

Основан в январе 1997	Периодичность 6 вып. в год	Том XXIV, № 6	Ноябрь–декабрь 2020
--------------------------	-------------------------------	---------------	------------------------

СОДЕРЖАНИЕ

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ КРИОЛОГИИ

- Мельников В.П., Федоров Р.Ю.** Воззрения на холод в истории познания природы: от спекулятивного знания к криософии. 3

ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ И ВО ЛЬДУ

- Чувилин Е.М., Соколова Н.С., Буханов Б.А., Истомина В.А., Мингареева Г.Р.** Определение температуры начала замерзания грунтов на основе измерения потенциала поровой воды. 11

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБРАЗОВАНИЯ

- Бадю Ю.Б., Никитин К.А.** Бугры пучения на площади газоносных структур севера Западной Сибири. 21

ПОВЕРХНОСТНЫЕ И ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ СУШИ

- Глотов В.Е., Ушаков М.В.** Климатически обусловленные изменения стока заполярных рек Западной Чукотки. 33

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ

- Копылов Д.В., Садуртдинов М.Р.** Изучение талика под малым водотоком методом бесконтактной электроразведки. 45

ХРОНИКА

- Рогов В.В., Зотова Л.И., Стрелецкая И.Д., Белова Н.Г.** Вячеслав Николаевич Конищев (14.02.1938–21.07.2020). 55

- Алексеева О.И., Гулый С.А., Шепелев В.В., Железняк М.Н., Хименков А.Н.** Георгий Захарович Перлыштейн (05.10.1937–26.08.2020). 57

- Владимир Николаевич Голубев** (08.08.1937–24.07.2020). 59

- Сергей Евгеньевич Суходольский** (18.01.1925–29.06.2020). 60

- Содержание** тома XXIV 63

- Алфавитный указатель** тома XXIV 66

EARTH'S CRYOSPHERE
SCIENTIFIC JOURNAL

Founded in January 1997	6 issues per year	Vol. XXIV, No. 6	November–December 2020
----------------------------	----------------------	------------------	---------------------------

CONTENTS

CONCEPTUAL PRINCIPLES OF CRYOLOGY

- Melnikov V.P., Fedorov R.Yu.** Concepts of cold in changing perceptions of nature: developments from speculative knowledge to cryosophy 3

PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESSES IN FROZEN GROUND AND ICE

- Chuvilin E.M., Sokolova N.S., Bukhanov B.A., Istomin V.A., Mingareeva G.R.** Determination of the freezing point of soils based on measurements of pore water potential. 11

GEOLOGICAL CRYOGENIC PROCESSES AND FORMATIONS

- Badu Yu.B., Nikitin K.A.** Frost mounds within the gas-bearing structures areas, northern part of West Siberia 21

SURFACE AND GROUND WATERS IN TERRESTRIAL PERMAFROST REGION

- Glotov V.E., Ushakov M.V.** Climate-related changes in the runoff of polar rivers in Western Chukotka 33

METHODS OF CRYOSPHERIC RESEARCH

- Kopylov D.V., Sadurtdinov M.R.** The study of talik under a small watercourse by the capacitive resistivity method 45

CHRONICLE

- Rogov V.V., Zotova L.I., Streletskaya I.D., Belova N.G.** Vyacheslav Nikolaevich Konishchev (14.02.1938–21.07.2020) 55

- Alekseeva O.I., Gulyi S.A., Shepelev V.V., Zheleznyak M.N., Khimenkov A.N.** Georgy Zakharovich Perlshtein (05.10.1937–26.08.2020) 57

- Vladimir Nikolaevich Golubev** (08.08.1937–24.07.2020) 59

- Sergey Evgenyevich Sukhodolsky** (18.01.1925–29.06.2020) 60

- Contents** of volume XXIV 63

- Author's index** of volume XXIV 66

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ КРИОЛОГИИ

УДК 167; 551.34

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-6(3-10)

**ВОЗЗРЕНИЯ НА ХОЛОД В ИСТОРИИ ПОЗНАНИЯ ПРИРОДЫ:
ОТ СПЕКУЛЯТИВНОГО ЗНАНИЯ К КРИОСОФИИ****В.П. Мельников, Р.Ю. Федоров**

*Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия; melnikov@ikz.ru
Тюменский государственный университет, Международный центр криологии и криософии,
625003, Тюмень, ул. Володарского, 6, Россия*

Одной из главных методологических проблем современных естественных наук является формирование новой целостной научной картины мира, основанной на междисциплинарном синтезе знаний. Данная проблема наглядно отражена в криологии. Первоначально эта научная дисциплина изучала природные объекты и явления, связанные с отрицательными температурами, с узких позиций географических и геологических наук, однако к началу XXI столетия круг изучаемых объектов и методов их исследования чрезвычайно расширился, выйдя далеко за предметные рамки наук о Земле. Данная ситуация усилила потребность в конвергенции знаний и развитии междисциплинарного подхода, а главное – в разработке нового направления философии – криософии. Основная задача криософии состоит в познании места и роли холодной материи в происхождении и эволюции вещественно-энергетических взаимодействий в мироздании, в сфере зарождения и поддержания жизни. Разработка концепции криософии способствовала осознанию такой ситуации, когда криология как естественнонаучная дисциплина развивается чуть более 100 лет, а изучение холодных явлений насчитывает около 2500 лет и берет свое начало в античной философии. Именно в этот период древнегреческими философами был сформулирован ряд фундаментальных вопросов о свойствах холодной материи и ее роли в природе. Углубление философских представлений о холоде стало возможным лишь на постнеклассическом этапе развития науки, для которого характерно стремление построить общенаучную картину мира на основе системности, междисциплинарности и принципов универсального эволюционизма.

Философия науки, спекулятивное знание, натурфилософия, криософия, холод, междисциплинарность, постнеклассическая наука

**CONCEPTS OF COLD IN CHANGING PERCEPTIONS OF NATURE:
DEVELOPMENTS FROM SPECULATIVE KNOWLEDGE TO CRYOSOPHY****V.P. Melnikov, R.Yu. Fedorov**

*Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre SB RAS, 86, Malygina str., Tyumen, 625026, Russia; melnikov@ikz.ru
Tyumen State University, International Centre for Cryology and Cryosophy, 6, Volodarskogo str., Tyumen, 625003, Russia*

Overcoming the growing differentiation between some fields of science which interferes the formation of a complete scientific picture of the world has become one of the fundamental problems of modern natural sciences. This situation is demonstrably reflected in the history of the making of cryology. Originally this scientific discipline studied natural objects and phenomena associated with low temperatures from the narrow perspectives of geographical and geological sciences alone, however by the beginning of the 21st century the diversity of objects and methods of cryological research has extended way beyond the realm of natural sciences. This urged the need for convergence of knowledge and development of multidisciplinary approach. Cryosophy has thus been recognized as a new field of philosophy of science which was primarily intended for this problem solution. The overriding concern of cryosophy as science consists in raising awareness of the importance of cold matter in the evolving matter and energy interactions in the universe in the context of the emergence of sustainable life on Earth. Development of the concept of cryosophy promoted understanding of the following situation: cryology as highly specialized natural science discipline has existed not more than one century, while the history of philosophical views on the role of cold which are rooted in antique natural philosophy spans the period of at least 2500 years. Specifically, during this period Ancient Greek philosophers formulated a number of fundamental questions about the properties of cold matter and its role in nature. Deepening of philosophical views on cold has become possible only at the post-nonclassical stage of science development which is marked by the attempts to construct a consistently scientific picture of the world on the basis of systemacity, interdisciplinarity and the principles of universal evolutionism.

Philosophy of science, speculative knowledge, natural philosophy, cryosophy, cold, interdisciplinarity, post-nonclassical science

ВВЕДЕНИЕ

Основополагающей проблемой современного естествознания стало преодоление растущей дифференциации отдельных предметных областей и научных дисциплин, изучающих различные природные объекты, явления и процессы. Появление все новых ответвлений областей знаний неизбежно в ближайшей перспективе, так как происходит вслед за новыми открытиями. Однако изучение природных феноменов в новых исследовательских ракурсах и приумножение связанных с ними предметных знаний нередко таит в себе опасность утраты научным сообществом целостности представлений об объекте его исследований.

Наука криология начала складываться более ста лет назад вследствие возрастающего интереса человечества к северным широтам и проблемам покорения Северного Ледовитого океана. Появился чрезвычайно большой поток информации о температурных характеристиках среды, строении берегов, динамике ледового покрова, промерзших грунтах. Цикл «потепления Арктики» породил надежды на возможность регулярного судоходства по северным морям. На континенте будоражили воображение попытки пройти толщу мерзлоты и температурные измерения Миддендорфа до глубины 116 м в промерзших породах шахты Шергина.

Понятийный аппарат и методологическая база молодой науки преимущественно опирались на положения, которые ранее сложились в геологии и географии. Однако за короткий период развития криологии ее методологические рамки и круг объектов исследования существенным образом расширились. К началу XXI столетия на базе криологии активно ведутся исследования криолитозоны Земли, при этом криосфера (холодная оболочка нашей планеты) стала рассматриваться в качестве геосистемы в пределах атмосферы, гидросферы и литосферы. Широкое развитие получило исследование физико-химических свойств объектов криосферы, а также изучение роли холода в эволюции биосферы (криобиология) и антропогенезе. В этой ситуации, изолированно изучая отдельные процессы и явления и описывая их на языках разных научных дисциплин, представители геокриологического сообщества могли бы уподобиться строителям Вавилонской башни, утратившим возможность согласованно продолжать свое общее дело. Подобные проблемы типичны для современного этапа развития целого ряда других естественнонаучных дисциплин в период постнеклассического развития науки, неотъемле-

мой частью которого становится системность и междисциплинарность [Стетин, 2011].

Бурный рост знаний в конце XX–начале XXI вв. привел к появлению в науке потребности состыковать различные представления о реальности, выработанные в разных дисциплинах, и воссоздать на новой основе целостную картину мира. Понимая серьезность этой проблемы, авторы и их коллеги – единомышленники уделяют большое внимание разработке методологических и мировоззренческих основ криологии Земли и космоса в новом направлении философии науки, названном криософией [Мельников, Геннадик, 2011]. Основная миссия криософии состоит в познании места и роли холода в происхождении и эволюции вещественно-энергетических взаимодействий в мироздании, в сфере зарождения и поддержания жизни. Она призвана создавать новые перспективы, своего рода мифы, ориентиры для фундаментальных исследований эволюции криосферы во всех ее проявлениях, базируясь как на классических (при исследовании простых физических и химических систем) и синергетических (при исследовании сложных систем, включая живую материю) подходах, так и на методах информационной логики, продуцирующих знания о знаниях [Мельников, Геннадик, 2012, с. 7].

ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ХОЛОДЕ В НАТУРФИЛОСОФИИ

Изучение холода, как и многих других природных явлений, имеет свои истоки в древнегреческой натурфилософии, хронологические рамки развития которой преимущественно охватывают VII–IV вв. до н.э. Следует отметить, что натурфилософия той эпохи являлась «единой нерасчлененной дисциплиной, еще не распавшейся на философию и естествознание, не говоря уже о более дробных подразделениях» [Рожанский, 1979, с. 41]. Объектом ее исследования был мир в целом, и, опираясь на непосредственные наблюдения за происходящими в нем явлениями, древнегреческие философы пытались в русле спекулятивных знаний¹ выделить сущностные начала, образующие природу.

На раннем этапе развития древнегреческой философии интерес к холоду выражался прежде всего в выделении в природе системы противоположностей. Так, Парменид рассматривал теплое и холодное в качестве одних из основополагающих природных начал, сопоставляя их с огнем и землей [Аристотель, 1981, с. 70]. Анаксимандр представлял мир как арену взаимодействий изначаль-

¹ Спекулятивное знание (от лат. *speculatio* – наблюдаю, созерцаю) – тип знания, лежащий в основе метафизики и направленный на осмысление предельных оснований духовно-практического освоения мира. Спекулятивное знание высвещается не только над эмпирическим опытом, но и над теоретическим знанием, которое и является предметом философского размышления [Новая философская энциклопедия, 2001, с. 617].

ных противоположностей, выделенных из бесконечного первовещества – апейрона. Как отмечал Ф.Х. Кессиди [1982], “наблюдаемый мир, по Анаксимандру, возник в результате взаимодействия противоположностей, и существующий миропорядок есть постоянное восстановление апейроном космической справедливости (*dikē*), нарушаемой противоположностями: каждая из противоположностей, развиваясь за счет другой, совершает по отношению к первой несправедливость. Так, холод, утверждая себя, стремится поглотить тепло, сухость – влагу, и наоборот” (с. 52). Идеи Анаксимандра нашли свое продолжение в философии Гераклита, в которой были впервые сформулированы представления о логосе как о всеобщем ритме, мере и порядке. Закладывая основы диалектики, Гераклит развил идею о переходе противоположностей друг в друга: “Холодное становится теплым, теплое – холодным, влажное высыхает, высохшее увлажняется” [Кессиди, 1982, с. 53]. При этом в своей философии Гераклит делал важный акцент на рассмотрении противоположностей в качестве взаимосвязанной системы, образующей единое целое. По Гераклиту, единство противоположностей динамично. Это выражается в том, что “каждая вещь и каждое явление в процессе изменения испытывают противоположные состояния, превращаются в свою противоположность” [Там же, с. 53].

Один из фундаментальных вопросов, возникший на этом этапе развития научной мысли, состоял в том, обладает ли холод собственной физической субстанцией или он является универсальным свойством любой материи. Так, последователь милетской школы Анаксимен не приписывал холоду и теплу определенных субстанций, а рассматривал их как переменные состояния материи. Холодной он считал сжимающуюся и уплотняющуюся часть материи, а горячей – разреженную и “расслабленную” [Фрагменты..., 1989, с. 134]. При этом Анаксимен полагал, что базовым субстратом любой материи является воздух, который в разных физических состояниях, связанных с процессами его сгущения или разрежения, дает все многообразие вещей окружающего нас мира [Рожанский, 1979, с. 160].

К числу первых специализированных научных работ, посвященных изучению холодного мира, можно отнести сочинение Плутарха “О первичном холоде” [Плутарх, 2000]. В нем философ задавался вопросом: “существует ли некая первичная сила и субстанция холода – подобно тому, как огонь является субстанцией для тепла, – или же холод есть просто отсутствие тепла, вроде того, как тьма есть отсутствие света, а покой – отсутствие движения?” [Рожанский, 1979, с. 93]. Плутарх настаивал на том, что холод нельзя объяснить лишь как банальное отсутствие тепла. Рассуждая

о холоде, он отмечал, что ему “не в меньшей степени, чем теплу, свойственно вызывать в веществе различные процессы и изменения. Весьма часто под действием холода вещества застывают, сгущаются и становятся плотными и хрупкими. Это – специфическое действие холода, которое не могло бы быть объяснено, если бы холод был всего только лишенностью тепла. Покой и неподвижность застывших под действием холода веществ не есть простая бездеятельность, но прочность и устойчивость, некое внутреннее напряжение, обусловленное присущей холоду способностью сжимать и сдавливать” [Там же, с. 95]. В своих рассуждениях Плутарх пришел к выводу о том, что основной субстанцией холода является земля, и подверг критике возникшие ранее предположения стоиков о том, что ей является воздух, а также представления Эмпедокла и ученика Аристотеля Стратигона о том, что в ее качестве выступает вода [Там же, с. 97].

Большой заслугой древнегреческих философов является то, что они впервые попытались найти объяснение системообразующей роли холода в физическом строении Земли и космоса. Так, Анаксагором была сделана попытка построить модель того, как из “неорганизованной и бесформенной первичной материи образуется (оформляется, вырастает) упорядоченный и организованный мир – космос” [Там же, с. 219]. При этом в основе его концепции было предположение о том, что Земля образована в результате концентрации плотных, холодных и темных масс [Там же, с. 216].

Стоявшие у основ атомистики Платон и Демокрит впервые предложили объяснить природу тепла и холода действием мельчайших невидимых частиц. В своем учении Платон рассматривал два рода элемента первичной материи – воды: жидкий и плавкий. Первый из них охватывал всевозможные жидкости, а второй – твердые тела, способные плавиться под воздействием огня. “Первый жидок потому, что состоит из частиц воды, обладающих разной величиной; в силу своей неоднородности эти частицы не могут плотно скрепиться и легко перемещаются друг относительно друга – как сами по себе, так и под воздействием внешних причин. Наоборот, второй род состоит из крупных и однородных частиц: он устойчивее первого и тяжел, ибо однородные частицы крепко сплавиваются между собою. Однако от вторжения огня и его разрушительного действия он теряет свою однородность” [Там же, с. 390].

Важную роль в формировании научных представлений о природных явлениях, связанных с холодом, сыграла натурфилософия Аристотеля, который относил тепло и холод к своеобразным “творцам” физических свойств материи, отмечая, что под их воздействием происходит ее сгущение или затвердевание [Аристотель, 1981, с. 543]. При

этом Аристотель выделял в числе противоположных свойств материи тепло и холод, сухость и влажность [Там же, с. 420–421]. По мнению Аристотеля, комбинации этих свойств порождали четыре стихии: огонь, воздух, воду и землю. Холод выступал в качестве составной части последних двух стихий (холод + влажность = вода; холод + сухость = земля) [Там же, с. 421].

Развивая на новом уровне идеи Анаксимена и Гераклита, Аристотель считал, что существует единая материя для противоположного – тепло и холодного [Там же, с. 144]. Это положение он иллюстрировал следующими примерами: “когда возникает воздух из воды, та же самая материя становится другим [телом] не путем присоединения чего-либо, а [просто] что было в возможности, становится действительностью. И обратное [превращение] воды из воздуха идет таким же образом: один раз из малой величины в большую, другой – в малую из большой. Равным образом, когда большое количество воздуха переходит в малую массу и из малой [массы становится] большая, той и другой становится материя, существующая в возможности” [Там же, с. 144].

Одним из первых в науке Аристотель подробно рассмотрел фундаментальные вопросы, связанные с ролью холода в атмосферных явлениях. Так, образующимся на поверхности Земли инеем и росе он давал следующее объяснение: “Сколько [влаги], испарившейся за день, не поднялось высоко, потому что влекущий ее вверх огонь слишком слаб для [количества] влекомой воды, столько же снова опускается, охладившись за ночь, и называется росой или инеем. Инеем – когда пар замерзает, не успев сгуститься опять в воду (это происходит зимою и чаще в холодных краях); росой же – когда пар сгущается в воду, однако [солнечное] тепло не настолько сильно, чтобы высушить поднявшийся [пар], и холод не столь суров, чтобы заморозить этот пар (так как, либо место, либо время года теплое)” [Там же, с. 461–462]. Далее Аристотель рассуждал: “Из облаков ведь падают три тела, образуемые действием холода: вода, снег и град. [Первые] два из них имеют соответствие тому, что [бывает внизу], и происходят от тех же причин, отличаясь как большее и меньшее, обширное и малое, ибо одно и то же – снег и иней, дождь и роса, но в одном случае [этого] много, а в другом – мало. Дождь бывает от охлаждения большого количества [водяного] пара, а причина этому – большое пространство, с которого собирается [вода], и долгое время, за которое [она собирается]. А [когда всего] мало – роса: вода сгущается в течение одного дня и на малом пространстве, что показывает и быстрота выпадания, и незначительное количество. То же самое [справедливо в отношении] иней и снега: когда замерзает облако, образуется снег, когда [водяной] пар – иней” [Там

же, с. 463]. По мнению Аристотеля, град образуется, когда облако опускается в более теплые слои воздуха и “когда внешнее тепло еще больше со всех сторон теснит холод внутрь [облака], он замораживает созданную им воду, и образуется град” [Там же, с. 465].

Подводя итоги вклада философов Древней Греции в изучение холода, можно сделать вывод, что сформулированные ими фундаментальные вопросы сами по себе являлись прорывным достижением науки и значение многих из них не перестало быть актуальным спустя тысячи лет. Среди них можно выделить следующий круг научных проблем.

- Выделение холода в качестве одной из противоположностей в системе природных начал (Парменид, Гераклит, Анаксимандр, Анаксимен, Аристотель и др.).
- Поиск субстанциальных носителей холода (Плутарх, Эмпедокл и др.).
- Изучение холода в качестве универсального свойства материи (Анаксимен, Аристотель и др.).
- Изучение влияния холода на изменения физического состояния природных объектов (Аристотель, Платон, Демокрит и др.).
- Изучение системообразующего значения холода в физическом строении Земли (включая ее атмосферу) и космоса (Анаксагор, Анаксимен, Аристотель и др.) [Melnikov, Fedorov, 2020, p. 52].

