суффозионной устойчивости меловой породы и определению скорости протекания суффозионного процесса. Напомним, что в настоящей работе рассматривается комплексный суффозионный процесс, обусловленный механической и химической суффозией.

Практическими исследованиями доказано, что если из породы будут вынесены самые мелкие частицы в количестве, как правило, не более 3-5% по массе, то прочность и устойчивость породы практически не нарушится [2, 4]. При этом в отдельных случаях допускается вымывание до 15% общей массы частиц породы [2].

За время проведения эксперимента потеря массы сухого образца, которую возможно считать годовой, составила 0,81 г. В запас надежности, допуская неизменность физических и фильтрационных характеристик породы на протяжении, например, всего 50-ти летнего расчетного срока службы, который обычно соответствует большинству капитальных сооружений, получим, что за 50 лет потеря массы сухой породы составит 40,5 г (-7,9%). Несмотря на то, что она немного превышает обычно рекомендуемые 3-5%, по нашему мнению, меловую породу можно считать практически не суффозионной, а саму суффозию – не опасной [4] ввиду ряда существенных допущений, повлиявших на результаты эксперимента (размер ячейки тканной сетки в 1,43 раза больше диаметра максимального фильтрационного хода в породе; неограниченный объем зоны-приемника мелких частиц, вынесенных фильтрационным потоком; продолжительность эксперимента сокращена в 30,4 раза; неизменность с течением времени физических характеристик породы, в частности, ее грансостава и др.). Кроме того, установленные закономерности деформирования породы (очень низкое значение осадки и ее затухающий характер) косвенно свидетельствуют о ее суффозионной устойчивости, а выполнение на площадке строительства водозащитных, планировочных и мониторинговых мероприятий позволит значительно повысить устойчивость всей меловой толщи.

До и после прохождения через испытуемый образец растворителя отбирались его пробы на стандартный химический анализ, в результате чего

установлено, что после протекания растворителя минерализация (сухой остаток, вычисленный по сумме ионов) увеличивается на 0,037 г/л (с 0,116 до 0,153 г/л). Принимая во внимание объем прошедшего растворителя через образец, получим, что масса растворившихся карбонатных частиц составила примерно 0,135 г. Следовательно, масса не растворившихся частиц, вынесенных фильтрационным потоком, составила 0,675 г. Из приведенных результатов отчетливо видно, что в меловых породах механическая суффозия представляет значительно бóльшую опасность (в рассматриваемом случае в 5 раз), нежели химическая.

Завершая оценку суффозионной устойчивости, нельзя не отметить, что для возможности выноса суффозионных частиц (частицы, размеры которых меньше d_0^{\max}) необходимо чтобы скорость фильтрации v или градиент напора J превышали их критические значения (v_{cr} , J_{cr}), которые могут оцениваться по результатам лабораторных испытаний [2, 3] или расчетным способом [4]. Однако, для меловых пород рассчитать величины v_{cr} и J_{cr} по методике Рекомендаций [4] не представляется возможным из-за очень высокой пористости мела. Поэтому приходится прибегать к лабораторным экспериментальным испытаниям, воспроизводя в них такие условия фильтрации, которые прогнозируются в основании сооружения на протяжении всего срока его службы. Результаты выполненного в настоящей работе эксперимента свидетельствуют о весьма низком значении величины v_{cr} ($v_{cr} < v = 6,3$ см/сут).

Приращение осадки испытываемого образца за первые сутки, отсчитываемые с момента подачи растворителя, составило 0,74 мм (см. рис. 2). В дальнейшем за 10,5 сут осадка увеличилась всего на 0,08 мм (с 0,95 до 1,03 мм). Принимая последнее приращение в качестве годового, а также дополнительно учитывая возрастание осадки в первые сутки, получим, что за взятые ранее 50 лет осадка образца при постоянстве природных условий не превысит 4,74 мм. Следовательно, скорость комплексного суффозионного процесса, которую возможно использовать при оценке карстоопасности взамен скорости растворения породы, составит почти 0,01 см/год.

Необходимо отдельно отметить, что при вычислении расхода растворителя использовалось допущение о горизонтальной дневной поверхности. Однако, оно нарушается при отсутствии тщательной вертикальной планировки рельефа, так как в этом случае может произойти возрастание площади водосбора, приводящее к увеличению среднегодового количества осадков на конкретной площадке, а сама фильтрация может стать не равномерной (по площади), а сосредоточенной.

Таким образом, при подготовке экспериментальных испытаний по оценке суффозионной устойчивости пород в обязательном порядке следует

учитывать особенности рельефа территории строительства, а также водозащитные и планировочные мероприятия, предусмотренные проектной документацией.

Выводы

На основании полученных результатов экспериментального испытания представляется возможным сделать следующие практические выводы:

1. При отсутствии в меловой толще водоносного горизонта, в природных условиях меловые породы обычно являются практически не суффозионными, а сама суффозия – не опасной. Однако, в случае сосредоточенной инфильтрации вод суффозия вполне может стать опасной. Поэтому при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений в условиях мелового карста особое внимание следует уделять эффективному выполнению водозащитных, планировочных и мониторинговых мероприятий как на самой площадке строительства, так и на прилегающей к ней территории.

2. В меловых породах механическая суффозия значительно опаснее, чем химическая (в проведенном эксперименте – в 5 раз). Именно поэтому вместо скорости растворения породы, используемой при оценке карстовой опасности согласно СП [7, 8], рекомендуется применять скорость протекания комплексного суффозионного процесса, обусловленного главным образом механической суффозией и в намного меньшей степени химической.

3. Несомненный интерес представляют испытания меловых и мергельных пород, разрушенных до состояния муки карстующихся пород при наличии в них водоносного горизонта. Однако, это уже предмет дальнейших исследований.