Безусловно, уровень развития античной науки не позволял получить объективные ответы на все эти фундаментальные вопросы, поэтому многие умозрительные или спекулятивные предположения древнегреческих философов о природе и свойствах холода впоследствии оказались несостоятельными. Однако, как уже было отмечено выше, сама постановка этих вопросов имела большое познавательное значение, и за два с половиной тысячелетия до возникновения идеи криософии она предвосхитила целый ряд ее основополагающих задач.

Разрушение синкретичности древнегреческой натурфилософии, выделение из нее отдельных естественнонаучных дисциплин, начавшееся в эпоху эллинизма, упадок естествознания в Средневековье и ряд других факторов на века лишили науку принципиально новых представлений о холоде.

Возвращение интереса к изучению роли холода в природных явлениях и процессах началось в эпоху Возрождения. К примеру, в XVI в. итальянский ученый Бернардино Телезио связывал те или иные модификации состояния физических объектов с определенным взаимодействием тепла и холода. При этом, опираясь на идеи древнегреческой натурфилософии, он подверг критике ряд фундаментальных положений о роли холода, которые были ранее сформулированы Аристотелем [Попов,

Стяжкин, 1983, с. 127]. Новым важным этапом в изучении свойств холода стал XVIII век. В 1701 г. вышла работа Исаака Ньютона “О шкале степеней тепла и холода”. В 1750 г. увидел свет труд М.В. Ломоносова “О причине теплоты и стужи”, в котором ученый доказывал, что температура, или степень нагрева тел, является мерой интенсивности движения мельчайших физических частиц [Ломоносов, 1951, с. 57–61]. М.В. Ломоносовым было установлено, что существует наибольшая степень холода, вызываемая полным прекращением движения частиц. Исходя из этого, он первым сделал предположение о существовании абсолютного нуля температуры. В этих и других исследованиях того времени новые шаги в осмыслении влияния холода на строение и физические свойства материи были сделаны в рамках фундаментальных вопросов, поставленных представителями древнегреческой натурфилософии [Буторина и др., 2013, с. 30; Григорович, 2015, с. 909]. Вместе с тем утверждение в методологии науки XIX в. позитивизма невольным образом препятствовало возвращению в нее философских подходов к осмыслению природы холода. Как отмечал В.С. Степин [2006], “справедливо критикуя натурфилософские построения, которые часто навязывали науке неадекватные умозрительные образы изучаемых ею объектов и процессов, позитивизм перенес эту критику на философию в целом. Так возникла идея очищения науки от метафизики (где под метафизикой понимались фундаментальные идеи и принципы философии)” (с. 15). При этом “принцип эмпиризма в соединении с принципом критицизма отодвинул метафизику в область маргинального, изолировав ее от опытного знания и оставив в неустойчивом и весьма сомнительном положении” [Столярова, 2018, с. 5]. В сложившейся ситуации наблюдения ученых-натуралистов XVIII–XIX столетий (О. Соссюр, А. Гумбольдт, А.Ф. Миддендорф, К. Бэр, П.А. Кропоткин и др.) создали предпосылки к формированию в конце XVIII в. науки о ледниках – гляциологии, а в XX в. – мерзлотоведения. Проводимые в рамках этих дисциплин исследования первоначально носили описательный характер и основывались на обобщении полевых эмпирических данных, связанных с распространением и физическими свойствами мерзлых пород, льда и снежных покровов.

КРИОСОФИЯ – СИСТЕМА ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ХОЛОДНОМ МИРЕ

На рубеже XX и XXI столетий чрезвычайно расширился круг объектов исследований, связанных с холодом, и научных направлений, необходимых для их изучения. Многие исследования криогенных явлений оказались неразрывно связаны не только со ставшими традиционными предметными сферами геологии и географии, но и с пробле-

мами физики, химии, биологии, медицины, почвоведения, экологии, климатологии, космологии и т. д. При этом в научном сознании произошла смена аксиологической парадигмы восприятия холода. В 1920-е гг. П.И. Колосков в предисловии к книге одного из основателей мерзлотоведения М.И. Сумгина характеризовал мерзлоту как “явление глубоко отрицательное с практической точки зрения” [Сумгин, 1927, с. 8]. Сегодня холод все чаще стал рассматриваться не в качестве враждебной для человека стихии, а как источник криогенных ресурсов, роль которых в развитии человечества еще до конца не осмыслена [Мельников, 2012, с. 6]. Уточнилось и значение самого понятия “холод”, которое сегодня трактуется как “состояние определенной среды, в котором потери ею тепловой энергии приводят к снижению температуры этой среды до образования в ней в обычных условиях водного льда или при большом давлении подобного ему газогидрата” [Шейнкман, Мельников, 2019, с. 6]. В контексте осмысления расширяющегося многообразия объектов и явлений, связанных с холодом и фазовыми переходами H₂O, а также их форм и свойств, которые становятся доступными для научной рефлексии, был предложен термин “криоразнообразие” [Мельников и др., 2013]. Наглядным примером выделения многообразия свойств объектов криосферы служит систематизация функций льда по шести иерархиям: два ряда пространственной оси представляют иерархию объектов и сред, в формировании свойств которых лед играет определяющую роль. Ряды энергетической оси отражают фазовые состояния льда и его функциональные проявления. На временной шкале отложены информационные, ресурсные и кибернетические проявления криогенных систем: изменение характерных времен и скоростей процессов, регистрация информации о состоянии геосфер Земли, синергетические процессы, возникновение и развитие жизни [Мельников, Геннадий, 2011, с. 4]. В то же время понятие “криоразнообразие” включает также ряд сложных, в том числе биокосных, систем, к которым можно отнести криофильные бактерии, обитающие в мерзлых породах, атмосферные осадки, газовые гидраты и т. д.

В изучении криоразнообразия с методологических позиций криологии и криософии неучет любого из элементов определяемой холодом системы приводит к искажению оценок ее состояния. Все изменения в криосфере Земли так или иначе воздействуют на формирование и эволюцию среды жизнеобеспечения. При рассмотрении криосферы Вселенной в качестве гиперсистемы (системы систем) криосфера Земли встает на место подсистемы или системы второго уровня со своими подсистемами, такими как атмосферные отрицательно-температурные разноразноуровневые слои,

снежные покровы, криогенные состояния гидросистемы, криолитосфера и др. Таким образом, криософию можно рассматривать в качестве авангардистской методологической дисциплины, призванной непрерывно дополнять образ криосферы, используя разнообразные знания научной и художественной, инженерной и других сфер творчества.

Согласно концепции В.С. Степина [2006], сложным саморазвивающимся системам присуща «иерархия уровневой организации элементов и способность порождать в процессе развития новые уровни организации» (с. 21). В философии Аристотеля мир представляет собой иерархическую систему, в которой одни формы подчинены другим и находятся в динамической взаимосвязи. В связи с этим возникают параллели между подходами древнегреческой натурфилософии и современной постнеклассической науки. Жившие в эпоху античности мыслители рассматривали мир в синкретическом единстве и в рамках этой мировоззренческой парадигмы решали познавательные задачи. Однако ограниченность методологических и инструментальных возможностей науки на том этапе ее развития не позволяла найти объективные ответы на многие поставленные вопросы. Как отмечает В.С. Степин [2006], «переход науки к постнеклассической стадии развития создал новые предпосылки формирования единой научной картины мира. Длительное время идея этого единства существовала как идеал². Но в последней трети XX в. возникли реальные возможности объединения представлений о трех основных сферах бытия – неживой природе, органическом мире и социальной жизни – в целостную научную картину на основе базисных принципов, имеющих общенаучный статус. Эти принципы, не отрицая специфики каждой конкретной отрасли знания, в то же время выступают в качестве инварианта в многообразии различных дисциплинарных онтологий» (с. 331).

Было бы несправедливым по отношению к мыслителям прошлого не остановиться подробнее на том, как воззрения древнегреческих философов находят свое развитие в криософии. Рассмотрение роли холода в системе противоположностей природных начал в современной науке о холоде часто опирается на законы диалектики. К примеру, закон перехода количественных изменений в качественные наглядно представлен в фазовых превращениях воды, когда при уменьшении ее температуры наступает момент ее превращения в лед.

Аристотель, Плутарх и ряд других древнегреческих философов пытались разрешить вопрос,

связанный с ролью холода в формировании первоэлементов, образующих природные объекты. Одним из предметов исследования криософии являются трансформации и взаимодействия первоэлементов из начальной и второй волны – водорода и кислорода³. Их агрегирование и появление водородной связи лежит в основе и косного, и живого вещества. Сама эволюция Вселенной от первых мгновений появления материи из элементарных частиц – протонов, нейтронов и электронов, появившихся при Большом взрыве, – далее непрерывно связана с водородом, который вместе с гелием первым образовался при остывании [Мельников, Геннадийков, 2012, с. 8–9].

Изучение системообразующего значения холода в физическом строении Земли и космоса, о котором задумывался Анаксагор и другие философы его эпохи, сегодня является одной из краугольных задач криософии, в рамки которой входит исследование криогенных систем в геологической, планетарной истории и в эволюции биосферы. Изучение влияния холода на строение, а также на изменение физического состояния природных объектов, начатое Аристотелем, Платоном и Демокритом, и сегодня продолжает оставаться чрезвычайно актуальным. Так, сложность внутренней структуры льда и особенности его фазовых переходов вдали от равновесных состояний сами по себе достаточны для формирования упорядоченного синергетического поведения и образования устойчивых макроскопических объектов. Это не только самый известный и сложный криогенный объект – снежинки, изучаемые со времен Иогана Кеплера, но также, например, пространственно упорядоченные структуры из капель воды в атмосферных облаках [Шавлов и др., 2011].

ВЫВОДЫ

Первые дошедшие до нас попытки сформулировать философские представления о холоде берут свое начало в древнегреческой натурфилософии. Такими ее представителями, как Аристотель, Плутарх, Гераклит, Платон, Демокрит, Анаксимен, Анаксагор, Анаксимандр и другими, был сформулирован ряд фундаментальных вопросов о свойствах холодной материи и ее роли в мироздании. Достоверные ответы на многие из этих вопросов было невозможно найти в рамках господствовавшей в ту эпоху метафизической картины мира. Как это ни покажется парадоксальным, но потребовалось более двух тысячелетий для того, чтобы у науки начали появляться возможности приблизиться к их пониманию. Этому способствовали следующие кардинальные изменения в при-

² Уместно вспомнить инженерные проекты Леонардо да Винчи, воплощенные в жизнь спустя столетия.

³ В соответствии с современными научными представлениями после Большого взрыва атомы возникали в несколько этапов – волн: первая – водород и гелий; вторая – от лития до железа; третья (при взрывах сверхновых) – тяжелее железа.

роде научного познания: а) смена аксиологической парадигмы восприятия холода, признание его несомненной средообразующей и ресурсной ценности; б) междисциплинарная интеграция естественных, гуманитарных, точных и технических наук, изучающих различные объекты и процессы, связанные с холодом; в) рассмотрение криосферы в качестве гиперсистемы.

Важно отметить, что в отличие от древнегреческой натурфилософии, претендовавшей на роль универсальной синкретической науки, криософию, как и философию науки в целом, можно рассматривать как “результат соединения философской рефлексии над наукой и научной рефлексии над философией” [Касавин, Порус, 2016, с. 8]. В первую очередь она призвана играть роль своеобразного интегратора разнопредметных знаний, связанных с изучением холодного мира, и познавательной рамки для построения его онтологии. Данная ситуация в целом совпадает с глобальными тенденциями развития философии науки, для которых характерно движение от “реальной науки” к ее эпистемологическому изучению и построению общих моделей, структуры, методов и общих закономерностей ее развития [Лебедев, Косьюков, 2014, с. 7–8]. Эта тенденция была названа С.А. Лебедевым и С.Н. Косьюковым этапом развития “самосознания науки”, начатого в неклассический период и получившего все возрастающее значение в постнеклассический период истории ее эпистемологии и философии [Там же]. В случае с криософией ее результатом стала попытка впервые сформулировать систему познавательных представлений о холодном мире, интегрированную в складывающуюся сегодня целостную научную картину мира.

Исследование выполнено в рамках государственного задания (АААА-А19-119071990006-3) и при поддержке РФФИ (проект № 18-55-11005 АФ_т).

Литература

- Аристотель.** Сочинения: В 4 т. М., Мысль, 1981, т. 3, 613 с.
- Буторина А.В., Архаров А.М., Матвеев В.А. и др.** Михаил Ломоносов о природе теплоты и холода // Вестн. Международной академии холода, 2013, № 1, с. 29–33.
- Григорович Е.А.** Эволюция научных представлений о феномене холода: от античной натурфилософии к современной лингвистике // Молодой ученый, 2015, № 12 (92), с. 908–911.
- Касавин И.Т., Порус В.Н.** Философия науки в России: от интеллектуальной истории к современной институционализации // Эпистемология и философия науки, 2016, т. 48, № 2, с. 6–17.
- Кессиди Ф.Х.** Гераклит. М., Мысль, 1982, 215 с.
- Лебедев С.А.** Эпистемология и философия науки. Классическая и неклассическая / С.А. Лебедев, С.Н. Косьюков. М., Академ. проект, 2014, 295 с.

Ломоносов М.В. Meditationes de caloris et frigoris causa auctore Michaele Lomonosow = О причине теплоты и стужи. Рассуждение Михайла Ломоносова // Ломоносов М.В. Полн. собр. соч. / АН СССР. М.; Л., 1950–1983. Т. 2. Труды по физике и химии, 1747–1752 гг. М.; Л., АН СССР, 1951, с. 57–61.

Мельников В.П. Новейшие явления, концепции, инструментарий как фундамент для старта к новым горизонтам криологии // Криосфера Земли, 2012, т. XVI, № 4, с. 3–9.

Мельников В.П., Геннадиник В.Б. Криософия – система представлений о холодном мире // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 4, с. 3–8.

Мельников В.П., Геннадиник В.Б. Криософия – онтология холодной материи // Вестн. Тюм. гос. ун-та. Гуманит. исслед., 2012, № 10, с. 6–14.

Мельников В.П., Геннадиник В.Б., Брушков А.В. Аспекты криософии: криоразнообразие в природе // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 2, с. 3–11.

Новая философская энциклопедия. Т. 3. Н–С. М., Мысль, 2001, 692 с.

Плутарх. О первичном холоде // Философия природы в античности и в средние века. М., Прогресс-Традиция, 2000, с. 103–119.

Попов П.С. Развитие логических идей в эпоху Возрождения / П.С. Попов, Н.И. Стяжкин. М., Изд-во Моск. ун-та, 1983, 156 с.

Рожанский И.Д. Развитие естествознания в эпоху античности. Ранняя греческая наука о природе. М., Наука, 1979, 485 с.

Степин В.С. Философия науки. Общие проблемы. М., Гардарики, 2006, 384 с.

Степин В.С. Новые проблемы философии науки // Социология, 2011, № 3, с. 5–13.

Столярова О.Е. Может ли эмпирическая наука служить обоснованием метафизики? // Вестн. Том. гос. ун-та. Философия. Социология. Политология, 2018, № 43, с. 5–18.

Сумгин М.И. Многолетняя мерзлота почвы в пределах СССР. Владивосток, Дальневост. геофиз. обсерватория, 1927, 134 с.

Фрагменты ранних греческих философов. Ч. 1. От эпических теокосмогоний до возникновения атомистики. М., Наука, 1989, 577 с.

Шавлов А.В., Джуманджи В.А., Романюк С.Н. Пространственно упорядоченные структуры из капель воды в атмосферных облаках // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 4, с. 52–54.

Шейнкман В.С., Мельников В.П. Эволюция представлений о холоде и возможные пути их развития в науках о Земле // Криосфера Земли, 2019, т. XXIII, № 5, с. 3–16.

Melnikov V., Fedorov R. Discovery of the cold world on the Earth and in the Universe: from ancient natural philosophy to cryosophy // Philosophy and Cosmology, 2020, vol. 24, p. 48–60.

References

- Aristotel. Works in four volumes [Sochineniya]. Book 3. Moscow, Mysl', 1981, 613 p. (in Russian).
- Butorina A.V., Arkharov A.M., Matveev V.A., Smorodin A.I., Borzenko E.I., Nesterov S.B. Mikhail Lomonosov about the nature of heat and cold. Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda [Bulletin of the International Academy of Cold], 2013, No. 1, p. 29–33 (in Russian).

- Grigorovich E.A. Evolution of the scientific concept of the phenomenon of cold: from antique physiophilosophy to modern linguistics. *Molodoy uchenyj* [Young Scientist], 2015, No. 12 (92), p. 908–911 (in Russian).
- Kasavin I.T., Porus V.N. Philosophy of science in Russia: from Intellectual History to Modern Institutionalization. *Epistemologiya i filosofiya nauki* [Epistemology and Philosophy of Science], 2016, vol. 48, No. 2, p. 6–17 (in Russian).
- Kessidi F.H. *Geraklit* [Heraclitus]. Moscow, Mysl', 1982, 215 p. (in Russian).
- Lebedev S.A., Kos'kov S.N. *Epistemologiya i filosofiya nauki. Klassicheskaya i neklassicheskaya* [Epistemology and Philosophy of Science]. Moscow, Akademicheskij proekt, 2014, 295 p. (in Russian).
- Lomonosov M.V. *Meditationes de caliditate et frigoris cause auctore Michaelis Lomonosow=Cause of Heat and Cold. Mikhail Lomonosov's reasoning*. In: *Lomonosov M.V. Polnoe sobranie sochinenij* [Complete works. Book 2. Works on Physics and Chemistry]. Moscow; Leningrad, AN SSSR, 1951, p. 57–61 (in Russian).
- Melnikov V.P. Recent discoveries, theories, and tools: making a start toward new prospects in cryology. *Kriosfera Zemli* [Earth's Cryosphere], 2012, vol. XVI, No. 4, p. 3–9 (in Russian).
- Melnikov V.P., Gennadinik V.B. Cryosophy: an outlook of the cold world. *Kriosfera Zemli* [Earth's Cryosphere], 2011, vol. XV, No. 4, p. 3–7 (in Russian).
- Melnikov V.P., Gennadinik V.B. Cryosophy as an ontology of cold matter. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Gumanitarnye issledovaniya* [Tyumen State University Journal. Humanitarian Studies], 2012, No. 10, p. 6–14 (in Russian).
- Melnikov V.P., Gennadinik V.B., Brushkov A.V. Aspects of a cryosophy: a cryodiversity in nature. *Kriosfera Zemli* [Earth's Cryosphere], 2013, vol. XVII, No. 2, p. 3–11 (in Russian).
- Novaya filosofskaya enciklopediya [New Philosophical Encyclopedia]. Vol. 3. N–S. Moscow, Mysl', 2001, 692 p. (in Russian).
- Plutarh. On primary cold. In: *Filosofiya prirody v antichnosti i v srednie veka* [Nature Philosophy in Antiquity and in the Middle Ages]. Moscow, Progress-Tradiciya, 2000, p. 103–119 (in Russian).
- Popov P.S., Styazhkin N.I. *Razvitie logicheskikh idej v ehpohe Vozrozhdeniya* [Development of Logical Ideas during the Renaissance]. Moscow, Moscow University Press, 1983, 156 p. (in Russian).
- Rozhanskij I.D. *Razvitie estestvoznaniya v ehpohe antichnosti. Rannaya grecheskaya nauka o prirode* [Development of the Natural Sciences in Antiquity. Early Greek Science about Nature]. Moscow, Nauka, 1979, 485 p. (in Russian).
- Stepin V.S. *Filosofiya nauki. Obschie problemy* [Philosophy of Science. General Problems]. Moscow, Gardariki, 2006, 384 p. (in Russian).
- Stepin V.S. New problems of the philosophy of sciences. *Sociologiya* [Sociology], 2011, No. 3, p. 5–13 (in Russian).
- Stolyarova O.E. Can empirical science provide a justification for metaphysics? *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Filosofiya. Sociologiya. Politologiya* [Tomsk State University Journal. Philosophy, Sociology, Politicalology], 2018, No. 43, p. 5–18 (in Russian).
- Sumgin M.I. *Mноголетня́я мерзлота почвы в пределах СССР* [Permafrost Soil in the USSR]. *Vladivostok, Dal'nevost. geofiz. observatoriya*, 1927, 134 p. (in Russian).
- Fragmenty rannih grecheskikh filosofov. Ch. 1. *Ot ehpichekikh teokosmogonij do voznikoveniya atomistici* [Fragments of the Early Greek Philosophers. Part 1. From the Epic Theocosmogonies to the Birth of the Atomistics]. Moscow, Nauka, 1989, 577 p. (in Russian).
- Shavlov A.V., Dzhumandzhi V.A., Romanyuk S.N. Formation of spatially ordered structures by water drops in atmospheric clouds. *Earth's Cryosphere*, 2011, vol. XV, No. 4, p. 46–47.
- Sheinkman V.S., Melnikov V.P. Evolution of the understanding of cold and possible paths of its development in Earth sciences. *Earth's Cryosphere*, 2019, vol. XXIII, No. 5, p. 3–14.
- Melnikov V., Fedorov R. Discovery of the cold world on the Earth and in the Universe: from ancient natural philosophy to cryosophy. *Philosophy and Cosmology*, 2020, vol. 24, p. 48–60.