В заключение статьи авторы выражают соболезнования родным, друзьям и коллегам д-ра геол.-мин. наук, проф. Валерия Николаевича Катаева в связи с его скоропостижным уходом. Несомненно, Валерий Николаевич внес большой вклад в развитие отечественного карстоведения, а его исследовательские работы представляют большой научный и практический интерес.

Библиографический список

1. ГОСТ 12248.4-2020. Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия. М.: Стандартинформ, 2020.

2. П 12-83 (ВНИИГ). Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость / ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева. Ленинград, 1983.

3. П 49-90 (ВНИИГ). Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость / ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева. Ленинград, 1991.

4. П 56-90 (ВНИИГ). Рекомендации по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений / ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева. С.-Петербург, 1992.

5. Родионов Н.В. Инженерно-геологические исследования в карстовых районах при устройстве малых водоемов, гражданском и промышленном строительстве: методические указания / Н.В. Родионов. – М.: Госгеолтехиздат, 1958.

6. Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста / ПНИИИС (авторы И.А. Саваренский, Н.А. Миронов). – М., 1995.

7. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* (с Изменениями N 1, 2, 3, 4). – М.: ФГБУ «РСТ», 2022.

8. СП 499.1325800.2021. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от карстово-суффозионных процессов. Правила проектирования. – М.: Стандартинформ, 2021.

УДК 551.435.8

Шувалов В.М.

*Пермский государственный национальный исследовательский университет,
г. Пермь, Россия*

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ КАРСТА, ПОДЗЕМНЫХ ПОЛОСТЕЙ И ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

При изучении карста геофизические наблюдения проводятся с земной поверхности, в буровых скважинах и горных выработках и полостях. Карстующиеся породы резко отличаются от некарстующихся по своим физическим свойствам: удельному электрическому сопротивлению (УЭС), плотности и скорости распространения сейсмических волн.

Ключевые слова: карст, геофизические наблюдения, полости.

Shuvalov V.M.

ENGINEERING AND GEOPHYSICAL STUDY OF KARST, UNDERGROUND CAVITIES AND MINE WORKINGS

Perm State University, Perm, Russia

When studying karst, geophysical observations are carried out from the surface of the Earth, in boreholes and mine workings and cavities. Karst rocks differ sharply from non-karst

rocks in their physical properties: electrical resistivity (SER), density and speed of propagation of seismic waves.

Keywords: karst, geophysical observations, cavities.

Введение

Поверхностные карстовые нарушения заполняются обычно континентальными образованиями, а их физические свойства отличаются от свойств коренных пород. Заполнителями подземных карстовых полостей могут быть воздух, вода, глинистые и другие рыхлые отложения. В зоне аэрации воздух, сухой песок и лед характеризуются высокими УЭС, а полости, заполненные водой и глинистыми отложениями – пониженными УЭС. Скорость упругих волн в любом заполнителе ниже, чем во вмещающих породах. Плотность этих образований всегда ниже пород заполнителей по сравнению с окружающей средой.

Пример выявления карстующихся участков с помощью георадаров

В Пермском крае была проведена георадиолокационная съёмка с целью определения карстующихся участков железной дороги между 177 и 169 опорами контактной сети.

В процессе работ было пройдено 10 георадарных профилей, общая протяжённость профилей составила порядка 1220 м.

По данным интерпретации полученных радарограм на георадиолокационных разрезах выделена, оконтурена и вынесена на план. В результате проведённых работ установлена локальная зона вероятного карстопроявления в виде отрицательной структуры, обусловленной суффозионными, карстовыми или эрозионными процессами. Обнаружены и проанализированы отражения от ряда естественных и искусственных границ, выделено 7 георадарных комплексов. Геологическую и гидрогеологическую увязку полученных результатов осуществить не удалось из-за отсутствия необходимой геологической информации и точной топографической привязки.

Следует учитывать, что полученные данные являются дополнительными данными, и их обязательно следует заверять горнобуровыми работами.

На территории Пермского края была проведена георадиолокационная съёмка с целью выявления подземных горных выработок.

В результате работ были построены георадиолокационные разрезы по двум профилям. Поскольку цель обработки состояла в выявлении неоднородности волновой картины, то диэлектрическая проницаемость среды принималась единой для всего разреза, а не отдельно по слоям, как в случае определения геологических границ. Это привело к смещению глубин и мощностей, в том числе глубины заложения выявленных аномалий.

Интенсивность волновой картины на разрезах характеризуют состояние и состав горных пород и осадков изучаемой толщи. Монотонное поле

указывает на плотные участки разреза, а небольшие участки наоборот указывают на обводнение и малую плотность среды.

На радарограммах по профилям 1, 2 на глубине 3 – 10 м на расстоянии 30 м от начала профилей наблюдается наиболее интенсивная красно-синяя аномалия. На разрезе по профилю 5 на расстоянии 15-20 м от начала профиля наблюдается подобная аномалия. Для выяснения истинной природы выявленных участков разуплотнения или обводненности дополнительно было проведено бурение, которое подтвердило существование полого, заполненного водой участка в средней части разреза, верхняя часть которого была засыпана строительным мусором (арматурой, досками). Аномалии в верхней части разреза – возможно разуплотнённые переувлажнённые участки.

Материалы и методы исследования

Реакция геофизических полей на карстовые нарушения, суффозионные полости и горные выработки определяются тремя факторами: 1) различием физических свойств заполнителя пустот и окружающих пород; 2) размерами нарушений и полостей и их глубиной залегания; 3) формой и ориентацией пустот в изучаемом объёме пород.

Наиболее результативными методами являются методы ВЭЗ и ЭП. При благоприятном соотношении сопротивлений подземные полости могут быть обнаружены, если их размеры соизмеримы с мощностью перекрывающих пород. Но часто над подземными карстовыми зонами и полостями залегают породы с изменёнными физическими свойствами. Эти породы создают дополнительную аномалию, и это позволяет выявлять объекты, размеры которых меньше тех, которые теоретически могут быть обнаружены.

Для выявления зон повышенной трещиноватости, влажности и закарстованности пород используется электроразведка. Аналогичным образом изучались участки, потенциально опасные по оползневым явлениям, где основной упор при анализе наблюдаемых данных делался на выявление особенностей геологического разреза, сопутствующих этим явлениям – степень нарушения и обводненности пород, вероятный литологический их состав. Они позволяют оценить устойчивость склона относительно гравитационных смещений горных пород. Выявление оползневых участков выполнялись по створам, проходящим вдоль направления трассы.

Аналогично решались задачи изучения геоэлектрической модели среды на участках анодной защиты, переходов трассы нефтепровода через водные преграды (Колесников, 2007). Эти примеры будут рассмотрены в следующем разделе.

Далее по тексту на рисунках (рис. 1–5) показаны практические примеры использования геофизических методов при изучении закарстованно-

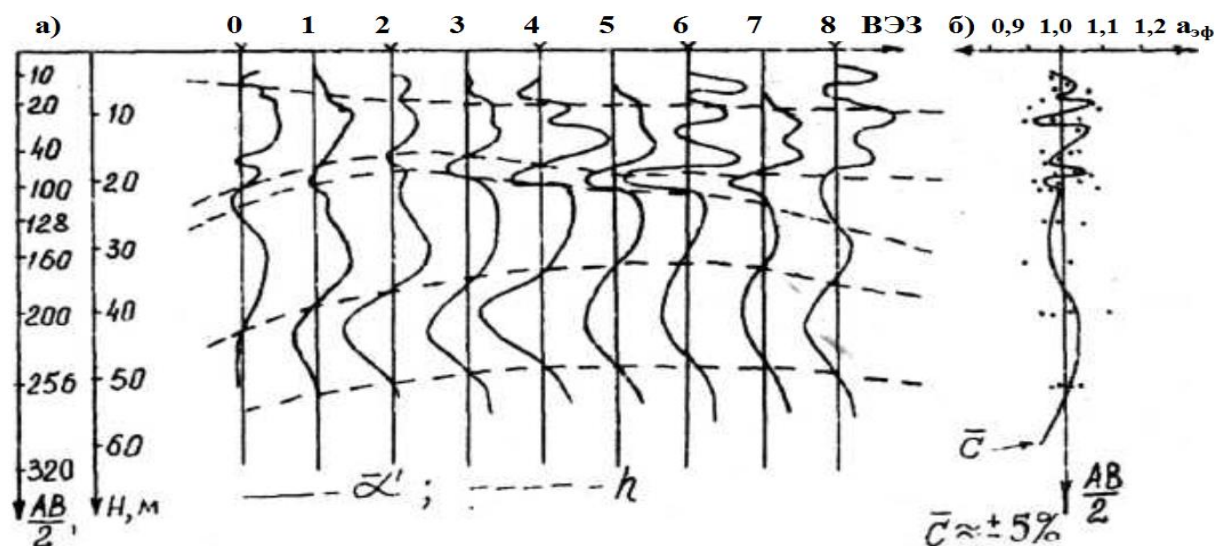
сти горных пород, выявления и картирования подземных полостей и горных выработок в различных регионах России и на территории Пермского края при исследовании Кокуйского месторождения нефти и газа, на территории Кунгурской ледяной пещеры.

В основу взяты полевые материалы, полученные на реальной скважине на площадке № 195 Кокуйского месторождения нефти и газа в Пермском крае.

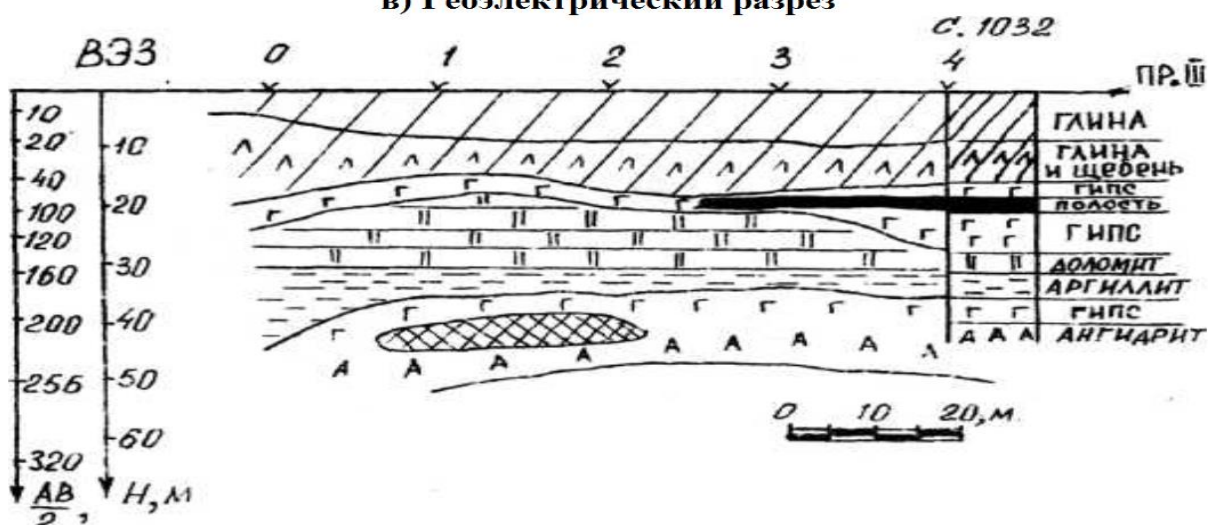


**Гравитационная аномалия над карстовой
полостью (по Г. Колли, 1963)
Сечение изоаномал 0,1 мГл**

Рис. 1. Применение метода гравиразведки при изучении карстовой полости



в) Геоэлектрический разрез



Интерпретация данных ВЭЗ по профилю № 3 на площадке № 195 Кокуйского месторождения нефти и газа в Пермском крае: а) - графики сглаженных параметров альфа-штрих; б) - график изменения погрешностей «с» вычисления сглаженных параметров альфа-штрих; в) - геолого-геофизический разрез, составленный по данным электроразведки и параметрического бурения.