*Поступила в редакцию 1 июня 2020 г.,
после доработки – 25 июля 2020 г.,
принята к публикации 4 августа 2020 г.*

**ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ И ВО ЛЬДУ**

УДК 665.612.074

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-6(11-20)

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАЧАЛА ЗАМЕРЗАНИЯ ГРУНТОВ
НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА ПОРОВОЙ ВОДЫ****Е.М. Чувилин¹, Н.С. Соколова¹, Б.А. Буханов¹, В.А. Истомин^{1,2}, Г.Р. Мингареева³**

¹ Сколковский институт науки и технологий,
121205, Москва, Территория инновационного центра “Сколково”,
Большой бул., 30, стр. 1, Россия; e.chuvilin@skoltech.ru

² ООО “Газпром ВНИИГАЗ”,
142717, Московская обл., Ленинский р-н, пос. Развилка, Проектируемый проезд № 5537, вл. 15, стр. 1, Россия

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

Температура начала замерзания грунтов в настоящее время определяется не только прямым методом медленного охлаждения с фиксацией температуры при кристаллизации льда в переохлажденной системе, но и косвенными – пересчетом через другие измеряемые характеристики грунтовой системы. Разработанный водно-потенциометрический метод определения температуры начала замерзания мерзлых грунтов на основе единичного измерения потенциала поровой воды с последующим термодинамическим пересчетом в эквивалентную температуру является одним из наиболее перспективных косвенных методов благодаря скорости измерения и точности, сопоставимой с прямыми измерениями. Результаты исследований показали хорошую сопоставимость результатов, полученных водно-потенциометрическим методом, с прямыми измерениями температуры начала замерзания одних и тех же грунтов. Различие двух сравниваемых методов не превышает 0.05 °С для всех исследованных природных северных грунтов различного состава, засоленности и влажности. Водно-потенциометрический метод может быть рекомендован для определения температуры начала замерзания природных грунтов с естественной влажностью и засоленностью наравне с методами прямого экспериментального определения.

Грунты, температура начала замерзания, водно-потенциометрический метод, естественная влажность, потенциал поровой воды, активность поровой воды, степень засоленности, полуостров Ямал

**DETERMINATION OF THE FREEZING POINT OF SOILS BASED
ON MEASUREMENTS OF PORE WATER POTENTIAL****E.M. Chuvilin¹, N.S. Sokolova¹, B.A. Bukhanov¹, V.A. Istomin^{1,2}, G.R. Mingareeva³**

¹ Skolkovo Institute of Science and Technology, Skolkovo Innovation Center,
30, bldg. 1, Bolshoi ave., Moscow, 121205, Moscow, Russia; e.chuvilin@skoltech.ru

² JSC Gazprom VNIIGAZ,
15/1, Proektiruemiy passage No. 5537, Razvilka Village, Moscow region, Leninskiy district, 142717, Russia

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia

The soils freezing point is usually determined by both the direct method of slow cooling with the temperature monitoring during ice crystallization in a supercooled system, and indirect methods using other measured parameters of the soil system with further calculation. The water-potentiometric method for soil freezing point determination based on a single measurement of a pore water potential with subsequent thermodynamic conversion into an equivalent temperature has been developed. This approach is one of the most promising indirect methods due to its high productivity and accuracy comparable to direct measurements. The results have demonstrated good comparability of the obtained data by the water-potentiometric method with the direct measurements of the freezing point for the same soils. The values difference between the two methods is no more than 0.05 °C for all investigated permafrost soils with different particle size distribution, salinity and moisture content. The water-potentiometric method can be recommended for the freezing point determination applied to soils with natural moisture and salinity along with methods of direct experimental determination.

Soils, freezing point, water-potentiometric method, natural moisture content, pore water potential, pore water activity, salinity, Yamal Peninsula

ВВЕДЕНИЕ

Влажные дисперсные грунты являются многокомпонентными системами, переход которых из талого состояния в мерзлое происходит в спектре отрицательных по Цельсию температур. При этом температура начала замерзания поровой воды в дисперсных средах может значительно отличаться от 0 °С, что обусловлено минерализацией порового раствора и ее взаимодействием с органоминеральным скелетом. Температура начала замерзания, соответствующая температуре появления льда в поровом пространстве, является важной характеристикой грунта и используется при оценке глубины промерзания–оттаивания грунтов в инженерно-геологических исследованиях.

Для незасоленных песчаных и крупнообломочных грунтов значение температуры начала замерзания в ряде случаев можно принять равным –0.1 °С, а для глинистых грунтов оценить в –0.25 °С [СП 25.13330.2012, 2012]. Однако температуру начала замерзания засоленных и органосодержащих (заторфованных) грунтов необходимо определять опытным путем. На практике при проведении предварительных инженерных расчетов часто используют рекомендуемые значения температуры начала замерзания, например, приведенные в [СП 25.13330.2012, 2012]. Они определены в зависимости от дисперсности грунта (песчаный, супесчаный, суглинистый и глинистый) и минерализации (засоленности) порового раствора, рассчитываемой исходя из степени засоленности и суммарной влажности мерзлого грунта. При этом чем выше дисперсность и засоленность, тем ниже температура начала замерзания.

Следует отметить, что температуры замерзания и оттаивания грунтов могут несколько различаться. Так, температура оттаивания некоторых тонкодисперсных грунтов на десятки доли градуса выше температуры замерзания, что может быть объяснено влиянием капиллярного эффекта при замораживании [Савельев, 1989]. Однако при циклическом промерзании–оттаивании грунтов эти температуры почти перестают различаться, что, вероятно, связано со структурно-текстурными преобразованиями в грунтах. Поэтому на практике обычно используют термин “температура замерзания”, подразумевая, что ее величина практически равна температуре оттаивания грунта.

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУР ЗАМЕРЗАНИЯ (ОТТАИВАНИЯ) ГРУНТОВ

Методы определения температур замерзания грунтов можно подразделить на экспериментальные и расчетные. Именно экспериментальные определения температуры замерзания–оттаивания традиционно отводятся первостепенная роль с самого начала становления геокриологии. При

этом методика опытного (экспериментального) нахождения температуры начала замерзания совершенствуется в соответствии с развитием аппаратной исследовательской базы для фиксации температуры, определяясь чувствительностью измерительных устройств, используемых в качестве индикаторов температуры [Андрианов, 1936; Боженова, 1954; Цытович, 1973; Лабораторные методы..., 1985; Методы..., 2004]. Следует отметить, что методика прямого экспериментального определения температуры начала замерзания грунтов, разработанная российскими мерзлотоведами в середине XX в., применяется специалистами в других научных областях при определении температур замерзания различных жидких сред, в том числе водных растворов различных веществ [Методы..., 2004; Геворкян, 2017].

Первоначально для исследования температур замерзания грунтов использовались термометры с визуальным контролем температур и дискретной ручной записью результатов, часто зависящей от оперативности экспериментатора. На смену термометрам пришли различные типы термодатчиков (термоэлектрические, терморезистивные, полупроводниковые, акустические, пьезоэлектрические), а запись температур стало возможно проводить в непрерывном режиме благодаря внедрению самопишущих потенциометров (КСП), и применять автоматическую обработку результатов. Однако чувствительность датчиков и автоматизация процесса измерения лишь повысили точность фиксации температур во времени, а методика эксперимента по определению искомой величины оставалась практически неизменной.

Как известно, температура начала замерзания (т. е. кристаллизации поровой воды в грунте) определяется по “полочке” на температурной кривой, которая фиксируется сразу после температурного скачка, возникающего в результате начала замерзания переохлажденного грунта [Методы..., 2004]. На практике, в зависимости от состава грунта и темпа охлаждения, в переохлажденном состоянии система может находиться достаточно долго. Поэтому иногда исследователи определяют температуру оттаивания мерзлого грунта, поскольку в этом случае нет эффекта перегрева системы. Но здесь возникают проблемы, связанные с наличием градиента температурного поля [Методы..., 2004; Teng et al., 2020]. Отметим, что экспериментально-техническая база для проведения экспериментов при промерзании и оттаивании остается практически одной и той же.

В литературе предпринимаются попытки использования новых технических решений по прямому измерению температуры начала замерзания воды в грунтах, например, недавно предложен оригинальный метод “начала кристаллизации” [Колунин, Ишкова, 2019], который, однако, может

применяться только к образцам с однородной структурой, для которых и был разработан.

Температуру начала замерзания грунтов с известной влажностью можно также определять по кривой зависимости содержания незамерзшей воды от отрицательной по Цельсию температуры, полученной для данного грунта в широком диапазоне температур [Руководство..., 1973]. Для определения содержания незамерзшей воды используется много различных методов, как экспериментальных, так и расчетных. Продолжают появляться новые более точные и быстрые методы, а ранее предложенные методики развиваются и совершенствуются [Чувиллин и др., 2020]. Однако следует отметить, что определение температуры замерзания по кривой незамерзшей воды является более долгим и трудоемким путем, чем прямые измерения.

К настоящему времени выполнено много экспериментальных работ по оценке влияния различных факторов на температуру замерзания грунтов, таких как дисперсность, минеральный состав, засоленность, содержание органических веществ и различных загрязнителей [Основы..., 1996; Мотенко, Гречищева, 2016; Алексютина, Мотенко, 2017; Li et al., 2020; Teng et al., 2020], а также влияния температуры замерзания на прочностные и деформационные характеристики мерзлых грунтов [Роман и др., 1994].

Наряду с экспериментами, многие исследователи предлагали расчетные формулы для оценки температуры замерзания грунтов, используя при этом и различные корреляции с физическими характеристиками грунтов. Так, на основе статистического анализа и обобщения экспериментальных результатов, полученных калориметрическим методом, была предложена эмпирическая формула расчета температуры замерзания, учитывающая значения предела пластичности и суммарной влажности исследуемых грунтов [Kozłowski, 2004, 2007, 2016]. Также оценка температуры начала замерзания грунтов проводилась на основе уравнения Клапейрона–Клаузиуса путем добавления дополнительных параметров и эмпирических коэффициентов [Koopmans, Miller, 1966; Kurylyk, Watanabe, 2013; Zhou et al., 2018]. Температура замерзания при одном и том же содержании поровой воды может зависеть от ряда факторов, таких как минеральный состав, распределение зерен и пор по размерам, удельная площадь поверхности, содержание растворенных веществ [Kozłowski, 2004, 2007; Zhou et al., 2018; Wang et al., 2020], и даже от массы образца [Kozłowski, 2009], что требует дальнейшего уточнения расчетных формул и четкого определения границ их применимости.

Возвращаясь к методам прямого определения температуры замерзания (оттаивания) грунтов, следует отметить, что они предполагают использо-

вание экспериментальных установок, обязательным элементом которых являются замораживающие устройства (термостат или холодильный шкаф), куда помещают образцы исследуемого грунта, а также датчики различных модификаций для регистрации температуры. Однако методы прямого определения температуры замерзания (оттаивания) требуют существенных временных затрат (6 ч и более), а также необходимости размещения, подключения и непрерывного функционирования холодильного оборудования, что не всегда можно обеспечить.

В этой связи возникает необходимость разработки оперативных косвенных методов определения данных характеристик грунта. В качестве такого метода нами предлагается водно-потенциметрический метод (ВПМ) определения температуры замерзания (оттаивания) грунтов на основе единичного измерения потенциала поровой воды в образце. В обоснование возможности практического использования предлагаемого метода проведен сравнительный анализ данных по определению температуры замерзания (оттаивания) грунтов, полученных традиционным экспериментальным путем в ходе охлаждения и нагревания грунтовых образцов и методом, основанным на измерении потенциала влаги в исследуемых образцах с термодинамическим пересчетом полу-потенциала в значение температуры замерзания.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Принятая в данной работе методика включала использование двух методов оценки температур замерзания–оттаивания грунтов: прямого метода измерения температур замерзания (оттаивания) на основе использования экспериментальной установки “Kriolab Tbf”, разработанной ООО “Криолаб”, и водно-потенциметрического метода, который базируется на одновременном измерении потенциала поровой воды образца с естественной или заданной влажностью.

Методика экспериментального определения температуры замерзания (оттаивания) грунтов. Экспериментальное определение температуры замерзания грунтов проводилось на оборудовании “Комплекс информационно-регистрирующий (ИРК) Kriolab” в комплектации “Tbf” с использованием программного обеспечения (ПО) Kriolab Tbf. Лабораторная установка для определения температуры начала замерзания грунта “Kriolab Tbf” состояла из специального мобильного морозильного шкафа, в который помещали контейнер (диаметром 30 см и высотой 40 см) с исследуемым грунтом (рис. 1). В контейнер с грунтом через отверстие в крышке вставляли датчик температуры, загерметизированный в игольчатую гильзу с

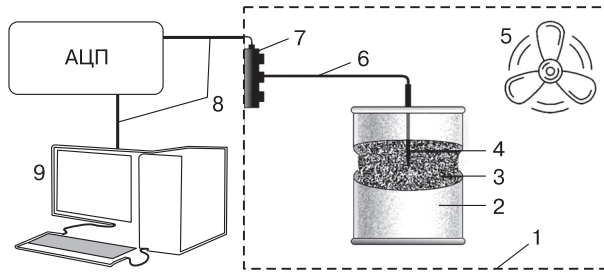


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки “Kriolab Tbf” для измерения температуры заморзания (оттаивания) грунтов:

1 – морозильный шкаф; 2 – контейнер для грунта; 3 – грунт; 4 – датчик температуры; 5 – вентилятор; 6 – термокоса; 7 – разветвитель для подключения дополнительных датчиков температуры; 8 – USB-кабель; 9 – компьютер с ПО Kriolab Tbf.

внешним диаметром 3 мм, соединенную с термокосой, которая подключалась к разветвителю. Через него термокоса производства ООО “Криолаб” соединялась с АЦП и далее посредством USB-кабеля с компьютером [Руководство..., 2019].

Температурные датчики в установке были протарированы с точностью ± 0.01 °С в криотермостате специальным эталонным термодатчиком.

При определении температуры начала заморзания грунтов в мобильной морозильной установке поддерживалась температура $-5...-10$ °С, которая была всегда ниже температуры возможного переохлаждения грунта. При определении температуры оттаивания мерзлых грунтов эксперименты проводились при значениях на $1-5$ °С выше ожидаемой температуры полного оттаивания грунта.

Температура начала заморзания (оттаивания) определялась следующим образом. Контейнеры (бюксы) для определения температуры заморзания плотно заполняли исследуемым грунтом, чтобы максимально исключить возможность искажения при измерении температуры датчиком, который устанавливали в геометрический центр бюкса. Оснащенные датчиками бюксы помещали в морозильную камеру с заранее выставленной температурой, после чего осуществляли подключение датчиков к компьютеру и запуск ПО в режиме непрерывной записи измерений. Завершение измерений в цикле промерзания производилось при показателях датчиков температуры в образцах, приближенных к установленной в морозильной камере температуре, и сохранении этой температуры образцов продолжительное время. Для последующего определения температуры начала оттаивания из морозильной камеры извлекали бюксы с образцами, а измерение температуры грунтов в бюксах продолжали посредством уста-

новленных в них датчиков до окончания цикла оттаивания.

По окончании измерений производили контроль влажности образцов.

Температура начала заморзания при обработке результатов в цикле замораживания находилась на полученной диаграмме по “полочке”, т. е. временному участку практически с нулевым температурным градиентом. Температура начала оттаивания определялась как точка пересечения двух касательных к участкам: начального этапа таяния порового льда и последующего этапа интенсивного оттаивания образца.

Время измерения составляло более 12 ч при определении температуры заморзания (при замораживании образцов от комнатной температуры до -10 °С) и не менее 8 ч при определении температуры оттаивания (при оттаивании образцов от -10 до $+10$ °С) [Руководство..., 2019].

Методика определения температуры заморзания (оттаивания) мерзлых грунтов водно-потенциометрическим методом на основе единичного измерения. Определение температуры заморзания (оттаивания) грунтов водно-потенциометрическим методом основывается на измерении потенциала поровой воды в исследуемом грунтовом образце с последующим термодинамическим пересчетом потенциала поровой воды в эквивалентную температуру, при которой поровая вода находится в равновесии со льдом в свободном объеме [Истомин и др., 2009]. При этом все измерения проводятся при положительной по Цельсию температуре и не требуют для подготовки образцов специального холодильного оборудования.

Предлагаемая методика определения температуры начала заморзания фактически представляет собой экспресс-метод. Это достигается быстрым измерением значений потенциала влаги исследуемого образца и схемой пересчета значений потенциала поровой воды через ее активность в температуру заморзания.

Экспериментальное измерение потенциала поровой воды проводилось на приборах WP4-T или WP4-C [Истомин и др., 2008, 2009, 2017], разработанных компанией Decagon Devices (США) [Campbell et al., 2007] (рис. 2). Измерительная система данных приборов основана на определении давления паров воды над влажным грунтом по методу “точки росы” [Campbell et al., 2007]. Используемые приборы позволяют получать значения потенциала поровой воды в температурном диапазоне от 15 до 43 °С. С учетом калибровочных измерений на эталонных растворах погрешность измерения потенциала поровой воды в диапазоне давлений от 0 до -5 МПа оценивается в пределах ± 0.05 МПа, а в диапазоне от -5 до -50 МПа составляет ± 1 % [Чувиллин и др., 2020].

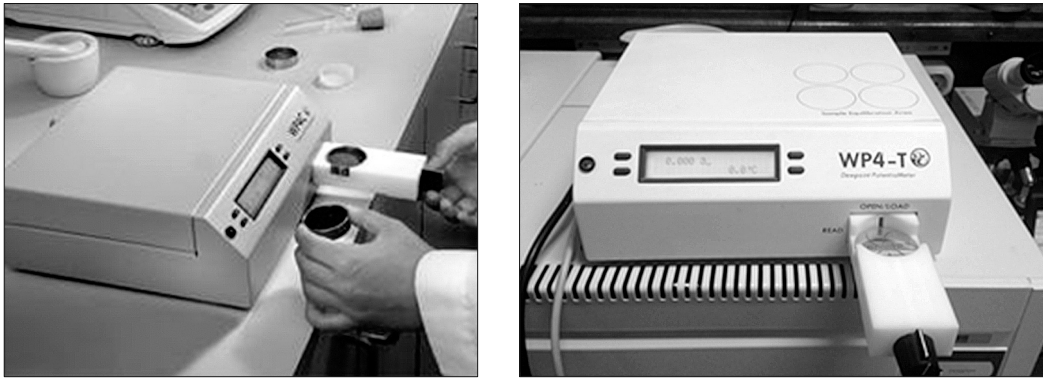


Рис. 2. Прибор WP4-T компании Decagon (США).

Пересчет значения измеряемого потенциала поровой воды (ϕ) в активность поровой воды (α) осуществляется по соотношению

$$\phi = \frac{RT\rho}{M} \ln \alpha, \quad (1)$$

где R – универсальная газовая постоянная (8.314 Дж/(моль·К)); T – температура исследуемого образца пористой среды, К; M – молекулярная масса воды (18.015 г/моль); ρ – плотность воды (1.0 г/см³).

Принятая в работе методика измерений позволяет получать значения активности с точностью 0.0005 при $0.9 \leq \alpha \leq 1.0$ и до 0.0025 при $0.7 \leq \alpha \leq 0.9$ [Чувиллин и др., 2020].

Для измерения потенциала поровой воды в приборах типа WP4 в измерительную чашку прибора (с внутренними размерами: диаметр 3.8 см, высота 1.0 см) помещали образцы грунта с естественной или заданной влажностью. Влажный грунт нарушенного сложения равномерно распределяли по дну чашки так, чтобы получилась грунтовая таблетка высотой около 0.5 см (данный размер обусловлен спецификой работы измерительной системы прибора). Образцы ненарушенного сложения также должны иметь цилиндрическую форму диаметром около 3.8 см и высотой 0.5 см. Исходная влажность грунтового образца определялась путем его взвешивания на электронных весах с точностью ± 0.003 г, причем контроль влажности осуществляли до и после измерения потенциала поровой воды. Для известного значения влажности образца на приборах типа WP4 первоначально измеряли потенциал поровой воды, затем рассчитывали активность поровой воды по соотношению (1). В дальнейшем значения активности пересчитывали в равновесную температуру, которая фактически представляла температуру замерзания при заданной влажности грунтового образца. Пересчет полученных значений активности поровой воды α в диапазоне от 1.0 до 0.6–0.7 в эквивалентную температуру (t_{eq} , °C) проводился по

формуле [Истомин и др., 2017; Снособ..., 2018; Istomin et al., 2017]

$$t_{eq} = 103.25 \ln \alpha + 5.57(1 - \alpha)^2. \quad (2)$$

Полученное значение является температурой замерзания (оттаивания) исследуемого образца грунта с заданной исходной влажностью.

Время получения одного значения потенциала поровой воды в приборе WP4 (время установления равновесия в измерительной камере между водой в образце и воздухом, содержащим пары воды) составляет около 20–30 мин, лишь для глинистых грунтов с низкой влажностью оно может возрасти до 1 ч. При проведении измерений прибор WP4 подключался к компьютеру через стандартную программу Nureg Terminal для автоматизации процесса получения, накопления и обработки данных.

Таким образом, предлагаемая методика определения температуры начала замерзания позволяет провести большое количество измерений с высокой точностью, получить данные по температурам замерзания (оттаивания) для нескольких десятков образцов грунтов в широком диапазоне химико-минерального состава и дисперсности в течение одного рабочего дня.

Характеристика объектов исследования.

Методические исследования с использованием двух методов определения температур замерзания проводились на природных грунтах, типичных для верхних горизонтов многолетнемерзлых пород полуострова Ямал. Керны мерзлых грунтов были отобраны из скважин глубиной до 34 м (табл. 1), пробуренных во время инженерных изысканий на территории Южно-Тамбейского ГКМ.

Грунты, используемые для сравнительного определения температур замерзания разными методами, представлены в широком спектре дисперсности (песок, суглинок, глина) и засоленности, которая в исследуемых образцах отличается более чем на порядок и изменяется от 0.22 до 2.71 % (см. табл. 1).

Таблица 1. Краткая характеристика исследуемых грунтов

Номер образца	Глубина отбора, м	Наименование грунта*	Влажность, %	Число пластичности	Степень засоленности, %	Температура начала замерзания грунта**, °С
1	1.7–2.0	Глина легкая с примесью органического вещества	74.8	24.3	1.10	–1.0
2	4.0–4.3	Песок пылеватый	23.3	–	0.29	–0.8
3	4.8–5.0	Песок мелкий	28.5	–	0.22	–0.5
4	7.5–7.7	Суглинок легкий с примесью торфа	33.9	9.7	2.71	–4.1
5	11.1–11.3	Песок пылеватый	23.7	–	0.43	–1.1
6	14.0–14.5	Песок мелкий	20.2	–	0.29	–0.9
7	24.5–24.7	Суглинок легкий	14.9	8.8	0.50	–2.0
8	33.6–33.9	Суглинок легкий	18.6	8.5	0.54	–1.8

* По: [ГОСТ 25100-2011, 2013].

** Рассчитано по: [СП 25.13330.2012, 2012].

Для определения температур замерзания были взяты образцы с естественной влажностью. Максимальным значением влажности (около 75 %) отличались образцы глины, полученные из верхней части разреза с глубины около 2 м. Вниз по разрезу отмечалось уменьшение естественной влажности, при этом минимальное значение (15–19 %) было у образцов суглинка с глубин ниже 24 м (см. табл. 1). Плотность грунтов менялась от 1.25 г/см³ в образцах глины из верхней части разреза до 1.90–1.95 г/см³ в пылеватых песках, а плотность сухого грунта различалась в образцах более чем на 1 г/см³ (от 0.56 до 1.59 г/см³) и была тем больше, чем меньше влажность образцов. Коэффициент пористости имел максимальные значения у глины (3.64), снижаясь до 0.9 в суглинках и 0.7–0.8 в песчаных образцах. Плотность частиц грунта составляла 2.61–2.66 г/см³.

По данным рентгеноструктурного анализа, выполненного на дифрактометре ДРОН 3 с использованием монохроматизированного CuK_α-излучения, во всех исследованных грунтах в песчаной фракции преобладающим минералом являлся кварц, составляющий до 71 % в мелком песке, в меньшем количестве содержатся плагиоклазы (до 19 %) и калиевые полевые шпаты (до 14 %). Глинистая фракция исследуемых грунтов была представлена хлоритом, иллитом и каолинитом. Кроме того, в грунтах было отмечено присутствие амфибола, пироксена, а также следы кристобаллита, гетита и пирита (не более 1 %). Данные минерального состава исследуемых образцов, полученные путем профильной обработки рентгеновских картин от неориентированных препаратов и расчета количества идентифицированных фаз методом корундовых чисел (метод Чанга, метод внутреннего стандарта), показывали определенное сходство, которое выражается в близких значениях содержания основных породообразую-

щих минералов, что может указывать на похожие первоначальные условия осадконакопления.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе описанных выше двух методик были определены температуры замерзания (оттаивания) образцов грунтов с естественной влажностью и выполнено сравнение, которое показало хорошую сходимость полученных результатов (табл. 2).

Как видно из табл. 2, экспериментальная температура замерзания образцов, замеренная с помощью высокоточных температурных датчиков, практически совпадала с температурой замерзания, рассчитанной по измеренному в образцах потенциалу поровой воды. В рассмотренных грунтах разница между экспериментальным и расчетным значениями не превышала 0.05 °С и сопоставима с точностью каждого из рассмотренных методов. При этом следует учитывать, что для большинства экспериментальных установок, в том числе для определения температуры начала замерзания грунтов, точность температурных измерений должна быть не хуже ±0.1 °С, что является достаточным для решения стандартных мерзлотно-геологических задач [Методы..., 2004].

Если округлить полученные по двум методам значения температуры замерзания до десятых долей градуса Цельсия, то полученные расчетные значения совпадают с результатами прямых измерений, с возможным отличием в отдельных случаях не более чем на 0.1 °С. Это свидетельствует о достаточно высокой воспроизводимости результатов, полученных рассмотренными методами (рис. 3).

На рис. 3 видно, что все экспериментальные и расчетные точки имеют минимальное отклонение от диагонали. Коэффициент корреляции составил

Таблица 2. Сравнение температур замерзания, полученных экспериментальным и расчетным методами, для исследуемых грунтов

Номер образца	Наименование грунта	Влажность, %	Потенциал поровой воды, МПа	Активность поровой воды, д.ед.	Температура замерзания, °С		Разница температур замерзания, °С
					расчетная	замеренная	
1	Глина легкая с примесью органического вещества	74.8	-0.90	0.9935	-0.67	-0.68	+0.01
2	Песок пылеватый	23.3	-0.73	0.9947	-0.55	-0.52	-0.03
3	Песок мелкий	28.5	-0.66	0.9952	-0.49	-0.49	+0.00
4	Суглинок легкий с примесью торфа	33.9	-3.79	0.9728	-2.84	-2.81	-0.03
5	Песок пылеватый	23.7	-1.78	0.9872	-1.33	-1.31	-0.02
6	Песок мелкий	20.2	-1.48	0.9893	-1.11	-1.16	+0.05
7	Суглинок легкий	14.9	-1.63	0.9882	-1.22	-1.17	-0.05
8	Суглинок легкий	18.6	-0.99	0.9928	-0.74	-0.70	-0.04

$R^2 = 0.9981$. Следует отметить, что высокая корреляция двух методов наблюдается в широком диапазоне температур замерзания, обусловленных различными дисперсностью, влажностью и засоленностью (см. табл. 1). Фактически это означает, что предлагаемый водно-потенциометрический метод может широко использоваться для определения температур замерзания практически любых природных грунтов и служить надежной альтернативой прямому экспериментальному измерению температур замерзания (оттаивания) грунтов. При этом следует иметь в виду компактность приборов серии WP4, отсутствие расходных материалов, а также быстроту проведения измерений и расчетов и их высокую точность.

В то же время если сравнить результаты определения температуры начала замерзания, полученные экспериментальным и водно-потенциометрическим методами, с рассчитанными по [СП 25.13330.2012, 2012], то можно видеть, что величины отклонений значений начала температур замерзания в грунтовых образцах в последнем слу-

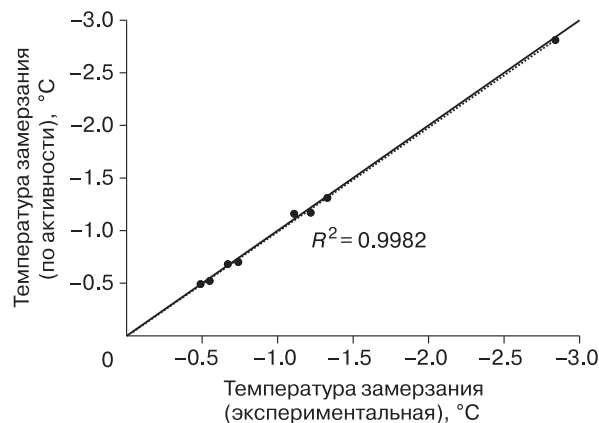


Рис. 3. Сопоставление значений температуры замерзания, полученных экспериментально и рассчитанных по активности поровой воды.

чае достигают 0.5–1.0 °С и более, особенно когда сравниваются засоленные образцы. Таким образом, расчетный метод по [СП 25.13330.2012, 2012] стоит рассматривать как предварительный результат, который в дальнейшем должен быть подтвержден экспериментальными определениями (рис. 4).

Следует отметить, что в отдельных случаях (например, для грунтов, сильно загрязненных легкоиспаряющимися органическими соединениями) применение ВПМ может иметь определенные ограничения. Но специальных исследований для

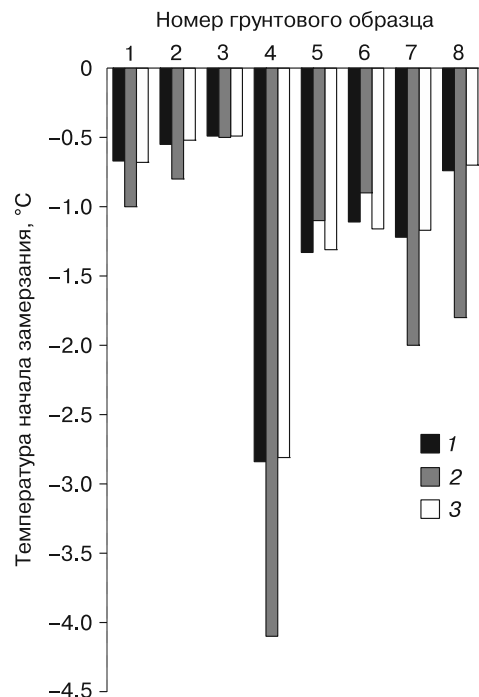


Рис. 4. Сравнение температур начала замерзания, полученных экспериментальным (1) и водно-потенциометрическим (3) методами, с рассчитанными (2) по [СП 25.13330.2012, 2012].

выяснения границ применимости ВПМ для определения температуры замерзания (оттаивания) загрязненных легкоиспаряющимися органическими соединениями грунтов авторами не проводилось.

ВЫВОДЫ

Температура начала замерзания (оттаивания) является важной характеристикой грунтов, что вызывает необходимость ее экспериментального определения при проведении различных мерзлотно-геологических исследований и инженерных изысканий. Однако стандартная методика экспериментального измерения температуры начала замерзания грунтов отличается значительной трудоемкостью, энергозатратностью и длительностью, поэтому в настоящее время особую актуальность приобретает разработка различных косвенных (экспериментально-расчетных) методов для ее оценки.

Предложенный в работе водно-потенциометрический метод определения температуры замерзания (оттаивания) грунтов основан на измерении потенциала поровой воды с последующим его пересчетом в эквивалентную температуру, которая фактически и является температурой замерзания (или оттаивания). Этот метод имеет ряд преимуществ, прежде всего связанных с использованием простого серийного прибора WP4, когда все необходимые измерения проводятся при комнатной температуре за достаточно короткий интервал времени (до 30 мин на один образец). При этом для получения значений температуры начала замерзания исследуемых грунтов отсутствует необходимость в использовании какого-либо холодильного оборудования.

Проведенное сравнение результатов определения температуры замерзания для одних и тех же грунтов прямым измерением и ВПМ показало их хорошую согласованность: максимальное отклонение не превышает 0.05 °С, что находится в пределах точности прецизионных экспериментальных установок по определению температуры начала замерзания.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант 18-77-10063) и РФФИ (проект № 19-55-51001).

Литература

- Алексютин Д.М., Мотенко Р.Г. Состав, строение и свойства мерзлых и талых отложений побережья Байдарацкой губы Карского моря // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 1, с. 13–25.
- Андрянов П.И. Температура замерзания грунтов. М., Изд-во АН СССР, 1936, 16 с.
- Боженова А.П. Инструктивные указания по лабораторным методам определения температуры переохлаждения и начала замерзания грунтов // Материалы по лабораторным исследованиям мерзлых грунтов. М., Изд-во АН СССР, 1954, сб. 2, с. 16–31.
- Геворкян С.Г. К определению минимальной температуры воздуха во Фракии зимой 400–399 гг. до н.э. (на основании сообщения Ксенофонта) // Пространство и время, 2017, № 1 (27), с. 225–233.
- ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М., Стандартинформ, 2013, 38 с.
- Истомин В.А., Чувиллин Е.М., Буханов Б.А. Ускоренный метод оценки содержания незамерзшей воды в мерзлых грунтах // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 6, с. 134–139.
- Истомин В.А., Чувиллин Е.М., Махонина Н.А. и др. Метод расчета кривой незамерзшей воды по потенциалу влаги // Материалы Междунар. конф. “Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения”. Тюмень, Экспресс, 2008, с. 398–401.
- Истомин В.А., Чувиллин Е.М., Махонина Н.А., Буханов Б.А. Определение температурной зависимости содержания незамерзшей воды в грунтах по потенциалу влаги // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 2, с. 35–43.
- Колунин В.С., Ишкова З.А. Метод “начала кристаллизации” воды для определения температуры начала замерзания грунтов // Криосфера Земли, 2019, т. XXIII, № 6, с. 3–7.
- Лабораторные методы исследования мерзлых пород / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1985, 351 с.
- Методы геокриологических исследований / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 2004, 512 с.
- Мотенко Р.Г., Гречищева Э.С. Температура начала замерзания и фазовый состав влаги грунтов различного гранулометрического состава при нефтесолевом загрязнении // Материалы пятой конф. геокриологов России (Москва, 14–17 июня 2016 г.). М., Унив. книга, 2016, с. 69–76.
- Основы геокриологии. Ч. 2. Литогенетическая геокриология / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1996, 399 с.
- Роман Л.Т., Артюшина В.И., Иванова Л.Г. Зависимость прочности мерзлых засоленных грунтов от температуры начала замерзания грунтовой влаги // Геоэкология, 1994, № 1, с. 49–55.
- Руководство по определению физических, теплофизических и механических характеристик мерзлых грунтов / Ред. Р.М. Саркисян, З.А. Нерсесова, С.С. Вялов, А.Г. Зацарная. М., Изд-во лит. по стр-ву, 1973, 194 с.
- Руководство по эксплуатации. Комплекс для определения начала замерзания грунта “Kriolab Tbf” 4211-001-62766184-2019. М., ООО “Криолаб”, 2019, 11 с.
- Савельев Б.А. Физико-химическая механика мерзлых пород. М., Недра, 1989, 508 с.
- Способ определения содержания незамерзшей воды в грунтах: патент RU 2654832 С1. Российская Федерация: МПК G01N 25/56 (2006.01) / Истомин В.А., Чувиллин Е.М., Буханов Б.А.; патентообладатель Сколковский ин-т науки и технологий. – № 2017121829; заявл. 21.06.2017; опубл. 22.05.2018, Бюл. № 15.
- СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М., ООО “Аналитика”, 2012, 118 с.
- Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М., Высш. шк., 1973, 446 с.
- Чувиллин Е.М., Соколова Н.С., Буханов Б.А. и др. Применение водно-потенциометрического метода для определения содержания незамерзшей воды в мерзлых грунтах различного состава // Криосфера Земли, 2020, т. XXIV, № 5, с. 16–28.

- Campbell G.S., Smith D.M., Teare B.L.** Application of a Dew Point Method to obtain the soil water characteristic // Springer Proc. in Physics, 2007, No. 112, p. 71–77.
- Istomin V., Chuvilin E., Bukhanov B. et al.** Pore water content in equilibrium with ice or gas hydrate in sediments // Cold Regions Sci. and Technol., 2017, vol. 137, p. 60–67.
- Koopmans R.W.R., Miller R.** Soil freezing and soil water characteristic curves 1 // Soil Sci. Soc. Amer. J., 1966, vol. 30 (6), p. 680–685.
- Kozlowski T.** Soil freezing point as obtained on melting // Cold Regions Sci. and Technol., 2004, vol. 38 (2–3), p. 93–101, DOI: 10.1016/j.coldregions.2003.09.001.
- Kozlowski T.** A semi-empirical model for phase composition of water in clay-water systems // Cold Regions Sci. and Technol., 2007, vol. 49 (3), p. 226–236, DOI: 10.1016/j.coldregions.2007.03.013.
- Kozlowski T.** Some factors affecting supercooling and the equilibrium freezing point in soil–water systems // Cold Regions Sci. and Technol., 2009, vol. 59 (1), p. 25–33, DOI: 10.1016/j.coldregions.2009.05.009.
- Kozlowski T.** A simple method of obtaining the soil freezing point depression, the unfrozen water content and the pore size distribution curves from the DSC peak maximum temperature // Cold Regions Sci. and Technol., 2016, vol. 122, p. 18–25, DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.10.009.
- Kurylyk B.L., Watanabe K.** The mathematical representation of freezing and thawing processes in variably-saturated, non-deformable soils // Adv. Water Resources, 2013, vol. 60, p. 160–177.
- Li G., Zhang J., Zhou Z. et al.** A novel freezing point determination method for oil – contaminated soils based on electrical resistance measurement and its influencing factors // Sci. Total Environ., 2020, vol. 721 (137821), p. 1–11, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137821.
- Teng J., Koub J., Yanc X. et al.** Parameterization of soil freezing characteristic curve for unsaturated soils // Cold Regions Sci. and Technol., 2020, vol. 170 (102928), p. 1–29, DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102928.
- Wang Q., Qi J., Wang S. et al.** Effect of freeze-thaw on freezing point of a saline loess // Cold Regions Sci. and Technol., 2020, vol. 170 (102922), p. 1–21, DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102922.
- Zhou J., Wei C., Lai Y. et al.** Application of the generalized Clapeyron equation to freezing point depression and unfrozen water content // Water Resour. Res., 2018, vol. 54, p. 9412–9431, DOI: 10.1029/2018WR023221.
- State Standard, 2013. Working Document 25100-2011. Soils. Classification. Moscow, Standartinform, 38 p. (in Russian).
- Istomin V.A., Chuvilin E.M., Bukhanov B.A. Fast estimation of unfrozen water content in frozen soils. Earth's Cryosphere, 2017, vol. XXI, No. 6, p. 116–120.
- Istomin V.A., Chuvilin E.M., Makhonina N.A. et al. Method for calculating the curve of unfrozen water by moisture potential. In: Materials Intern. Conf. “Cryogenic resources of the polar and mountainous regions. The state and prospects of permafrost engineering”. Tyumen, Ekspres, 2008, p. 398–401 (in Russian).
- Istomin V.A., Chuvilin E.M., Makhonina N.A., Bukhanov B.A. Temperature dependence of unfrozen water content in sediments on the water potential measurements. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2009, vol. XIII, No. 2, p. 35–43 (in Russian).
- Kolunin V.S., Ishkova Z.A. The “water crystallization-onset” method for determining the freezing point of soils. Earth's Cryosphere, 2019, vol. XXIII, No. 6, p. 3–6.
- Ershov E.D. (Ed.). Laboratory methods for the study of frozen rocks. Moscow, Moscow University Press, 1985, 351 p. (in Russian).
- Ershov E.D. (Ed.). Methods of geocryological research. Moscow, Moscow University Press, 2004, 512 p. (in Russian).
- Motenko R.G., Grechishcheva E.S. The freezing temperature and phase composition of moisture in soils of different particle size distribution during oil and salt contamination. In: Materials of the Fifth Conf. of Russian Geocryologists (Moscow, June 14–17, 2016). Moscow, Universit. Kniga, 2016, p. 69–76 (in Russian).
- Ershov E.D. (Ed.). Fundamentals of Geocryology. Part 2. Lithogenetic Geocryology. Moscow, Moscow University Press, 1996, 399 p. (in Russian).
- Roman L.T., Artyushina V.I., Ivanova L.G. Dependence of the strength of frozen saline soils on the temperature of the onset of ground moisture freezing. Geoekologiya [Geocology], 1994, No. 1, p. 49–55 (in Russian).
- Sargsyan R.M., Nersesova Z.A., Vyalov S.S., Zazarnaya A.G. (Eds.). Guidelines for the determination of the physical, thermophysical and mechanical characteristics of frozen soils. Moscow, Izd-vo literatury po stroitel'stvu, 1973, 194 p. (in Russian).
- Manual. Complex for determining the beginning of soil freezing “Kriolab TbP” 4211-001-62766184-2019. Moscow, OOO “Kriolab”, 2019, 11 p. (in Russian).
- Saveliev B.A. Fiziko-khimicheskaya mekhanika merzlykh porod [Physico-chemical Mechanics of Frozen Rocks]. Moscow, Nedra, 1989, 508 p. (in Russian).
- Patent RU 2654832 C1. Sposob opredelenia sodержaniya nezamerzshykh void [Method for unfrozen water content determination]. Istomin V.A., Chuvilin E.M., Bukhanov B.A. Russian Federation MPK G01N 25/56 (2006.01). Patent Holder Skolkovo Institute of Science and Technology. – No. 2017121829. Claimed 21.06.2017. Published 22.05.2018, Bull. No. 15 (in Russian).
- SP 25.13330.2012. Foundations and foundations on permafrost soils. Moscow, OOO “Analitika”, 2012, 118 p. (in Russian).
- Tsytovich N.A. Mekhanika merzlykh gruntov [Mechanics of Frozen Soils]. Moscow, Vysshaya Shkola, 1973, 446 p. (in Russian).
- Chuvilin E.M., Sokolova N.S., Bukhanov B.A., Shevchik F.A., Istomin V.A., Mukhametdinova A.Z., Alekseev A.G., Grechishcheva E.S. Application of water-potentiometric method for unfrozen water content determination in different frozen soils. Earth's Cryosphere, 2020, vol. XXIV, No. 5, p. 16–28.