Штриховкой показаны зоны сильно закарстованных пород с наличием возможных подземных полостей (по Шувалову В.М., 1983)

Рис. 2. Результаты интерпретации данных ВЭЗ на площадке № 195 Кокуйского месторождения нефти и газа в Пермском крае

шие результаты КрВЭЗ дают при оценке простирания водоносных трещиноватых зон и при изучении изменения интенсивности трещиноватости в этих зонах с глубиной.

На картах изоом плотные неразрушенные породы отмечаются высокими сопротивлениями, а разрушенные и обводненные зоны – пониженными значениями сопротивлений. Над этими зонами наблюдается уменьшение скоростей упругих волн и снижение гравитационного поля. Над полостями наблюдается также минимальное магнитное поле на фоне слабого поля от вмещающих пород. Поэтому при детализации можно использовать комплекс этих методов. Для проверки аномалий необходимо параметрическое бурение.

Пример изучения направления трещиноватости горных пород по данным КрВЭЗ представлен на рисунке 5 (Хмелевской, 1975).

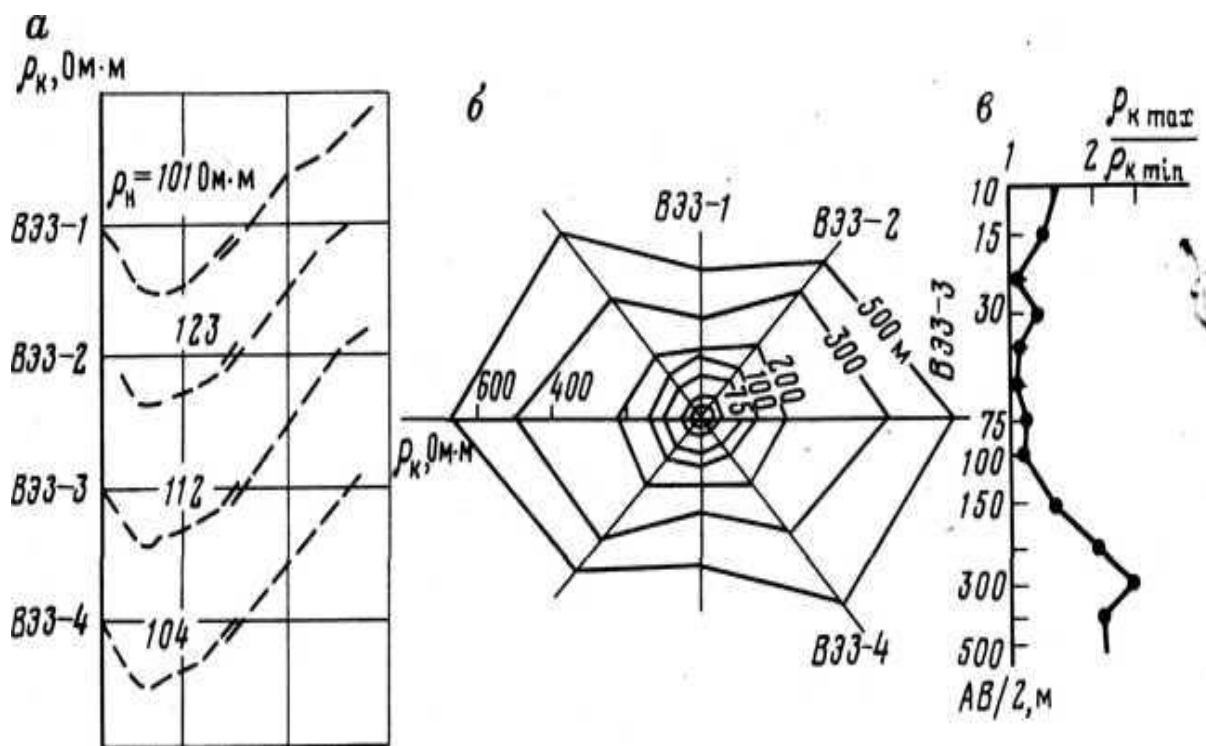


Рис. 5. Изучение трещиноватости горных пород по данным КрВЭЗ
Кривые ВЭЗ (а), круговая диаграмма (б) и график отношений сопротивлений (в)
по КрВЭЗ на одном из участков Североуральских бокситовых рудников

Анализ результатов исследования

В инженерной геологии и гидрогеологии карст имеет двойное значение. Он ухудшает характеристики оснований сооружений, но может служить источником подземных вод. Задача изучения карста геофизическими методами заключается в обнаружении и картировании закарстованных зон, включая отдельные крупные полости, а также в оценке деформационных и фильтрационных свойств этих зон. Решение указанной задачи затрудняется тем, что изучаемый массив карстующихся пород обычно перекрыт более

молодыми отложениями (погребенный карст). Карстовые зоны и полости могут иметь разнообразную форму и размеры, кроме того, весьма разнообразны виды заполнителя карстовых форм. Это может быть воздух (в зоне аэрации), вода, глина, карбонатная мука, обломки пород и др. При изучении закарстованных горных пород чаще всего используют электро- и сейсморазведку, в меньшей степени гравиметрию и микромагнитную съемку. При детальном исследовании применяют все виды ГИС и межскважинное просвечивание.