References

- Aleksyutina D.M., Motenko R.G. The composition, structure and properties of frozen and thawed deposits on the Baydaratskaya Bay coast, Kara Sea. Earth's Cryosphere, 2017, vol. XXI, No. 1, p. 11–22.
- Andrianov P.I. Temperatura zamerzaniya gruntov [The Freezing Temperature of Soils]. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1936, 16 p. (in Russian).
- Bozhenova A.P. Instructions on laboratory methods for determining the temperature of subcooling and the beginning of soil freezing. In: Materials on laboratory studies of frozen soils. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1954, vol. 2, p. 16–31 (in Russian).
- Gevorgyan S.G. To determine the minimum air temperature in Thrace in the winter of 400–399. BC. (based on the message of Xenophon). Prostranstvo i Vremya [Space and Time], 2017, vol. 27. No. 1, p. 225–233 (in Russian).

- Campbell G.S., Smith D.M., Teare B.L. Application of a Dew Point Method to obtain the soil water characteristic. Springer Proc. in Physics, 2007, No. 112, p. 71–77.
- Istomin V., Chuvilin E., Bukhanov B. et al. Pore water content in equilibrium with ice or gas hydrate in sediments. Cold Regions Sci. and Technol., 2017, vol. 137, p. 60–67.
- Koopmans R.W.R., Miller R. Soil freezing and soil water characteristic curves 1. Soil Sci. Soc. Amer. J., 1966, vol. 30 (6), p. 680–685.
- Kozlowski T. Soil freezing point as obtained on melting. Cold Regions Sci. and Technol., 2004, vol. 38 (2–3), p. 93–101, DOI: 10.1016/j.coldregions.2003.09.001.
- Kozlowski T. A semi-empirical model for phase composition of water in clay-water systems. Cold Regions Sci. and Technol., 2007, vol. 49 (3), p. 226–236, DOI: 10.1016/j.coldregions.2007.03.013.
- Kozlowski T. Some factors affecting supercooling and the equilibrium freezing point in soil–water systems. Cold Regions Sci. and Technol., 2009, vol. 59 (1), p. 25–33, DOI: 10.1016/j.coldregions.2009.05.009.
- Kozlowski T. A simple method of obtaining the soil freezing point depression, the unfrozen water content and the pore size distribution curves from the DSC peak maximum temperature. Cold Regions Sci. and Technol., 2016, vol. 122, p. 18–25, DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.10.009.
- Kurylyk B.L., Watanabe K. The mathematical representation of freezing and thawing processes in variably-saturated, non-deformable soils. Adv. Water Resources, 2013, vol. 60, p. 160–177.
- Li G., Zhang J., Zhou Z. et al. A novel freezing point determination method for oil – contaminated soils based on electrical resistance measurement and its influencing factors. Sci. Total Environ., 2020, vol. 721 (137821), p. 1–11, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137821.
- Teng J., Koub J., Yanc X. et al. Parameterization of soil freezing characteristic curve for unsaturated soils. Cold Regions Sci. and Technol., 2020, vol. 170 (102928), p. 1–29, DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102928.
- Wang Q., Qi J., Wang S. et al. Effect of freeze-thaw on freezing point of a saline loess. Cold Regions Sci. and Technol., 2020, vol. 170 (102922), p. 1–21, DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102922.
- Zhou J., Wei C., Lai Y. et al. Application of the generalized Clapeyron equation to freezing point depression and unfrozen water content. Water Resour. Res., 2018, vol. 54, p. 9412–9431, DOI: 10.1029/2018WR023221.

*Поступила в редакцию 25 мая 2020 г.,
после доработки – 16 августа 2020 г.,
принята к публикации 29 августа 2020 г.*

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 551.345

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-6(21-32)

БУГРЫ ПУЧЕНИЯ НА ПЛОЩАДИ ГАЗОНОСНЫХ СТРУКТУР
СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Ю.Б. Баду, К.А. Никитин

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
географический ф-т, кафедра криолитологии и гляциологии,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; yubadu@mail.ru, nikitin.kirill@yandex.ru

Распространение бугров пучения рассматривается на основе концепции субаквального криолито-генеза газонасыщенных морских отложений криогенной толщи. Впервые отмечены максимумы их площадного распространения и показано, что бугры пучения на площадях газоносных структур приурочены к геолого-геоморфологическим уровням морских и лагунно-морских террас. Предполагается, что бугры пучения именно на таких участках могут естественно разрушаться с последующим взрывом газа из льдистого ядра и подстилающих его пород.

Бугор пучения, воронка газового выброса, газоносная структура, геолого-геоморфологический уровень, морские отложения

FROST MOUNDS WITHIN THE GAS-BEARING STRUCTURES AREAS,
NORTHERN PART OF WEST SIBERIA

Yu.B. Badu, K.A. Nikitin

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,
Department of Cryolithology and Glaciology, 1, Leninskie Gory, Moscow,
119991, Russia; yubadu@mail.ru, nikitin.kirill@yandex.ru

The distribution of frost mounds is considered based on the concept of subaqueal freezing of gas-saturated marine sediments. For the first time, the areas with maximum density of frost mounds have been detected. Frost mounds in the areas of gas-bearing structures are confined to marine terraces of different ages. It is assumed that frost mounds in such areas can naturally collapse with subsequent explosion of gas from the ice core and the underlying deposits.

Frost mound, gas-emission crater, gas-bearing structure, marine terraces, marine deposits

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время группа криогенных процессов и явлений, тесно связанных с возникновением и развитием бугров пучения (БП), о которых известно достаточно давно [Андреев, 1936; и др.], вызывает повышенный интерес ученых [Васильчук и др., 2008, 2014; Пономарева и др., 2012; Богоявленский, 2014а,б, 2015, 2018; Касымская, 2014; Богоявленский, Гарагаш, 2015; Кизяков и др., 2015, 2017; Оленченко и др., 2015; Богоявленский и др., 2016, 2017, 2018а,б; Лейбман и др., 2016, 2018; Хилмонюк и др., 2016; Власов и др., 2017; Орехов и др., 2017; Перлова и др., 2017; Стрелецкая и др., 2017; Хименков и др., 2017а,б, 2018; Епифанов, 2018; Титовский и др., 2018; Якушев, 2018; Vorobyev et al., 2019]. Внешние газопроявления при образовании воронок газового выброса (ВГВ), криовулканизм в Восточной Сибири [Алексеев, 2012,

2013], грязевые вулканы [Нежданов и др., 2011; Хименков и др., 2017б; Богоявленский и др., 2019а,б], многие из которых расположены вблизи объектов газодобычи и трасс магистральных нефтегазопроводов, представляют серьезную опасность для эксплуатации и состояния объектов инфраструктуры Крайнего Севера [Богоявленский, 2014а,б].

Данная проблема изучается геофизиками, геологами и географами, которые используют различные полевые и камеральные методы (криолитологические, сравнительно-географические, картографические и др.), направленные на исследование сложного механизма и прогнозирование развития опасного криогенного процесса. Конкретные геокриологические и криолитологические данные по феномену Ямальского кратера

были получены сотрудниками кафедры геокриологии геологического факультета МГУ. В результате проведения комплекса исследований был показан наиболее реальный механизм развития БП и его превращения в воронку газового выброса [Хулимонюк и др., 2016; Buldovicz et al., 2018; Vorobyev et al., 2019].

По результатам комплексной геокриологической съемки территории Западно-Сибирской плиты, выполненной тюменской экспедицией геологического факультета МГУ в 1966–1978 гг. [Трофимов и др., 1980], выявлено, что, с одной стороны, в течение голоцена многие бугры пережили сложную историю развития и изменения природных обстановок промерзания, а с другой – особенности площадного распространения бугров различны на участках морских террас и водораздельных поверхностей, на поймах и лайдах, в устьях рек и их верховьях [Бадю и др., 1986].

Позднее в работе [Геворкян, Корейша, 1993] детально описан взрывной механизм роста бугра пучения и использован расчетный метод для изучения развития напряжений в ядре бугра и в породах, перекрывающих ядро.

Сегодня факты того, что на месте ВГВ располагались БП, позволяют утверждать, что воронка – закономерный этап развития бугров с газонасыщенным ледяным ядром. Но единое мнение о механизме формирования воронки отсутствует. В связи с этим анализ конкретных природных условий формирования БП и ВГВ на севере Западной Сибири является целью данной работы. Возникают вопросы: какие разновидности или типы бугров пучения могут быть предшественниками воронки газового выброса и только ли они могут быть таковыми; в каких ландшафтных обстановках они развиваются и существуют?

Какие бугры привлекают наше внимание – бугор пучения, грязевой вулкан, криовулкан, могильник или Патомский конус (в Восточной Сибири)? На рассматриваемой территории (севернее Полярного круга) заслуживают внимания все (кроме двух последних, восточно-сибирских) бугры пучения как поверхностные природные объекты выпуклой формы единого генетического типа, возникающие в промерзающей толще пород с открытой или закрытой системой водообмена, обеспечивающей либо неограниченный и напорный подток воды к фронту промерзания, либо ограниченный и безнапорный.

В задачи исследования включено изучение особенностей распространения БП на площадях газонасыщенных структур и в пределах различных геоморфологических уровней. Разработанные представления и гипотезы часто не учитывают конкретные природные условия развития феномена и могут быть объяснены только при географическом криолитологическом анализе распространения

бугров пучения, их связи с газонасыщенными породами верхней части разреза газонасыщенных структур с учетом ландшафтно-геоморфологических особенностей территории.

Результаты исследования бугров пучения, основных механизмов их образования и воронок газового выброса позволят в перспективе выделять потенциально опасные участки на севере Западной Сибири с теми БП, для которых велика вероятность превращения в ВГВ.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Ключевые участки выбраны для детального изучения площади распространения бугров пучения, геокриологических условий их размещения и развития в пределах области сплошного распространения мерзлых пород. Географическое положение объектов определено и зафиксировано по 67 листам топографических карт Генштаба СССР масштаба 1:200 000, изданных в 60–90-х гг. XX в. На этих картах бугры пучения (булгуннях, ледяной холм, ледяной бугор) обозначены внемасштабным знаком. На территории Ямальского, Гыданского и Тазовского полуостровов, ограниченной с юга широтой 66°30', выявлено 1425 бугров пучения (рис. 1). Воронки газового выброса нанесены на карту по данным из [Богоявленский и др., 2019а].

Для определения условий, в которых развиваются разнообразные БП и ВГВ, их связи с площадями газонасыщенных структур (ГС), на карту нанесены контуры 240 площадей газонасыщенных структур групп III, IV, V [Бадю, 2017а, 2018]. В приповерхностной части разреза ГС группы III залегают поздненеоплейстоценовые морские суглинки и глины с прослоями песков; группы IV – поздненеоплейстоценовые лагунно-морские суглинки, супеси и пески; группы V – среднееоплейстоценовые суглинки и глины с прослоями песков и супесей. В их пределах и на расстоянии 5–10 км за контуром ГС подсчитано количество бугров, определена плотность их распространения на площади ГС по каждому полуострову.

На рис. 1 приведены площади ГС и ключевые участки (КУ). При подготовке карты использованы карта льдистости [Карта... типов..., 1982], карта мощности и строения толщ многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты [Карта мощности..., 1984], карта нефтегазоносности ЯНАО в масштабе 1:1 000 000, топографические карты масштаба 1:200 000.

Воронки газового выброса быстро превращаются в озера с отступающими берегами [Корниенко и др., 2014; Кизяков и др., 2015, 2017; Хомутов и др., 2017], и динамика формы озер во многом зависит от геоморфологического положения ВГВ в котловинах, хасырях или на склоне [Кизяков и др., 2015], а по аэрофотоснимкам высокого разре-

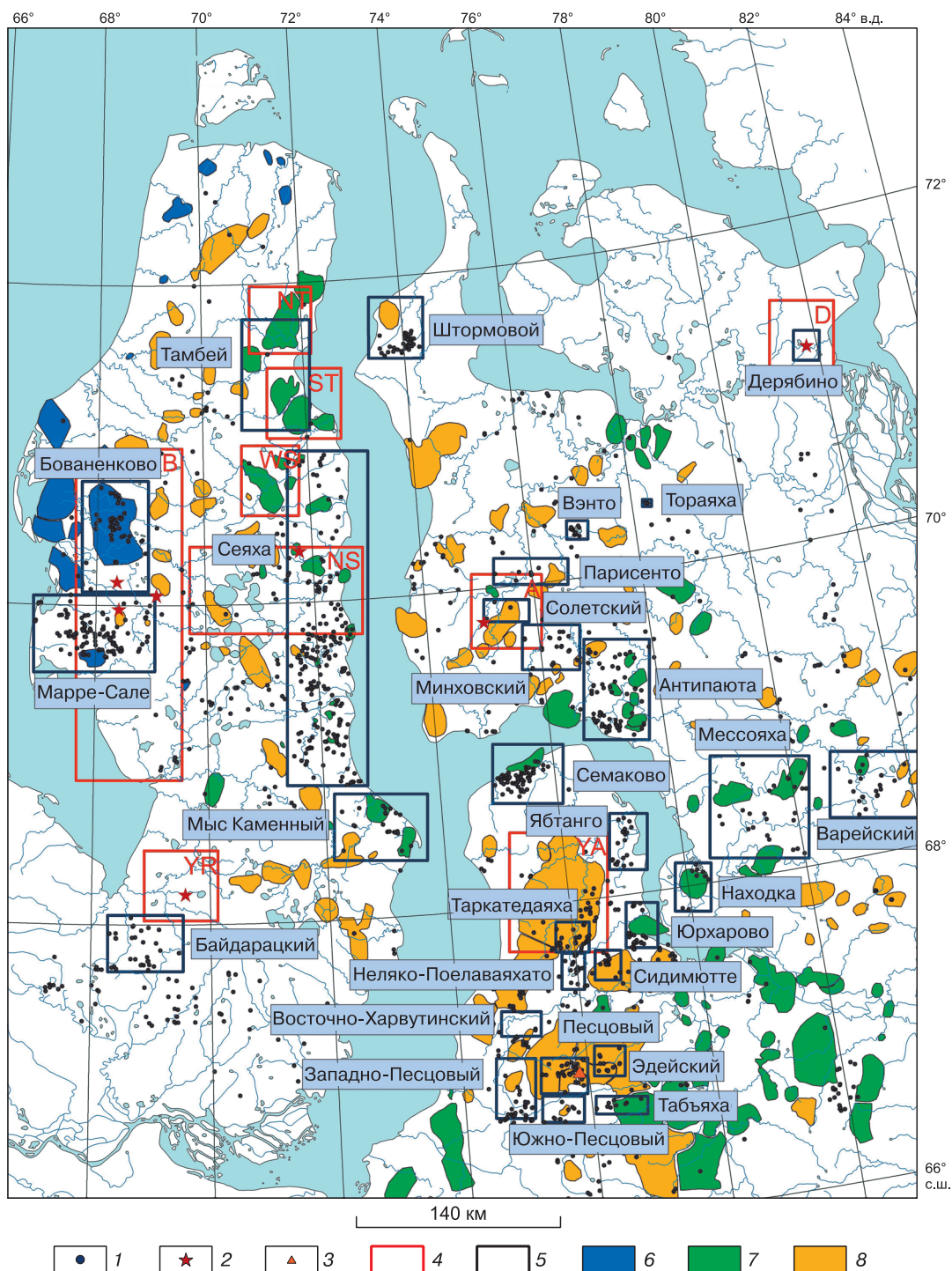


Рис. 1. Ключевые участки исследований.

1 – бугры пучения; 2 – воронки газового выброса [Богоявленский и др., 2019а,б]; 3 – грязевые вулканы [Нежданов и др., 2011]; 4 – участки детальных исследований Института проблем нефти и газа РАН: В – Бованенковский, ST – Южно-Тамбейский, NT – Северо-Тамбейский, NS – Северо-Сеяхинский, WS – Западно-Сеяхинский, YR – Еркутинский, D – Дерябинский, YA – Ямбургский, А – Анטיפаютинский [Богоявленский, 2014а, б]; 5 – ключевые участки. Группы газоносных структур [Баду, 2017б,в, 2018]: 6 – группа III, 7 – группа IV, 8 – группа V.

шения достоверно определяются их характерные признаки [Хомутов и др., 2017; Титовский и др., 2018]. Термокарстовые озера на участках дегазации недр с многочисленными подводными кратерами также указывают на подток флюидов в криолитозону [Корниенко и др., 2014; Брыксина, Полищук, 2015; Богоявленский и др., 2019б]. Кроме того, в различных ландшафтных обстановках в таких местах появляются новые бугры [Богоявленский, Гарагаш, 2015], которые можно установить при сравнении топокарт масштаба 1:200 000 (на год их издания) с изображением на современном космическом снимке сверхвысокого разрешения.

Все многообразие точек зрения, гипотез и предположений анализируется при изучении конкретных данных по связи воронок с БП, с площадями ГС, с геоморфологическими, геокриологическими и ландшафтными условиями их распространения.

В соответствии с положениями криосистемного анализа [Бадю, 2016] в понятие криосистемы БП включаются бугры пучения с льдистым или ледяным ядром в пределах геоморфологического уровня с определенным типом структурной единицы ландшафта. Граница криосистемы БП оконтуривается по площади местности или урочища.

Для комплексной оценки и прогноза взрывоопасности криогенного процесса образования и развития БП выделено три вида криосистем БП с подвидами.

Первый вид – позднеголоценовые и современные БП в долинах рек:

- БП вблизи мелеющих старичных и термокарстовых озер поймы и крупных озерных котловин, со стоком в речную сеть; современные;

- БП на месте полностью спущенных озер в хасырях в пределах речных долин; современные и позднеголоценовые.

Второй вид – позднеголоценовые и современные БП на морских террасах:

- БП в террасированных котловинах и хасырях на поверхности средне- и поздненеоплейстоценовых морских равнин и террас; современные и позднеголоценовые;

- БП в поздненеоплейстоценовых хасырях на поверхности лагунно-морских террас; позднеголоценовые.

Третий вид – современные БП на склонах:

- БП вблизи верхних частей оврагов на пологих склонах поздненеоплейстоценовых морских равнин с тектонически ориентированной термоэрозионной сетью оврагов; современные;

- БП на склонах временных водотоков и балок древней и современной термоэрозионной сети.

Для характеристики и корреляции связей распространения БП с криогенными ландшафтами на площади ГС и геоморфологических уровней вводится коэффициент площадного распростране-

ния ПР (количество БП на 100 км²). Это дает возможность: 1) определить связи развития БП с газовой залежью газоносной структуры, учитывая вероятность наличия газа в породах подоцерного (подруслового и др.) талика, в пределах которого вырос БП и взорвался с образованием ВГВ либо стал потенциально взрывоопасен; 2) определить, связаны ли объекты с типичным геологическим разрезом поймы тектонически ориентированных речных долин, заложенных в конце позднего неоплейстоцена над тектоническими разломами в земной коре и прорезавших покров четвертичных отложений; 3) подтвердить приуроченность БП к определенному типу ландшафта.

Описания природных условий, в которых сформировались ВГВ, не всегда информативны и комплексны, поэтому необходимо исследовать геолого-геоморфологические особенности развития ВГВ на всей территории их существования в области сплошного распространения мерзлых пород. Южнее, там, где мерзлая толща протаивала в период климатического оптимума голоцена, возраст и продолжительность их роста могут быть ограничены длительностью периода заметного потепления климата, резко изменившего тепловое состояние пород верхней части разреза.

Взаимосвязь расположения бугров пучения с газоносными структурами разных порядков

В географическом и криолитологическом понимании нет сомнений в вероятностной связи БП и ВГВ с площадью крупных неотектонических структур, так как ГС как структуры третьего порядка, расположенные над мегавалами, мегапрогибами, валами и впадинами, являются источниками газов, мигрирующих из-под покрывки газовой залежи [Бадю, 2018]. Газ в мерзлых породах и подземных водах насыщает воды талика, которые при промерзании мигрируют или инжецируют вверх, образуя ядро БП. Их развитие нередко заканчивается естественным разрушением грунтовой кровли или нарушением ее сплошности от разрядки механических напряжений из-за роста ледяного ядра. При этом обнаженная часть льда при оттаивании испаряет поглощенный газ, насыщая окружающий воздух до концентрации 9–16 % [Вяхирев, Шушунова, 1975], и взрывается, охватывая подстилающие отложения и ледяной шток корневой системы инжекции.

Формулируя точку зрения на значение метана в образовании воронки газового выброса, авторы учитывают, что метан мантии и угленосных залежей перми–триаса мигрирует по тектоническим разломам и концентрируется в антиклинальных складках сеноманских отложений под мощным верхнемеловым экраном покрывки продуктивной газовой залежи. Заполнив ловушки полностью, газ устремляется в слои, расположен-

ные выше. Этот процесс происходит в течение многих миллионов лет. Из-за нарушенности покрывки газ постоянно выделяется в перекрывающую толщу, насыщая накопленные в плейстоцене и накапливающиеся современные морские осадки [Бадю, 2018]. Это значит, что образование как БП с газонасыщенным льдом или льдистым грунтом ядра, так и ВГВ в результате развития БП, связано с газонасыщенностью плейстоценовых морских отложений, в которых формируется талик. Это предположение подтверждается результатами конкретных геокриологических исследований, показавшими, что при промерзании и образовании БП большое количество газа сконцентрировано в ледяном или сильнольдистом ядре бугра [Курчатова, Розов, 2018].

Авторы не разделяют целый ряд общих представлений разных исследователей о ямальском феномене превращения БП в ВГВ: во-первых, когда в них не учитывается газонасыщенность плейстоценовых морских отложений региона, вмещающих подобные образования; во-вторых, когда говорится о газе как о болотном метане голоценового возраста, о наличии воздушных или газовых полостей в теле ледяного штока, о выдавливании газом ледяного штока; в-третьих, когда говорится об элементарном процессе вулканизма – “горячем” процессе, совершенно несравнимом с криогенным процессом по температуре, по энергетике и динамике, по характеру теплообмена между оболочками Земли, по условиям развития и последствиям, но только отдаленно – по форме залегания ледяной интрузии в разрезе. Конечно, в отличие от позиций П.А. Шумского, Б.П. Вейнберга и И.Я. Баранова, профессор О.К. Ланге и польский геолог А.Б. Добровольский относили продукт кристаллизации подземных вод (лед) к классу магматических горных пород, но только в сравнительном смысле [Бадю, 2010].

Авторские представления о развитии ВГВ на месте БП основаны на том, что бугор пучения образуется на месте талика по классической схеме промерзания пород в открытой или закрытой системе. Но при этом учитывается, что:

- только в пределах площади ГС породы криогенной толщи насыщены газом или вмещают его скопления в антиклинальных ловушках из литологической пары слоев глина–песок. Водоносные слои насыщены газом из вмещающих пород. Газ накапливался в породах в процессе их накопления и диагенетических преобразований до промерзания;

- рост БП обеспечивается формированием ядра из льдистого грунта или чистого льда, насыщенного газом. Когда прочность массива покрывки мерзлых пород над ядром будет нарушена силами пучения, массив разрывается (лопается). Лед

ядра обнажается, из него испаряется газ, при концентрации которого в воздухе 9–16 % бугор взрывается. Газ воспламеняется мгновенно весь: и из ядра, и из ледяного штока инъекции из водоносного пласта, и из подстилающей (возможно) пластовой залежи льда;

- пирогенная природа взрыва БП не обязательна, и внутреннее криогенное давление – первичная причина взрыва. Но случаи возгорания уже зафиксированы на Сеяхинской воронке [Богоявленский и др., 2019а].

Из данных представлений и определения БП как начальной стадии развития ВГВ формируется *авторская криолитологическая позиция*: бугор, приуроченный только к площади ГС, расположенной в пределах как зон поднятий и прогибов, так и моноклиналей, может оказаться потенциально взрывоопасным, поскольку образуется в промерзающих породах талика, возникшего на участке термокарста по сильнольдистым грунтам, залегающим на морских и аллювиальных отложениях, насыщенных газом.

Согласно этой позиции, в пределах площади ГС (т. е. над газовой залежью) БП может превратиться в ВГВ или оказаться потенциально взрывоопасным, если совмещаются два условия – неотектоническое и геокриологическое. Рассмотрим первое из них, объясняющее причины газонасыщенности пород, перекрывающих залежь газа в пределах ГС.

Неотектоническое условие. В поиске связей БП и ВГВ с неотектоническим развитием территории следует обратить внимание на то, что в общем плане запад Ямала расположен над краем Ямальской моноклинали, а юг – над склоном Припайхойской моноклинали к Байдарацкому мегапрогибу. Восток п-ова Гыданский расположен над краем моноклинали, а Тазовский полуостров – над сложным сочетанием впадин, прогибов и групп куполовидных поднятий.

Максимальные значения коэффициента площадного распространения (ПР более 16/100 км²) приурочены к прибрежным участкам морских и лагунно-морских террас западного и восточного Ямала, севера и юга Гыданского, севера и центральной части Тазовского полуостровов (рис. 2). Территории с ПР менее 16/100 км² занимают наибольшую площадь в центральных частях водораздельных равнин на Тазовском полуострове и на Ямале.

При совмещении авторской карты “Площадное распространение БП на севере Западной Сибири” (см. рис. 2) и карты “Структурная схема и районирование чехла Западно-Сибирской плиты по подошве юрско-кайнозойского плитного комплекса” [Нестеров и др., 1984] оказывается, что площади с наибольшими величинами ПР бугров расположены следующим образом.

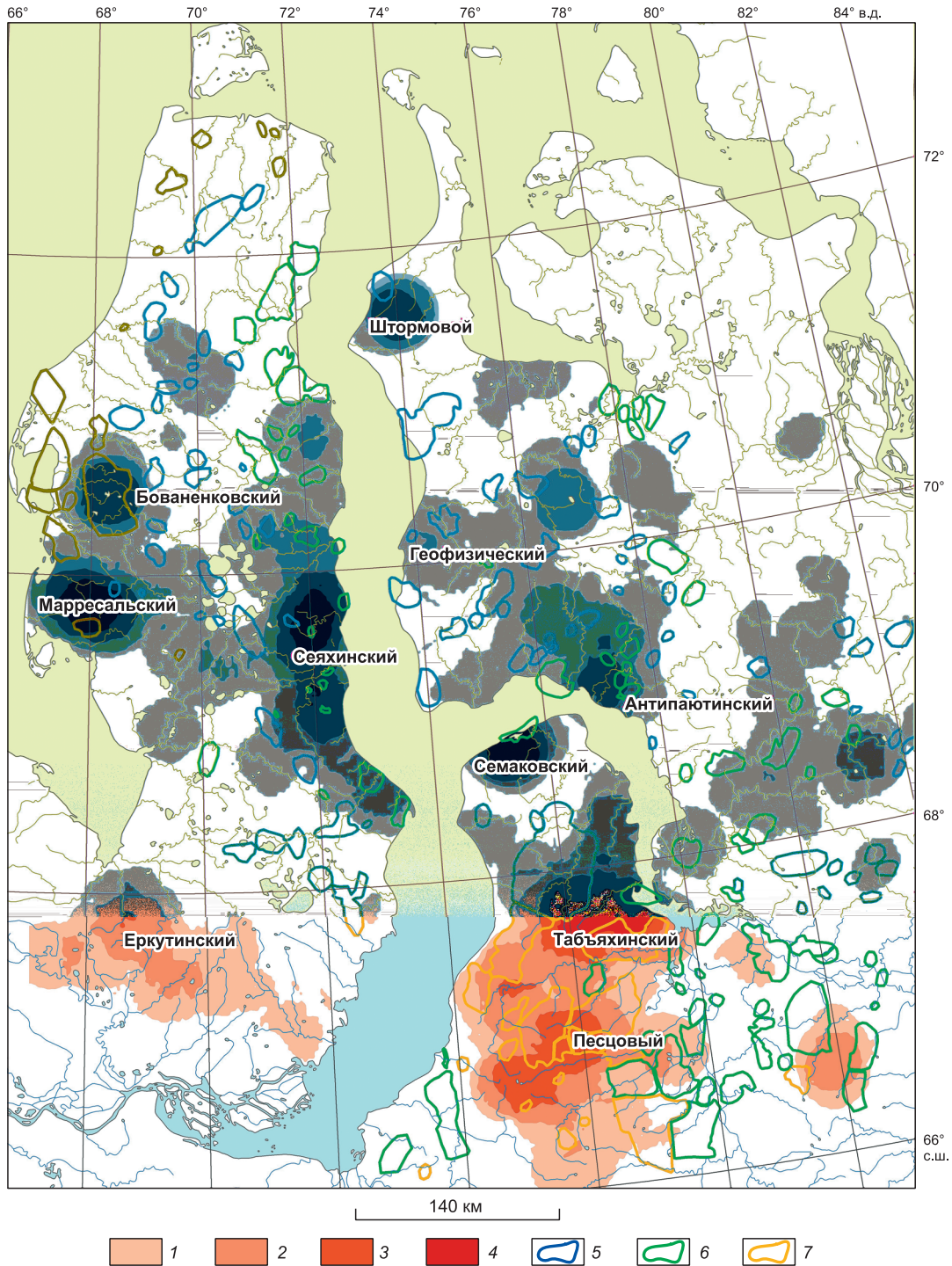


Рис. 2. Площадное распространение бугров пучения и его максимумы на территории исследования.
 Количество бугров пучения на 100 км²: 1 – 2–8; 2 – 9–15; 3 – 16–22; 4 – более 22. Группы газоносных структур [Баду, 2017б,в, 2018]: 5 – группа III, 6 – группа IV, 7 – группа V. На карте даны названия максимумов площадного распространения бугров.

На Ямале:

в западной части – над краем Ямальской моноклинали, а ВГВ над Юмбдыяхинским прогибом (*марресальский и бованенковский максимумы ПР*);

в юго-западной части – над краем Припайхойской моноклизы в месте Байдарацкого мегапрогиба (*йоркутинский максимум ПР*);

на восточном побережье – над частью Сеяхинского мегапрогиба, пересекаемого Центральнo-Ямальским мегавалом (*сеяхинский максимум ПР*).

На Гыданском полуострове:

в северо-западной части – над северным краем Ханарасалинского мегапрогиба (*итормовой максимум ПР*);

в центре – над северо-западным склоном Геофизического мегавала и восточным краем Центральнo-Ямальского мегавала (*геофизический максимум ПР*);

на побережье Тазовской губы – над Антипаютинской впадиной, а северо-западнее – над Сыдыяхинским прогибом (*антипаютинский максимум ПР*).

На Тазовском полуострове:

в северной части – над группой куполовидных поднятий (*семаковский максимум ПР*);

южнее – над площадью сложного взаимного размещения впадин, прогибов и групп поднятий, расположенных к югу от склона Ямбургского куполовидного поднятия (*табьяхинский и песцовый максимумы ПР*).

Геокриологическое условие. Второе условие принятой криолитологической позиции заключается в том, что потенциально взрывоопасные БП развиваются в конкретной геокриологической обстановке – при промерзании таликов в газонасыщенных породах. Если в разрезе промерзших пород сверху вниз залегают торф, суглинок и песок водонасыщенный, то при их промерзании в открытой системе (с подтоком воды из напорного водоносного слоя) возникает БП с льдогрунтовым ядром из сегрегационного льда. В закрытой системе без подтока воды в замкнутом талике образуется бугор с ядром из инъекционного льда. Песчаные породы и вода водоносного слоя насыщены газом, как и газонасыщенные мерзлые и охлажда-

денные породы, залегающие вокруг талика. Разрезы такого строения могут подстилаться залежью пластового льда.

Итак, при наличии этих двух условий можно предполагать определенную связь географического расположения БП и ВГВ с территориями, где важнейший источник газа – газовая залежь газоносной структуры.

Бугры (взорванные, новообразованные, разрушенные) расположены на площади газоносных структур (см. рис. 1), которая определяется вертикальной проекцией плоскости газоводяного контакта на дневную поверхность [Баду, 2017a]. Из 680 бугров, расположенных в пределах площади ГС, наибольшее количество (350) находится на Тазовском полуострове (51.4 %), а на Гыдане и Ямале их существенно меньше – 30.3 и 18.3 % соответственно. В таком же порядке уменьшается и общая площадь ГС, для которых выполнены расчеты.

За пределами общей площади структур расположено 52 % из 1425 бугров, использованных для расчетов (табл. 1). Здесь следует учитывать, что, во-первых, геологическая граница ГС на Государственной геологической карте не совпадает с проведенными границами лицензионного землеотвода на эксплуатацию. Во-вторых, в расчет включены только БП, отмеченные на топокарте масштаба 1:200 000 выпуска 1967–1989 гг. Тем не менее предварительные расчеты приуроченности БП к площади ГС уже показывают слабую корреляцию (в среднем коэффициент корреляции $r = 0.46–0.48$).

Коэффициент площадного распространения БП на площадях каждой группы ГС (табл. 2) характеризует общую картину, осредненную по исследованной территории. Наибольшее и наименьшее значения ПР свидетельствуют о том, что приповерхностный разрез отложений морских террас позднего неоплейстоцена является более благоприятной средой для формирования ВГВ на месте потенциально взрывоопасных БП. Эта среда связана с определенным типом геологического строения, с условиями осадконакопления, промерзания и газонасыщения пород верхней части их разреза.

Таблица 1. Количество бугров пучения в пределах и за пределами общей площади газоносных структур

Полуостров	Площадь ГС, км ²	Количество бугров пучения*		
		общее	в пределах ГС	за пределами ГС
Ямал	17 400	576 (40.4)	206 (30.3)	370 (49.7)
Гыданский	11 000	344 (24.2)	124 (18.3)	220 (29.5)
Тазовский	20 500	505 (35.4)	350 (51.4)	155 (20.8)
Всего	48 900	1425	680	745

* В скобках дана доля (%).

Таблица 2. Коэффициент площадного распространения бугров пучения по группам газоносных структур

Группа ГС	Количество бугров в группе ГС	Суммарная площадь группы, км ²	Коэффициент площадного распространения бугров*	Доля площади группы от общей площади ГС, %
III	99	5791	1.71	11.8
IV	199	18 797	1.058	38.4
V	382	24 312	1.57	49.7

* Количество бугров пучения на 100 км².

Приуроченность БП к геолого-геоморфологическим уровням полуостровов уже подтверждается предварительными полученными данными (табл. 3). Согласно данным табл. 3, на Ямале в пределах площади ГС группы III сосредоточено наибольшее количество бугров: 48.1 % из 206 и по 25–26 % в пределах групп IV и V. Такое распределение подтверждает вероятность того, что для формирования бугров пучения в пределах средне- и поздненеоплейстоценовых лагунно-морских террас и морских равнин существуют сходные условия (см. табл. 2), но в пределах поздненеоплейстоценовых морских террас условия для формирования БП наиболее благоприятны именно на Ямале.

На Гыданском полуострове наибольшее количество БП сосредоточено в его возвышенных частях: 63.7 % из 124 бугров расположено в пределах площади ГС группы V, а 36.3 % в пределах группы IV. Здесь ситуация иная: в пределах средне-неоплейстоценовой морской равнины условия для развития бугров более благоприятны.

На Тазовском полуострове наибольшее количество БП сосредоточено в его центральной части: 71.4 % из 350 бугров расположено в пределах площади ГС группы V, а 28.6 % в пределах группы IV. Ситуация аналогична предыдущей: здесь в пределах поздненеоплейстоценовых лагунно-морских террас условия для возникновения бугров менее благоприятные, чем в пределах средне-неоплейстоценовой морской равнины.

Полученные данные предварительно показывают вполне достоверную специфичность регионального площадного распределения БП: их приуроченность к местностям или даже урочищам, где талики под спущенными озерами промерзали на участках, сложенных сильнольдистыми породами морских и лагунно-морских поздне-неоплейстоценовых террас, т. е. к участкам с определенным геологическим строением и неоднородным строением рельефа, к разрезам газонасыщенных пород. Эта приуроченность неоднозначна на каж-

дом из обследованных полуостровов и требует детального исследования на специально выделенных ключевых участках.

ВЫВОДЫ

Единое мнение о происхождении воронок в различных природных обстановках до сих пор отсутствует. Предварительное исследование особенностей распространения бугров пучения по топографическим картам масштаба 1:200 000 позволяет определить ряд природных условий, в которых эти бугры возникали и развивались в течение последних 30–50 лет.

Предварительные результаты показывают, что на исследованной территории:

- плотность распространения бугров на полуостровах Ямал, Гыданский и Тазовский закономерно сконцентрирована над неотектонически однородной частью разреза осадочного чехла, в которой сосредоточены газовые залежи газонасыщенных структур на глубинах не более 700–900 м от дневной поверхности;

- в пределах площади ГС расположено менее половины (48 %) бугров пучения из 1425, отмеченных на картах разных годов выпуска; наибольшее количество бугров приурочено к ГС с площадью менее 50 км² и повышенной трещиноватостью пород;

- максимумы площадного распространения бугров приурочены к прибрежным участкам морских и лагунно-морских террас западного и восточного Ямала, севера и юга Гыданского полуострова, севера и центральной части Тазовского полуострова.

Неотектонические и геокриологические условия для формирования и развития бугров в пределах средне- и поздне-неоплейстоценовой морской равнины более благоприятны, чем в пределах поздне-неоплейстоценовых лагунно-морских террас.