Электроразведка. К числу задач, решаемых электроразведкой при изучении закарстованных участков, можно отнести следующие: 1) выявление и оконтуривание в плане зон повышенной трещиноватости и закарстованности; 2) определение глубины распространения закарстованности и повышенной трещиноватости горных пород; 3) выявление и оконтуривание отдельных карстовых полостей. Решение второй задачи возможно лишь при достаточной ширине зон, значительной глубине распространения закарстованности и трещиноватости и залегании закарстованных пород ниже уровня грунтовых вод. Как показывает практика, ширина зоны не должна быть меньше 80–100 м, а глубина распространения закарстованности – не меньше 30–40 м при мощности покрывающих отложений 4–15 м. Решение третьей задачи возможно, когда отдельные карстовые области соизмеримы с мощностью покрывающих отложений.

На графиках кажущихся сопротивлений карстовые и трещиноватые зоны при заполнении полостей и трещин рыхлым материалом отмечаются пониженными значениями, а зоны с незаполненными полостями и трещинами – повышенными значениями кажущегося сопротивления. При этом следует учитывать, что поведение графика кажущегося сопротивления помимо степени сохранности скальных пород зависит от удельного сопротивления покровных отложений и от изменения их мощности. Полярные диаграммы круговых зондирований в районе закарстованных пород будут иметь форму вытянутых эллипсов, а на участках сохранных пород они близки к окружности. Большая ось эллипса обычно совпадает с основным направлением трещиноватости вне зависимости от того, заполнены трещины водой, глинистым материалом или они пустые.

При небольшой мощности отложений, покрывающих карстующиеся породы, и достаточной мощности последних исследования проводят методом электропрофилирования (ЭП) обычной симметричной установкой с двумя разносами питающих электродов ($AA'MNB'B$). В местах с аномальными значениями сопротивления выполняют ВЭЗ и круговые зондирования. При большой мощности вскрыши вместе с тем же общим комплексом работ электропрофилирование (ЭП) рекомендуется выполнять при трех разносах питающих электродов с таким расчетом, чтобы графики ρ_k на

меньшем разnose характеризовали изменения в покрывающих карстующиеся породы отложениях. Два последующих разноса должны характеризовать толщу карстующихся пород. ЭП на двух больших разносах проводят комбинированной установкой, на меньшем разносе можно и обычной симметричной установкой.

Если предполагается фильтрация воды, связанная с закарстованностью, то на всей исследуемой площади следует провести съемку естественного поля. Построенная по данным этой съемки карта эквипотенциальных линий даст представление о направлении фильтрации воды. При проведении электроразведочных работ с целью выявления отдельных карстовых полостей рекомендуется постановка ЭП комбинированной установки с двумя разносами питающих электродов. Разносы выбирают с таким расчетом, чтобы меньший характеризовал самую верхнюю часть карстующихся пород, а больший – зону возможного распространения карста. На аномальных участках графика ρ_k (в местах пересечения графиков комбинированного профилирования) выполняют ВЭЗ.

Расстояние между профилями определяется величиной участка и требуемой детальностью исследований. Оно может составлять 50–100 и даже 200 м. В отдельных случаях, когда требуется большая детальность, расстояния между профилями уменьшают до 20–30 м. Расстояния между точками наблюдения по профилю не следует брать больше 20 м, а при неглубоком залегании карстующихся пород рекомендуется 10 м. Для интерпретации данных ЭП в отдельных случаях можно строить графики отношения сопротивлений, измеренных на больших разносах, к сопротивлениям, измеренным в тех же точках на малых разносах.

Рассмотрим пример изучения закарстованности нижнекембрийских известняков и доломитов в долине реки. Для выявления степени закарстованности пород и оконтуривания закарстованных зон были проведены электроразведочные исследования методов (ЭП различными модификациями), ВЭЗ и круговыми зондированиями. Исследования проводились на правом и левом берегах и в русле реки на девяти разведочных участках. При профилировании применялись симметричная и трехэлектродная установки, а также установка с неподвижными питающими электродами. Разносы питающих электродов при ЭП на левом берегу – 300 и 60 м, на правом – 600 и 120 м.

На левом берегу, где мощность пород, покрывающих доломиты, невелика (2 – 6 м), закарстованные зоны выделялись по минимумам на графиках сопротивлений и на больших ($AB = 300$ м), и на малых (60 м) разносах. Кривые ВЭЗ, полученные на таких аномальных участках, указывали, что доломиты с пониженными сопротивлениями распространены часто на значительные глубины от земной поверхности. Полярные диаграммы, вы-

тянутые в виде эллипсов, свидетельствуют о резко выраженной анизотропии трещиноватых пород. Скважина, пробуренная для проверки данных электроразведки, прошла 40 м в совершенно разрушенных породах. На правом берегу кривые ВЭЗ и полярные диаграммы круговых зондирований, полученные в закарстованных (по данным ЭП) зонах, вполне увязывались с графиками отношений и подтверждали правильность интерпретации: в зонах с отношением сопротивления, меньшим 2, на кривых ВЭЗ отмечался характерный перегиб в правой части, а круговые зондирования (КВЗ) указывали на значительную анизотропию (КВЗ), в то время, как на других участках полярные диаграммы имели вид почти правильных кругов (КВЗ).