В пределах площади каждого из полуостровов это соотношение неравнозначно, так как более важен факт, указывающий, что в пределах поздне-неоплейстоценовой прибрежно-морской и средне-неоплейстоценовой морской равнин совокупность природных условий (льдистость пород, песчано-глинистые переслаивания в геологическом разрезе, газонасыщенность пород, положение водоносных слоев, засоленность пород и др.) наиболее благоприятна для развития бугров пучения с образованием воронки газового выброса. Вопрос, почему так, – остается открытым.

Работа выполнена в соответствии с фундаментальной темой “Изменение криосферы Земли под влиянием природных факторов и техногенеза” (ГЗ I.5 АААА-А16-116032810095-6) при поддержке РФФИ (проект № 18-05-60080).

Таблица 3. Количество бугров пучения по группам газонасыщенных структур в пределах полуостровов

Полуостров	Количество БП в пределах ГС	Количество БП по площади групп ГС*		
		Группа V	Группа IV	Группа III
Ямал	206	53 (25.7)	54 (26.2)	99 (48.1)
Гыданский	124	79 (63.7)	45 (36.3)	0
Тазовский	350	250 (71.4)	100 (28.6)	0
Всего	680	382	199	99

* В скобках дана доля (%) в пределах полуострова.

Примечание. Группа V – ледниково-морская и морская равнина gmII₂₋₄; группа IV – прибрежно-морская равнина rmIII₁; группа III – третья морская терраса mIII₂₋₃.

Литература

- Алексеев В.Р.** Криовулканизм и загадка Патомского конуса // Геодинамика и тектонофизика, 2012, № 3 (3), с. 289–307.
- Алексеев В.Р.** Патомский кратер: могильник и булгуньях // Наука и техника Якутии, 2013, № 2 (25), с. 68–78.
- Андреев В.И.** Гидролакколиты (булгуньяхи) в западно-сибирских тундрах // Изв. Гос. геогр. о-ва, 1936, т. 68, вып. 2, с. 186–210.
- Бадю Ю.Б.** Криолитология (учеб. пособие). М., Кн. дом “Университет”, 2010, 528 с.
- Бадю Ю.Б.** Криосистемный анализ газоносных структур Ямала // Академ. журн. Западной Сибири, 2016, т. 12, № 2 (63), с. 8–12.
- Бадю Ю.Б.** Газоносные структуры и криогенная толща криолитологических провинций Ямала // Инж. геология, 2017а, № 1, с. 39–50.
- Бадю Ю.Б.** Газопроявления и природа криолитогеоза морских отложений полуострова Ямал // Криосфера Земли, 2017б, т. XXI, № 5, с. 42–54.
- Бадю Ю.Б.** Основы концепции субаквального криолитогеоза морских отложений газоносных структур полуострова Ямал // Криосфера Земли, 2017в, т. XXI, № 6, с. 76–84.
- Бадю Ю.Б.** Криогенная толща газоносных структур Ямала. О влиянии газовых залежей на формирование и развитие криогенной толщи полуострова Ямал. М., Науч. мир, 2018, 232 с.
- Бадю Ю.Б., Васильчук Ю.К., Кашперюк П.И. и др.** Геологические процессы и явления, обусловленные многолетними изменениями температур в слое многолетнемерзлых и промерзающих пород // Экогеодинамика Западно-Сибирской плиты (пространственно-временные закономерности) / Под ред. В.Т. Трофимова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1986, с. 92–166.
- Богоявленский В.И.** Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра. Часть 1 // Бурение и нефть, 2014а, № 9, с. 13–18.
- Богоявленский В.И.** Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра. Часть 2 // Бурение и нефть, 2014б, № 10, с. 4–8.
- Богоявленский В.И.** Выбросы газа и нефти на суше и акваториях Арктики Мирового океана // Бурение и нефть, 2015, № 6, с. 4–9.
- Богоявленский В.И.** Газогидродинамика в кратерах выброса газа в Арктике // Арктика: экология и экономика, 2018, № 1 (29), с. 48–55.
- Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Каргина Т.Н. и др.** Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования выбросов газа на термокарстовых озерах // Арктика: экология и экономика, 2019а, № 2 (34), с. 31–47.
- Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Никонов Р.А.** Результаты аэрокосмических и экспедиционных исследований крупных выбросов газа на Ямале в районе Бованенковского месторождения // Арктика: экология и экономика, 2017, № 3 (27), с. 4–17.
- Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Никонов Р.А. и др.** Технологии дистанционного выявления и мониторинга дегазации Земли в Арктике: полуостров Ямал, озеро Нейто // Арктика: экология и экономика, 2018а, № 2 (30), с. 83–93.
- Богоявленский В.И., Гарагаш И.А.** Обоснование процесса образования кратеров газового выброса в Арктике математическим моделированием // Арктика: экология и экономика, 2015, № 3 (19), с. 12–17.
- Богоявленский В.И., Сизов О.С., Богоявленский И.В. и др.** Дистанционное выявление участков поверхностных газопроявлений и газовых выбросов в Арктике: полуостров Ямал // Арктика: экология и экономика, 2016, № 3 (23), с. 4–13.
- Богоявленский В.И., Сизов О.С., Богоявленский И.В. и др.** Технология дистанционного мониторинга поверхностных газопроявлений в зоне распространения многолетней мерзлоты (на примере полуострова Ямал) // Актуальные пробл. нефти и газа, 2018б, т. 4, № 23, с. 75.
- Богоявленский В.И., Сизов О.С., Мажаров А.В. и др.** Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования катастрофического сеяхинского выброса газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика, 2019б, № 1 (33), с. 88–105.
- Брыксина Н.А., Полищук Ю.М.** Анализ изменения численности термокарстовых озер в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 2, с. 114–120.
- Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук А.К. и др.** Изотопный состав ледяного ядра позднеголоценового булгуньяха на месторождении Песцовое в долине реки Евояха на юге Тазовского полуострова // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 4, с. 47–58.
- Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А. и др.** Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов. М., Изд-во Моск. ун-та, 2008, 571 с.
- Власов А.Н., Хименков А.Н., Волков-Богородский Д.Б. и др.** Природные взрывные процессы в криолитозоне // Наука и технол. разработки, 2017, т. 96, № 3, с. 41–56.
- Вяхирев Д.А.** Руководство по газовой хроматографии / Д.А. Вяхирев, А.Ф. Шушунова. М., Высш. шк., 1975, 220 с.
- Геворкян С.Г., Корейша М.М.** Взрывы бугров пучения // Материалы гляциол. исслед., 1993, № 77, с. 120–130.
- Епифанов В.А.** Взрывные воронки-колодцы и актуальность изучения роли дегазации недр в климатических событиях и ландшафтных преобразованиях четвертичного периода // Бюл. Комиссии по изучению четвертичного периода, 2018, № 76, с. 5–40.
- Карта** генетических типов и льдистости верхней 10-метровой части разреза многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты / Под ред. В.Т. Трофимова, Ю.Б. Бадю. М., Главтюменьгеология; МГУ; ПНИИИС, 1982, 9 л.
- Карта** мощности и строения толщ многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты / Гл. ред. В.Т. Трофимов, В.В. Баулин. М., Главтюменьгеология; МГУ; ПНИИИС, 1984, 9 л.
- Касымская М.В.** Сезонные и многолетние бугры пучения северо-востока полуострова Ямал // Науч.-исслед. публикации, 2014, № 15 (19), с. 13–18.
- Кизяков А.И., Сонюшкин А.В., Лейбман М.О. и др.** Геоморфологические условия образования воронки газового выброса и динамика этой формы на Центральном Ямале // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 2, с. 15–25.
- Кизяков А.И., Сонюшкин А.В., Хомутов А.В. и др.** Оценка рельефообразующего эффекта образования Антипаютинской воронки газового выброса по данным спутниковой стереосъемки // Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса, 2017, т. 14, № 4, с. 67–75.
- Корниенко С.Г., Крицук Л.Н., Якубсон К.И. и др.** Исследование динамики озер и процессов новообразования многолетнемерзлых пород на полуострове Ямал на основе данных

аэрокосмических наблюдений // Актуальные пробл. нефти и газа, 2014, № 1 (9), с. 14–32.

Курчатова А.Н., Рогов В.В. Формирование геохимических аномалий при миграции углеводородов в криолитозоне Западной Сибири // Лед и снег, 2018, т. 58, № 2, с. 199–212.

Лейбман М.О., Дворников Ю.А., Стрелецкая И.Д. и др. Связь формирования воронок газового выброса с эмиссией метана на севере Западной Сибири // Актуальные пробл. нефти и газа, 2018, т. 4, № 23, с. 1–4.

Лейбман М.О., Кизяков А.И. Новый природный феномен в зоне вечной мерзлоты // Природа, 2016, № 2, с. 15–24.

Нежданов А.А., Новопашин В.Ф., Огибенин В.В. и др. Грязевой вулканизм на севере Западной Сибири // Тр. ТюменНИИгипрогаз. Тюмень, Флат, 2011, с. 74–79.

Нестеров И.И., Подсосова Л.Л., Рудкевич М.Я. и др. Структурная схема и районирование Западно-Сибирской плиты по подошве юрско-кайнозойского плитного комплекса. М-б 1:500 000. М., Фонды Геол. ин-та РАН, 1984, 9 л. – www.neotec.ginras.ru

Оленченко В.В., Синицкий А.И., Антонов Е.Ю. и др. Результаты геофизических исследований территории геологического новообразования “Ямальский кратер” // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 4, с. 94–106.

Орехов П.Т., Попов К.А., Слагода Е.А. и др. Бугры пучения острова Белый в прибрежно-морской обстановке Карского моря // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 1, с. 46–56.

Перлова Е.В., Микляева Е.С., Ткачева Е.В. и др. Ямальский кратер как пример быстроразвивающегося криогенного процесса в условиях потепления климата в Арктике // Вести газ. науки, 2017, № 3 (31), с. 292–297.

Пономарева О.Е., Гравис А.Г., Бердников Н.М. Современная динамика бугров пучения и плоскобугристых торфяников в северной тайге Западной Сибири (на примере Надымского стационара) // Криосфера Земли, 2012, т. XVI, № 4, с. 21–30.

Стрелецкая И.Д., Лейбман М.О., Кизяков А.И. и др. Подземные льды и их роль в формировании воронки газового выброса на полуострове Ямал // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География, 2017, т. 1, № 2, с. 91–99.

Титовский А.Л., Синицкий А.И., Пушкарев В.А. и др. Комплексные исследования ямальских кратеров, новые факты // Актуальные пробл. нефти и газа, 2018, т. 4, № 23, с. 61–71.

Трофимов В.Т. Криогенное строение и льдистость многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты / В.Т. Трофимов, Ю.Б. Бадю, Г.И. Дубиков. М., Изд-во Моск. ун-та, 1980, 246 с.

Хилимонюк В.З., Оспенников Е.Н., Булдович С.Н. и др. Геокриологические условия территории расположения ямальского кратера // Материалы пятой конф. геокриологов России (Москва, 14–17 июня 2016 г.). М., Изд-во Унив. книга, 2016, т. 2, с. 245–255.

Хименков А.Н., Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б. и др. Флюидодинамические геосистемы в криолитозоне. Часть 2. Криолитодинамические и криогазодинамические геосистемы // Арктика и Антарктика, 2018, № 2, с. 48–70.

Хименков А.Н., Сергеев Д.О., Станиловская Ю.В. и др. Газовые выбросы в криолитозоне как новый вид геокриологических опасностей // Геориск, 2017а, № 3, с. 58–65.

Хименков А.Н., Станиловская Ю.В., Сергеев Д.О. и др. Развитие взрывных процессов в криолитозоне в связи с формированием Ямальского кратера // Арктика и Антарктика, 2017б, № 4, с. 13–37.

Хомутов А.В., Лейбман М.О., Дворников Ю.А. Воронки газового выброса: в процессе условий их формирования // ХолодОк, 2017, т. 1, № 15, с. 5–13.

Якушев В.С. Механизмы концентрации природного газа в криолитозоне // Актуальные пробл. нефти и газа, 2018, т. 4, № 23, с. 71–75.

Buldovics S.N., Khilimonyk V.Z., Bychkov A.Y. et al. Cryovolcanism on the Earth: Origin of a Spectacular in the Yamal Peninsula (Russia) // Sci. Rep. UK, Nature Publishing Group, 2018, vol. 8, p. 13534, DOI: 10.1038/s41598-018-31858-9.

Vorobyev S., Bychkov A., Khilimonyuk V. et al. Formation of the Yamal crater in Northern West Siberia: evidence from geochemistry // Geosciences, 2019, vol. 9, No. 12, p. 515, DOI: 10.3390/geosciences9120515.

References

Alekseev V.R. Cryovolcanism and the riddle of the Patom cone. Geodinamika i tectonofizika [Geodynamics and Tectonics], 2012, No. 3 (3), p. 289–307 (in Russian).

Alekseev V.R. Patom Crater: burial ground and bulgunnyakh? Nauka i tekhnika Yakutii [Science and Technology of Yakutia], 2013, No. 2 (25), p. 68–78 (in Russian).

Andreev V.I. Hydrolakkolites (bulgunnyakhs) in West Siberian tundra. Izvestiya Gosudarstvennogo Geograficheskogo Obshchestva [Proceedings of the State Geographical Society], 1936, vol. 68, No. 2, p. 186–210 (in Russian).

Badu Yu.B. Kriolitologia [Cryolithology]. Moscow, Knizhnyi Dom Universitet, 2010, 528 p. (in Russian).

Badu Yu.B. Cryosystem analysis of gas-bearing structures of the Yamal Peninsula. Akademicheskii zhurnal Zapadnoi Sibiri [Academic Journal of Western Siberia], 2016, vol. 12, No. 2 (63), p. 8–12 (in Russian).

Badu Yu.B. The gas-bearing structures and cryogenic strata of the Yamal peninsula cryolithology provinces. Inzhenernaya Geologiya [Engineering Geology], 2017а, No. 1, p. 39–50 (in Russian).

Badu Yu.B. Gas shows and the nature of cryolithogenesis in marine sediments of the Yamal Peninsula. Earth's Cryosphere, 2017b, vol. XXI, No. 5, p. 36–45.

Badu Yu.B. Foundations of the conception of subaqueal cryolithogenesis of marine deposits of gas-bearing structures of the Yamal Peninsula. Earth's Cryosphere, 2017c, vol. XXI, No. 6, p. 65–72.

Badu Yu.B. Kriogennaya tolschcha gasonosnykh struktur Yamala. O vliyaniyi gasovykh zalezhei na formirovaniye i razvitiye kriogennoy tolschchi poluostrova Yamal [Cryogenic strata of gas-bearing structures of the Yamal peninsula. On an influence of gas accumulations on cryogenic strata forming and development]. Moscow, Nauchnyy Mir, 2018, 232 p. (in Russian).

Badu Yu.B., Vasil'chuk Yu.K., Kashperuk P.I. et al. Geological processes and phenomena caused by long-term temperature changes in the layer of permafrost and freezing rocks. In: Exogeodynamics of the West Siberian Plate (space-time patterns). Moscow, Publishing House of Moscow State University, 1986, p. 92–166 (in Russian).

Bogoyavlenskiy V.I. The threat of catastrophic gas blowouts out of the Arctic Cryolithozone. Part 1. Burenkiye i nef't' [Drilling and Oil], 2014а, No. 9, p. 13–18 (in Russian).

Bogoyavlenskiy V.I. The threat of catastrophic gas blowouts out of the Arctic Cryolithozone. Part 2. Burenkiye i nef't' [Drilling and Oil], 2014b, No. 10, p. 4–8 (in Russian).

- Bogoyavlenskiy V.I. Emissions of gas and oil on land and waters of the Arctic of the World Ocean. *Bureniye i neft'* [Drilling and Oil], 2015, No. 6, p. 4–9, DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-48-55.
- Bogoyavlenskiy V.I. Gas-hydrodynamics in gas-blowout craters in the Arctic. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: Ecology and Economics], 2018, No. 1 (29), p. 48–55, DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-48-55.
- Bogoyavlenskiy V.I., Bogoyavlenskiy I.V., Kargina T.N. et al. Degassing of Earth in the Arctic: remote and field studies of the thermokarst lakes gas eruption. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: Ecology and Economics], 2019a, No. 2 (34), p. 31–47, DOI: 10.25283/2223-4594-2019-2-31-47.
- Bogoyavlenskiy V.I., Bogoyavlenskiy I.V., Nikonov R.A. Results of aerial, space and field investigations of large gas blowouts near the Bovanenkovo gas field on Yamal Peninsula. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: Ecology and Economics], 2017, No. 3 (27), p. 4–17, DOI: 10.25283/2223-4594-2017-3-4-17.
- Bogoyavlenskiy V.I., Bogoyavlenskiy I.V., Nikonov R.A. et al. Remote detection and monitoring of Earth degassing in the Arctic: Yamal Peninsula, Neito Lake. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: Ecology and Economics], 2018a, No. 2 (30), p. 83–93 (in Russian).
- Bogoyavlenskiy V.I., Garagash I.A. Substantiation of the process of gas-blowout craters formation in the Arctic by mathematical modeling. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: Ecology and Economics], 2015, No. 3 (19), p. 12–17 (in Russian).
- Bogoyavlenskiy V.I., Sizov O.S., Bogoyavlenskiy I.V. et al. Remote detection of near-surface gas shows and gas blowouts in Arctic: Yamal Peninsula. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: Ecology and Economics], 2016, No. 3 (23), p. 4–13 (in Russian).
- Bogoyavlenskiy V.I., Sizov O.S., Bogoyavlenskiy I.V. et al. The technology of remote monitoring of surface gas showings in the permafrost zone (on the example of the Yamal Peninsula). In: *Actualnye problemy nefti i gasa* [Actual Problems of Oil and Gas], 2018b, vol. 4, No. 23, p. 75 (in Russian).
- Bogoyavlenskiy V.I., Sizov O.S., Mazharov A.V. et al. Earth degassing in the Arctic: remote and field studies of the Seyakha catastrophic gas blowout on the Yamal Peninsula. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: Ecology and Economics], 2019b, No. 1 (33), p. 88–105, DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-88-105.
- Bryksina N.A., Polishchuk Yu.M. Analysis of changes in the number of thermokarst lakes in the permafrost zone of Western Siberia based on satellite images. *Earth's Cryosphere*, 2015, vol. XIX, No. 2, p. 100–105.
- Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A., Vasil'chuk A.C., Yoshikawa K., Podborny Ye.Ye., Chizhova Ju.N. Isotope composition of pingo ice core in the Yevo-Yakha river valley, north-west Siberia. *Earth's Cryosphere*, 2014, vol. XVIII, No. 4, p. 41–51.
- Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C., Budantseva N.A. et al. *Vypuklye bугry pucheniya mnogoletnemerzlykh torfyanykh massivov* [Convex Frost Mounds of Permafrost Peat Massifs]. Moscow, Moscow University Press, 2008, 571 p. (in Russian).
- Vlasov A.N., Khimenkov A.N., Volkov-Bogorodskiy D.B. et al. Natural explosive processes in the permafrost zone. In: *Science and Technology Development*, 2017, vol. 96, No. 3, p. 41–56 (in Russian).
- Vyakhirev D.A., Shushunova A.F. *Rukovodstvo po gazovoy khromatografii* [Gas Chromatography Guide]. Moscow, Vysshaya Shkola, 1975, 220 p. (in Russian).
- Gevorkyan S.G., Koreysha M.M. Explosions of frost mounds. In: *Proceedings of Glaciological Researches*, 1993, No. 77, p. 120–130 (in Russian).
- Epifanov V.A. Explosive craters-wells and the relevance of studying the role of subsoil degassing in the climatic events and landscape transformations of the Quaternary period. In: *Bulletin of the Commission for the Study of the Quaternary*, 2018, No. 76, p. 5–40 (in Russian).
- Karta geneticheskikh tipov i l'distosti verkhney 10-metrovoi chasty razreza mnogoletnemerzlykh porod Zapadno-Sibirskoi plity [Map of Genetic Types and Ice Content of the Upper 10-meter Part of the Permafrost Section of the West Siberian plate]. Ed. by V.T. Trofimov, Yu.B. Badu. Moscow, Glavtjumen'geologiya; MGU; PNIIS, 1982, 9 sheets (in Russian).
- Karta moshchnosti i stroyeniya tolshch mnogoletnemerzlykh porod Zapadno-Sibirskoi plity [Map of Thickness and Structure of Permafrost Strata of the West Siberian plate]. Ed. by V.T. Trofimov, V.V. Baulin. Moscow, Glavtjumen'geologiya; MGU; PNIIS, 1984, 9 sheets (in Russian).
- Kasym'skaya M.V. Seasonal and perennial frost mounds in the north-east of the Yamal Peninsula. *Research Publications*, 2014, No. 15 (19), p. 13–18 (in Russian).
- Kizyakov A.I., Sonyushkin A.V., Leibman M.O., Zimin M.V., Khomutov A.V. Geomorphological conditions of the gas-emission crater and its dynamics in Central Yamal. *Earth's Cryosphere*, 2015, vol. XIX, No. 2, p. 13–22.
- Kizyakov A.I., Sonyushkin A.V., Khomutov A.V. et al. Assessment of the reliefforming effect of the Antipayuta gas-blowout crater formation using satellite stereo pairs. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space], 2017, vol. 14, No. 4, p. 67–75 (in Russian).
- Kornienko S.G., Kritsuk L.N., Yakubson K.I. et al. Study of the dynamics of lakes and the processes of the permafrost formation on the Yamal Peninsula on the basis of data of aerospace observations. *Aktualnye problemy nefti i gasa* [Actual Problems of Oil and Gas], 2014, No. 1 (9), p. 14–32 (in Russian).
- Kurchatova A.N., Rogov V.V. Formation of geochemical anomalies in hydrocarbon migration in the permafrost zone of Western Siberia. *Led i Sneg* [Ice and Snow], 2018, vol. 58, No. 2, p. 199–212 (in Russian).
- Leibman M.O., Kizyakov A.I. A new natural phenomenon in the permafrost zone. *Priroda* [Nature], 2016, No. 2, p. 15–24 (in Russian).
- Leibman M.O., Dvornikov Yu.A., Streletskaya I.D. et al. Connection of gas emission craters to methane emissions in northern Western Siberia. *Aktualnye problemy nefti i gasa* [Actual Problems of Oil and Gas], 2018, vol. 4, No. 23, p. 1–4 (in Russian).
- Nezhdanov A.A., Novopashin V.F., Ogibenin V.V. et al. Mud volcanism in the north of Western Siberia. In: *Proceedings of TyumenNIIGiprogaz*. Tyumen, Flat, 2011, p. 74–79 (in Russian).
- Nesterov I.I., Podsosova L.L., Rudkevich M.Ya. et al. *Struchturnaya skhema i rayonirovaniya Zapadno-Sibirskoi plity po podoshve yursko-kainozoiskogo plitnogo kompleksa. Masshtab 1:500 000*. Moskva, Fondy Geologicheskogo instituta RAN [Structural scheme and zoning of the West-Siberian plate at the base of the Jurassic-Kainozoic plate complex. Scale 1:500,000]. Moscow, Funds of the Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, 1984, 9 sheets (in Russian).
- Olenchenko V.V., Sinitskiy A.I., Antonov E.Y., Eltsov I.N., Kushnarenko O.N., Plotnikov A.E., Potapov V.V., Epov M.I. Results of geophysical surveys of the area 'Yamal crater', a new geological structure. *Earth's Cryosphere*, 2015, vol. XIX, No. 4, p. 84–95.
- Orehov P.T., Popov K.A., Slogoda E.A., Kurchatova A.N., Tikhonravova Ya.V., Opokina O.L., Simonova G.V., Melkov V.N.