Дренирующее влияние закарстованных зон по отношению к руслу реки на левом берегу подтверждается химическим составом подземных вод. Воды в зоне депрессии, прилегающей к реке, имеют тот же состав, что и русловая вода; они гидрокарбонатные с минерализацией от 90 до 360 мг/дм³. Воды нижнекембрийского горизонта, движущиеся со стороны водоразделов к реке (наблюдаются в зоне депрессии, прилегающей к водоразделу), – сульфатно-гидрокарбонатного типа с общей минерализацией от 480 до 660 мг/дм³. Зоны повышенной трещиноватости и закарстованности располагаются в районе контакта этих вод. На всех исследованных участках участки повышенной трещиноватости и закарстованности протягиваются в направлении, примерно совпадающем с направлением реки, или приурочены к падям.

Сейсмические исследования карста основаны на применении основных методов – МПВ, МОВ и сейсмического просвечивания. При использовании МПВ закарстованные зоны отмечаются, как участки пониженных значений граничных скоростей. В районе Москвы для этих зон $V_r < 29$ км/с. Даются участки повышенных значений коэффициента поглощения сейсмических волн. В работе Е.А. Ефимовой есть примеры обнаружения по данным МПВ заброшенных выработок (аналог карста) в неглубоко залегающем (20 – 40 м) пласте известняка по изменению динамики записи преломленной волны.

На основе применения современных методов цифровой обработки данных МОГТ недавно получены положительные результаты при изучении карста на территории города Москвы. Использовались 12-кратные системы наблюдений с шагом 5 – 10 м, источники ГСК-10, ГСК-6 и падающий груз с накоплением до 6 – 10 воздействий. Закарстованные зоны выделяются при анализе временных разрезов по разрыву осей синфазности.

Возможности наземных сейсмических методов при выделении отдельных карстовых полостей ограничены трудностями использования высокочастотных колебаний, затухающих ВЧР. Для решения указанной задачи целесообразно использовать межскважинное сейсмическое и акустическое просвечивание. При этом частота колебаний может достигать 2 – 3

кГц, а длины волн уменьшаются до нескольких метров. Опыт специальных исследований показывает, что при максимальном расстоянии между скважинами до 100 м при перекрестном и параллельном просвечивании ($f = 1 - 2,5$ кГц) удастся выделить отдельные закарстованные зоны размером до 10 – 20 м. Зоны отличаются уменьшением скоростей упругих волн и увеличением их поглощения. Если для сохранных карбонатных пород $V_p = 3 - 4,5$ м км/с, то для закарстованных участков $V_p = 2,1 - 2,8$ км/с. Коэффициент поглощения при переходе от сохранных пород к закарстованным увеличивается в два и более раза.

Выводы

Расчет возможных гравитационных аномалий над карстовыми полостями показывает, что применение высокочастотной гравиметрии для их обнаружения целесообразно, если глубина полости не превосходит ее диаметра. При заполнении полостей водой возможности обнаружения карста уменьшаются. В этом случае может наблюдаться уменьшение поглощения упругих волн.

Библиографический список

1. *Гришин М.М.* Гидротехнические сооружения. М.: Высшая школа, 1979.
2. *Калачев В.Я., Максимов С.Н.* Инженерные сооружения: М.: учеб. пособие, Изд-во Моск. ун-та, 1991. 297 с.
3. *Коротких И.В., Петелько А.Ф., Фролов А.Ф.* Основы инженерных сооружений. Л.: Стройиздат, 1987. 127 с.
4. *Максимов С.Н.* Инженерные сооружения. М.: Изд-во МГУ, 1974.
5. *Пилягин А.В.* Проектирование оснований и фундаментов зданий и сооружений: учеб. пособие. М: Изд-во Ассоциации строительных ВУЗов, 2006.
6. *Березнёв В.А., Шувалов В.М.* Инженерные сооружения (с основаниями и фундаментами). Уч. пособие. ПГНИУ, Пермь, 2014, 204 С.
7. *Шувалов В.М., Березнёв В.А.* Инженерные сооружения. Уч. методич. пособие, ПГНИУ, Пермь, 2014, 85 С.
8. Гидротехнические сооружения. Справочник проектировщика. Под ред. *В.П. Недриги*. М.: Стройиздат, 1983.
9. *Кениг Г.Р.* Инженерное обустройство территории. Пермь, 2008.
10. *Березнёв В.А.* Инженерные сооружения. Программа и методические указания. ПГУ, Пермь, 2006.
11. *Березнев В.А., Шувалов В.М.* Инженерные сооружения. (Ч. 2): учеб. пособие. Пермь, 2010. 85 с.
12. *Шувалов В.М.* Инженерные сооружения. Методические указания и программа. ПГНИУ, Пермь, 2014.

13. СП 22. 13330.2011 «Основания зданий и сооружений» /введен в действие с 20 мая 2011 г. Мин. рег. развития РФ (Минрегион России) от 28 декабря 2010 г. № 823. М., 2011.

14. СП 24. 13330.2011 «Свайные фундаменты», уст. Федеральным законом от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ // Постановление Правительства РФ от 19 ноября 2008 г. № 858. М., 2008.

15. СП 25 13330.2012 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» /уст. Федеральным законом от 27 декабря 2002 г № 184-ФЗ://Постановление Правительства от 19 ноября 2008 г. № 858. М., 2008.

16. СНиП 2.06.05-84. Плотины из грунтовых материалов. М.: Госстрой России, 2010.

17. СНиП 2.05.02-85 «Автомобильные дороги»: Постановление Госстроя СССР от 17 декабря 1985 г. № 233.М., 1985.

18. СНиП 32-03-96. Аэродромы: Постановление Минстроя России от 30 апреля 1996 г. № 18-28.М., 1996.

19. СНиП 33-01-2003. Гидротехнические сооружения: утв. Постановлением Госстроя России от 30 июня 2003 г. № 137. М., 2003.

ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ИКОННИКОВ
(19.08.1934 – 24.05.2023)



24 мая 2023 г. ушёл из жизни известный гидрогеолог Западного Урала, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры динамической геологии и гидрогеологии Евгений Александрович Иконников.

В 1962 г. Евгений Александрович с отличием окончил геологический факультет ПГУ. Он занимался региональными исследованиями территории Предуралья, руководил гидрогеологической съемкой масштаба 1:200000, выполнял региональные тематические работы по составлению общих и специальных гидрогеологических карт. Были составлены карты от масштабов 1: 200000 до 1:1500000, разработана легенда карты масштаба 1:500000, усовершенствованы методические разработки по картографии. Результаты гидрогеологических съемок легли в основу поисково-разведочных работ для хозяйственно-питьевого водоснабжения Пермского Прикамья. В 1978 г. он стал соискателем кафедры динамической геологии и гидрогеологии и под руководством проф. Г.А. Максимовича защитил диссертацию в ЛГУ на тему: «Формирование подземных вод зоны активного водообмена в условиях Предуральского прогиба». На кафедре динамической геологии и гидрогеологии ПГУ работал с 1993 г. в должности доцента, читал курсы и вел практические занятия по региональной гидрогеологии и охране подземных вод. За период производственной и научной деятельности опубликовал более 80 работ, составил десятки научно-производственных отчетов. Евгений Александрович награжден знаком «Отличник разведки недр», медалью «Ветеран труда», многочисленными грамотами ПГУ «Уралгеология» и Пермского университета.

Евгений Александрович Иконников остался в памяти коллег как эталон исследователя-гидрогеолога, сочетавшего производственную, научную и преподавательскую деятельность. Под его руководством подготовлены многочисленные курсовые и дипломные работы, составлена гидрогеологическая карта масштаба 1:500000 по территории Пермского края для лаборатории общей гидрогеологии. Он пользовался большим уважением коллег и студентов, был неконфликтным, приятным в общении, высоко эрудированным человеком. Светлая память о нем останется с нами пока существует кафедра гидрогеологии.

А.Я. Гаев, Ю.А. Килин, И.И. Минькевич, В.В. Фетисов

ИРИНА ВИКТОРОВНА ЩУКОВА
(26.01.1971 – 03.10.2023)



3 октября 2023 г. безвременно в возрасте 52 лет ушла из жизни Ирина Викторовна Щукова.

Вся ее жизнь была связана с кафедрой динамической геологии и гидрогеологии Пермского университета, где она проработала более 30 лет, пройдя путь от инженера до доцента.

Ирина Викторовна окончила специалитет и аспирантуру геологического факультета ПГУ.

Защитила кандидатскую диссертацию по теме «Формирование химического состава подземных вод зоны активного водообмена на территории города Перми». Основные направления ее научных исследований были связаны с гидрогеологией, гидрогеохимией, гидрогеоэкологией городов. Она участвовала в составлении гидрохимической базы данных по городу Перми. Была Лауреатом премии Пермского университета среди молодых ученых.

Преподавательскую деятельность на кафедре Ирина Викторовна успешно совмещала с работой в Естественнонаучном институте ПГНИУ, где являлась научным сотрудником и руководителем хоздоговорных работ по инженерной экологии. Являлась председателем профсоюзного бюро сотрудников геологического факультета.

И.В. Щуковой опубликовано более 65 научных работ, в том числе 2 монографии в соавторстве: Катаев В.Н., Щукова И.В. «Подземные воды города Перми» в 2006 г.; Двинских С.А., Китаев А.Б., Зуева Т.В., Щукова И.В. «Водные объекты и их роль в формировании экологической обстановки города Перми» в 2008 г.

Ирина Викторовна внесла большой вклад в геологическое образование студентов бакалавриата и магистратуры. Её знали и любили студенты факультета!

Яркая, неординарная личность...такой она останется в нашей памяти.

Коллектив кафедры динамической геологии и гидрогеологии

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
ПАМЯТИ КАРСТОВЕДА ПРОФЕССОРА В.Н. КАТАЕВА	7
ПРОБЛЕМЫ ГИДРОГЕОЛОГИИ.....	11
Белкин П.А., Ваганов С.С. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РОДНИКОВОЙ РАЗГРУЗКИ В БАССЕЙНЕ Р. БЕРЕЗОВАЯ (ПЕРМСКИЙ КРАЙ)	11
Хаустов В.В., Кушнерчук В.В. НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОССТАЮЩИХ ДРЕНАЖНЫХ СКВАЖИН НА МИХАЙЛОВСКОМ ГОКЕ.....	21
Яковлев М.Ю., Яковлев Ю.А. ГЕОФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СРЕДЫ ВЕРХНЕВИЗЕЙСКО- БАШКИРСКОГО ГАЗОНЕФТЕВОДОНОСНОГО КОМПЛЕКСА НА ТЕРРИТОРИИ СРЕДНЕГО ПРЕДУРАЛЬЯ	32
ПРОБЛЕМЫ ГИДРОГЕОХИМИИ И ГИДРОГЕОЭКОЛОГИИ.....	43
Килин Ю.А., Копанцева Е.Н. НЕФТЯНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПЕЩЕРЫ ПОНОМАРЕВСКАЯ I В ИРЕНСКОМ КАРСТОВОМ РАЙОНЕ	43
Фетисова Н.Ф. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПАССИВНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ШАХТНЫХ ВОД С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ МЕТАЛЛОВ.....	52
Хаустов А.П. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ГЕОЛОГИИ И ЭКОЛОГИИ В НАУЧНОМ НАСЛЕДИИ А.Н.ПАВЛОВА	59
ПРОБЛЕМЫ КАРСТОВЕДЕНИЯ И ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ	70
Абдрахманов Р.Ф., Дурнаева В. Н. КАРТА КАРСТА ЮЖНОГО УРАЛА И ПРЕДУРАЛЬЯ.....	70
Абдурахимов С.Я., Абдурахимова М.М., Ходжиматов П.Р. ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КАРСТОВЫХ ЯВЛЕНИЙ В ЗАПАДНОЙ ФЕРГАНЕ.....	74
Бажутин П.И., Щербаков С.В., Золотарев Д.Р. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ДИАМЕТРОВ КАРСТОВЫХ ПРОВАЛОВ. ПРОБЛЕМЫ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ПРИМЕНИМОСТЬ В КАРСТОЛОГИЧЕСКОМ ПРОГНОЗЕ	83
Дробинина Е.В. К ВОПРОСУ ИЗУЧЕНИЯ ОЦЕНКИ КАРСТОВОЙ ОПАСНОСТИ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ	91
Килин Ю.А., Минькевич И.И. ДИНАМИКА ОБРАЗОВАНИЯ КАРСТОВЫХ ВОРОНОК НА ЯСЫЛЬСКОМ ПОЛИГОНЕ	98
Мавлюдов Б.Р. ЛЕДНИКОВАЯ ПЕЩЕРА У ПИКА ГОРАЦИО, ОСТРОВ КИНГ- ДЖОРДЖ (ВАТЕРЛОО), АНТАРКТИКА	108
Уткин М.М., Уткин М.В. ОЦЕНКА СУФФОЗИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ МЕЛОВЫХ ПОРОД ПРИ ИХ ВОДОНАСЫЩЕНИИ АТМОСФЕРНЫМИ ОСАДКАМИ	119
Шувалов В.М. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ КАРСТА, ПОДЗЕМНЫХ ПОЛОСТЕЙ И ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК	128
ПОТЕРИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ НАУКИ	141
ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ИКОННИКОВ.....	141
ИРИНА ВИКТОРОВНА ЦУКОВА.....	142

THE CONTENTS

FOREWORD	6
IN MEMORY OF KARSTOLOGIST PROFESSOR V.N. KATAEV	7
PROBLEMS OF HYDROGEOLOGY	11
Belkin P.A., Vaganov S.S. RESULTS OF SPRING DISCHARGE RESEARCH IN THE BEREZOVAYA RIVER BASIN (PERM KRAI)	11
Khaustov V.V., Kushnerchuk V.V. SOME PROBLEMS OF OPERATION OF RISING DRAINAGE WELLS AT MIKHAILOVSKY GOK H	21
Yakovlev M.Yu., Yakovlev Yu.A. GEOFILTRATION MEDIA OF THE UPPER VISEI-BASHKIR GAS-OIL-WATER COMPLEX IN THE MIDDLE PREURALS	32
PROBLEMS OF HYDROGEOCHEMISTRY AND HYDROGEOECOLOGY	43
Kilin Yu.A., Kopantseva E.N. OIL POLLUTION OF THE PONOMAREVSKAYA I CAVE IN THE IRENA KARST AREA	43
Fetisova N.F. ASSESSMENT OF POSSIBILITY OF THE PASSIVE METHODS APPLICATION FOR TREATMENT OF ACID MINE DRAINAGE WITH HIGH CONTENT OF METAL	52
Khaustov A.P. FUNDAMENTAL PROBLEMS OF GEOLOGY AND ENVIRONMENTAL SCIENCE IN THE SCIENTIFIC HERITAGE OF A.N. PAVLOV	59
KARSTOLOGY AND ENGINEERING GEOLOGICAL PROBLEMS	70
Abdrakhmanov R.F., Durnaeva V.N. KARST MAP OF THE SOUTHERN URALS AND CIS-URALS	70
Abdurahimov S. Y., Abdurahimova M. M., Hojimatov P. RGEOECOLOGICAL FEATURES OF KARST PHENOMENA IN WESTERN FERGANA	74
Bazhutin P.I., Shcherbakov S.V., Zolotarev D.R. METHODS OF CALCULATING DIAMETERS OF KARST COLLAPSE. PROBLEMS AND PRACTICAL APPLICABILITY IN KARST FORECAST	83
Drobinina E.V. SPECIFICS OF KARST HAZARD ASSESSMENT WITHIN URBANIZED AREAS	91
Kilin Yu.A., Minkevich I.I. DYNAMICS OF FORMATION OF KARST CRATERS AT THE YASYLSKY LANDFILL	98
Mavlyudov B.R. GLACIAL CAVE NEAR GORATIO PEAK, KING GEORGE (WATERLOO) ISLAND, ANTARCTIC	108
Utkin M.M., Utkin M.V. ASSESSMENT OF SUFFOSION STABILITY OF CHALKY ROCKS WHEN THEIR WATER SATURATION WITH ATMOSPHERIC PRECIPITATION	119
Shuvalov V.M. ENGINEERING AND GEOPHYSICAL STUDY OF KARST, UNDERGROUND CAVITIES AND MINE WORKINGS	128
LOSSES OF HYDROGEOLOGICAL SCIENCE	141
EVGENY ALEXANDROVICH IKONNIKOV	141
IRINA VIKTOROVNA SHUKOVA	142

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Научное издание

Гидрогеология и карстоведение

Межвузовский сборник научных трудов

Вып. 21

Издается в авторской редакции
Компьютерная верстка: *Е. П. Деменева*

На обложке: обнажение известняков на р. Чусовой
Автор фото: *В. В. Фетисов*

Подписано в печать 31.10.2023. Формат 60×84/16
Усл. печ. л. 7,67. Тираж 100 экз. Заказ № 22

Управление издательской деятельности
Пермского государственного
национального исследовательского университета.
614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15

Отпечатано в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета

Типография «ВПечать»
614000 г. Пермь, ул. Монастырская, 14