Frost mounds of Bely island in coastal marine settings of the Kara Sea. *Earth's Cryosphere*, 2017, vol. XXI, No. 1, p. 41–51.

Perlova E.V., Miklyaeva E.S., Tkacheva E.V. et al. Yamal crater as an example of a rapidly developing cryogenic process in the context of climate warming in the Arctic. *Vesti gasovoy nauki [News of Gas Science]*, 2017, No. 3 (31), p. 292–297 (in Russian).

Ponomareva O.E., Gravis A.G., Berdnikov N.M. Current dynamics of frost mounds and flat-hummocky peatlands in the northern taiga of Western Siberia (on the example of Nadym station). *Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]*, 2012, vol. XVI, No. 4, p. 21–30 (in Russian).

Streletskaya I.D., Leibman M.O., Kizyakov A.I. et al. Underground ice and its role in the formation of the gas-blowout crater on the Yamal Peninsula. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 5: Geografiya [Bulletin of Moscow University. Series 5: Geography]*, 2017, vol. 1, No. 2, p. 91–99 (in Russian).

Titovskiy A.L., Sinitskiy A.I., Pushkarev V.A. et al. Comprehensive studies of Yamal craters, new facts. *Aktualniye problemy nefti i gaza [Actual Problems of Oil and Gas]*, 2018, vol. 4, No. 23, p. 61–71 (in Russian).

Trofimov V.T., Badu Yu.B., Dubikov G.I. *Kriogennoe stroenie i l'distost' mnogoletnemerzlykh porod Zapadno-Sibirskoy plity [Cryogenic Structure and Ice Content of Permafrost Sediments of the West Siberian Plate]*. Moscow, Publishing House of Moscow State University, 1980, 246 p. (in Russian).

Khilimonyuk V.Z., Ospennikov E.N., Buldovich S.N. et al. Geocriological conditions of the Yamal crater location. In: *Proceedings of the Fifth Conference Geocryologists (Moscow, June 14–17, 2016)*. Moscow, Universitetskaya Kniga, 2016, vol. 2, p. 245–255 (in Russian).

Khimenkov A.N., Vlasov A.N., Volkov-Bogorodskiy D.B. et al. Fluid-dynamic geosystems in cryolithozone. Part 2. Cryolithodynamic and Cryogasodynamic Geosystems. *Arktika i Antarktika [Arctic and Antarctic]*, 2018, No. 2, p. 48–70 (in Russian).

Khimenkov A.N., Sergeev D.O., Stanilovskaya Yu.V. et al. Gas blowouts in cryolithozone as a new kind of geocryological hazards. *Georisk [Georisk]*, 2017a, No. 3, p. 58–65 (in Russian).

Khimenkov A.N., Stanilovskaya Yu.V., Sergeev D.O. et al. Development blasting process in cryolithozone in connection with the formation of the Yamal crater. *Arktika i Antarktika [Arctic and Antarctic]*, 2017b, No. 4, p. 13–37 (in Russian).

Khomutov A.V., Leibman M.O., Dvornikov Yu.A. Gas-blowout craters in the process of their formation. *Kholod'Ok [Kholodok]*, 2017, vol. 1, No. 15, p. 5–13 (in Russian).

Yakushev V.S. Natural gas concentration mechanisms in cryolithozone. *Aktualniye problemy nefti i gaza [Actual Problems of Oil and Gas]*, 2018, vol. 4, No. 23, p. 71–75 (in Russian).

Buldovicz S.N., Khilimonyuk V.Z., Bychkov A.Y. et al. Cryovolcanism on the Earth: Origin of a Spectacular in the Yamal Peninsula (Russia). *Scientific Reports. UK, Nature Publishing Group*, 2018, vol. 8, p. 13534, DOI: 10.1038/s41598-018-31858-9.

Vorobyev S., Bychkov A., Khilimonyuk V. et al. Formation of the Yamal crater in Northern West Siberia: evidence from geochemistry. *Geosciences*, 2019, vol. 9, No. 12, p. 515, DOI: 10.3390/geosciences9120515.

*Поступила в редакцию 21 августа 2019 г.,
после доработки – 23 января 2020 г.,
принята к публикации 25 июля 2020 г.*

ПОВЕРХНОСТНЫЕ И ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ СУШИ

УДК 556.332.62:556.168 (282.256.86)

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-6(33-44)

**КЛИМАТИЧЕСКИ ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СТОКА
ЗАПОЛЯРНЫХ РЕК ЗАПАДНОЙ ЧУКОТКИ****В.Е. Глотов, М.В. Ушаков***Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт имени Н.А. Шило ДВО РАН,
685000, Магадан, ул. Портовая, 16, Россия; geoecol@neisri.ru, mvilorich@narod.ru*

Изучены современные изменения стока заполярных рек Западной Чукотки (бассейн Восточно-Сибирского моря), связанные с происходящим потеплением климата в Арктике. На основе данных многолетних наблюдений за элементами гидрометеорологического режима выявлено увеличение стока большинства рек: при потеплении климата в Заполярье, наряду с ростом атмосферных осадков, активизируется таяние многолетних снежников, гольцового льда и других типов льдов (гидрокриогенного резерва) в каменных глетчерах и иных крупнообломочных образованиях, талые воды которых вовлекаются в водообмен. Выявлена роль геодинамической природы дренируемых террейнов в питании рек. Рассмотрены закономерности накопления и распространения составляющих гидрокриогенного резерва в формировании водного стока.

Бассейн Восточно-Сибирского моря, потепление климата, речной сток, криолитозона, сезонноталый слой, гидрокриогенный резерв

**CLIMATE-RELATED CHANGES IN THE RUNOFF
OF POLAR RIVERS IN WESTERN CHUKOTKA****V.E. Glotov, M.V. Ushakov***Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute, FEB RAS,
16, Portovaya str., Magadan, 685000, Russia; geoecol@neisri.ru, mvilorich@narod.ru*

The current changes in the runoff of the polar rivers in Western Chukotka (the basin of the East Siberian Sea), associated with the current climate warming in Arctic regions, have been studied. On the basis of the long-term observations of the hydrometeorological regime, an increase in the runoff for most of the rivers has been revealed. The reason of that is climate warming in the Arctic Circle, which, along with the growth of atmospheric precipitation, activates the thawing of the perennial snowfields, ground ice in rock glaciers, and other types of ice of the hydrocryogenic reserve in rock glaciers and other clastic rocks, where thaw waters are involved in the water exchange. The significance of the geodynamic nature of drained terranes for the river feed has been clarified. The patterns of the accumulation and distribution of the components of the hydrocryogenic reserve in the formation of the river runoff have been considered.

Basin of the East Siberian Sea, climate warming, river runoff, permafrost zone, seasonal thawing layer, hydrocryogenic reserve

ВВЕДЕНИЕ

Указом Президента России № 296 от 2 мая 2014 г. территория Чукотского автономного округа была включена в состав арктических земель как Восточный арктический сектор [Государственный доклад..., 2018]. Это повлекло за собой значительный рост государственных и частных инвестиций по всем направлениям хозяйственной жизни. Одним из наиболее инвестиционно привлекательных арктических районов стала Западная Чукотка, дренируемая р. Анюй и реками бассейна Чаунской губы Восточно-Сибирского моря. Водосборные площади этих рек расположены севернее Полярного круга, поэтому относятся к заполярным. Бо-

лее 80 лет назад здесь были открыты месторождения олова, затем крупные россыпи золота в долинах рек Малый и Большой Анюй, Пальяваам, разведаны месторождения рудного золота, серебра, меди, урана [Волков и др., 2006]. Освоение ресурсов недр требует расширения и совершенствования инфраструктурных сетей, решения проблемы утилизации промышленных отходов, в том числе радиоактивных [Тынанкергав и др., 2019]. Эффективность решения этих задач зависит от знания закономерностей формирования речного стока и изменений его при текущих глобальных преобразованиях природной среды. В наибольшей

степени эти изменения проявились в конце XX столетия – после 1980 г. [Пономарев и др., 2005; Катцов, Порфирьев, 2012; Заявление..., 2016; Стоцкунте, Василевская, 2016; Ушаков, 2017]. Изучению роли климатических преобразований в трансформации гидрологических характеристик северных рек посвящены многие работы [Tananaev et al., 2016; Lamontagne-Hallé et al., 2018; Makarieva et al., 2019]. Однако особенности климатических изменений стока заполярных рек до сих пор не изучены. Авторам не удалось найти публикации по данной проблеме ни в России, ни за ее пределами. Поэтому данное исследование, по-видимому, носит пионерный характер.

Цель настоящей работы – изучить изменения многолетнего режима стока заполярных рек горной территории Западной Чукотки (бассейн Восточно-Сибирского моря) при современном потеплении климата.

Объектом исследования являются заполярные горные реки Западной Чукотки (бассейн Восточно-Сибирского моря), длительность гидрологических наблюдений на которых составляет не менее двух 11-летних периодов солнечной активности, что позволяет оценить речной сток до и после 1980 г. и выявить особенности его формирования. Предмет исследования – режим стока указанных рек.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе использованы опубликованные материалы многолетних наблюдений за речным стоком на гидрологических постах Колымского, Певекского и Чукотского управлений по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [Многолетние данные..., 1985] и данные из гидрологических ежегодников государственного водного кадастра. Сведения о температуре воздуха и количестве осадков получены в электронной базе данных на сайте Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных [http://meteo.ru/data]. Сведения о климатических характеристиках до 1960 г. заимствованы из справочника [Прикладной... справочник, 1960]. Изменения речного стока исследовались путем сравнения средних его характеристик, рассчитанных по рядам до 1980 г. включительно и с 1981 по 2010 г. Климатологи для расчета актуальных норм используют наблюдения за последние полных три календарных декады, поэтому авторами и был выбран период 1981–2010 гг. Оценка статистической значимости внутрирядной однородности по среднему производилась по критерию Стьюдента с уровнем значимости 5 %. Использовались также сведения о гидрометеорологических, гидрогеологических, геокриологических, геологических условиях, опубликованные в ряде монографий и статей.

Основной метод исследования – системный анализ, при котором водосборная площадь реки по замыкающему створу рассматривается как система, включающая следующие элементы: водный поток в русле; толща многолетнемерзлых пород; сезонноталый слой (СТС); подрусловые талики; блок литосферы, дренируемый рекой; ландшафт речной долины. Развитые на изучаемой территории горы и плоскогорья характеризуются неоднородным распространением атмосферных осадков, температуры воздуха и подстилающей поверхности, как по площади, так и по высотным поясам [Афанасенко и др., 1989]. В этих условиях климатические показатели, полученные на единичных метеостанциях в речных долинах и на морском побережье, позволяют только качественно оценить участие элементов водосборной площади реки в формировании речного стока и их изменения при потеплении климата. Поэтому правомерно данную проблему отнести к слабоструктурированной или даже неструктурированной, для решения которой наиболее результативно применение экспертных оценок [Анохин, 1996].

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА И ПРЕДМЕТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Реки рассматриваемой территории стали изучаться только после открытия золотоносности речных долин Чукотки в 1950-х гг. К настоящему времени в заполярной части бассейна Восточно-Сибирского моря площадью около 320 тыс. км² статистически значимые данные о стоке рек Чукотки после 1980 г. получены по девяти гидрологическим постам (табл. 1, рис. 1). Они расположены на водотоках с площадью водосбора менее 30 тыс. км². Суммарно их площадь 64.5 тыс. км², т. е. около 20 % всей рассматриваемой территории.

Изученные реки и ручьи – горные, с крайне неравномерным распределением стока в течение года. В мае–сентябре в реках протекает основная масса воды (94–99 %), длительность периода открытого русла 4–4.5 месяца, дождевые паводки наблюдаются обычно в конце июня – начале сентября и чередуются с обмелением в засушливый период [Ресурсы..., 1969]. В третьей декаде сентября появляются устойчивые забереги или плавающий лед на реках. В зимние месяцы, с октября по май, малые реки и ручьи полностью промерзают. Даже в крупной реке Малый Анюй в створе с. Островное (площадь водосбора 30 тыс. км²) за период наблюдений 1960–1980 гг. стока не было в 14 случаях с февраля до конца мая [Многолетние данные..., 1985]. В последующие годы в холодные периоды сток прекращался только один раз, хотя минимальные расходы сокращались до первых десятков литров в секунду. Начало разрушения ледового покрова приходится на конец мая или первые числа июня.

Таблица 1. Сведения о гидрологических постах

Номер (см. рис. 1)	Река – пункт	Площадь водосбора, км ²	Годы наблюдений за стоком	
			начало	окончание
1	Березовка – с. Березовка	15 400	1965	2010
2	Пеймына – в 1.5 км от устья	1480	1968	1994
3	Баимка – пос. Баимка	480	1963	2000
4	Малый Анюй – с. Илирней	8180	1958	1999
5	Малый Анюй – с. Островное	30 000	1960	1997
6	Мухтуя – с. Островное	23.7	1960	2006
7	Погынден – устье р. Инкуливеем	12 000	1960	Действует
8	Инкуливеем – в 2.0 км от устья	242	1960	Действует
9	Паляваам – в 0.8 км ниже устья р. Кооквын	6810	1971	1996

Примечание. По действующим постам данные взяты по 2010 г.

Ландшафты. В горных районах рассматриваемой территории повсеместно распространены арктические тундры и пустыни. Подстилающая поверхность в этих ландшафтах в приводораздельной зоне сложена каменистыми развалами. Граница их расположена на высоте около 800 м. Ниже, на склонах долин, развита тундра на делювиальных покровах, сложенных дресвяно-щебенчатых образованиями с мелкозернистым заполнителем. Растительный покров представлен пятнами лишайников, в днищах водотоков – низкорослыми внянками и ольховниками.

В долинах рек Березовка и Пеймына, Большой и Малый Анюй и их притоков на отметках ниже 400 м сложились ландшафты лиственничных лесотундровых редколесий и лишайниковых

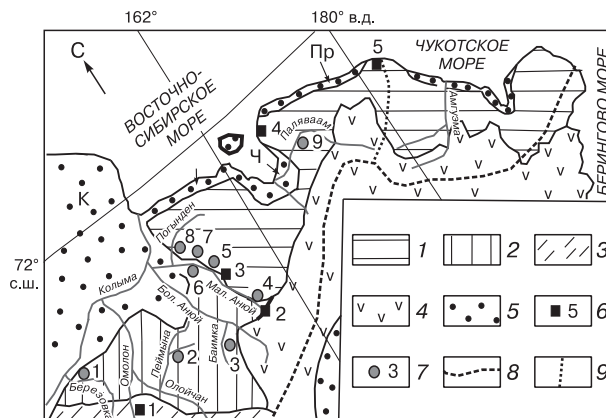


Рис. 1. Географо-геологическая схема заполярной части Западной Чукотки:

1–4 – горные территории на тектонической основе: 1 – Чукотского террейна пассивной континентальной окраины, 2 – Анюйско-Олойской системы террейнов активной окраины, 3 – Омолонского кратона, 4 – эффузивных покровов мелового возраста; 5 – низменности; К – Колымская, Ч – Чаунская, Пр – Приморская; 6 – метеопосты (номера см. табл. 2); 7 – гидрологические посты (номера см. табл. 1); 8 – главный водораздел; 9 – водораздел бассейнов рек арктических морей.

кустарничковых кедрово-стланиковых тундр [Беликович и др., 1997]. Почвенный покров маломощный на элювиально-делювиальных щебенчато-дресвяных образованиях в нижней части склонов и на гравийно-галечниковых отложениях в днищах речных долин.

Климат региона определяется положением его в Заполярье и близостью Северного Ледовитого океана, большая часть акватории которого покрыта льдами в течение всего года. В целом в регионе длительность холодного периода, когда среднесуточная температура воздуха ниже 0 °С, от 303 дней (с. Островное) до 316 дней (пос. Илирней). Среднегодовая температура воздуха – от –9.5 °С (г. Певек) до –11.6 °С (пос. Илирней). Количество осадков до 266 мм (табл. 2).

Таблица 2. Среднегодовые значения температуры воздуха (Т, °С) и количества осадков (мм) на Западной Чукотке

Номер (см. рис. 1)	Метеостанция	Координаты	Абс. отметка, м	Период наблюдений	До 1960 г.		1961–1980 гг.		1981–2019 гг.	
					Т	Осадки	Т	Осадки	Т	Осадки
1	Пос. Омолон	65°14' с.ш., 160°32' в.д.	260	1944–2009	–13.2	256	–12.8	261	–11.6	252
2	Пос. Илирней	67°20' с.ш., 168°11' в.д.	426	1945–2009	–13.3	240	–12.4	264	–11.6	266
3	С. Островное	68°06' с.ш., 164°10' в.д.	98	1965–2019	–12.0	182	–11.8	227	–10.9	237
4	Г. Певек	69°43' с.ш., 170°16' в.д.	4	1940–2019	–10.1	136	–10.0	187	–9.5	221
5	Пос. Мыс Шмидта	68°55' с.ш., 178°29' з.д.	260	1932–2008	–12.1	Нет свед.	–11.9	327	–10	262

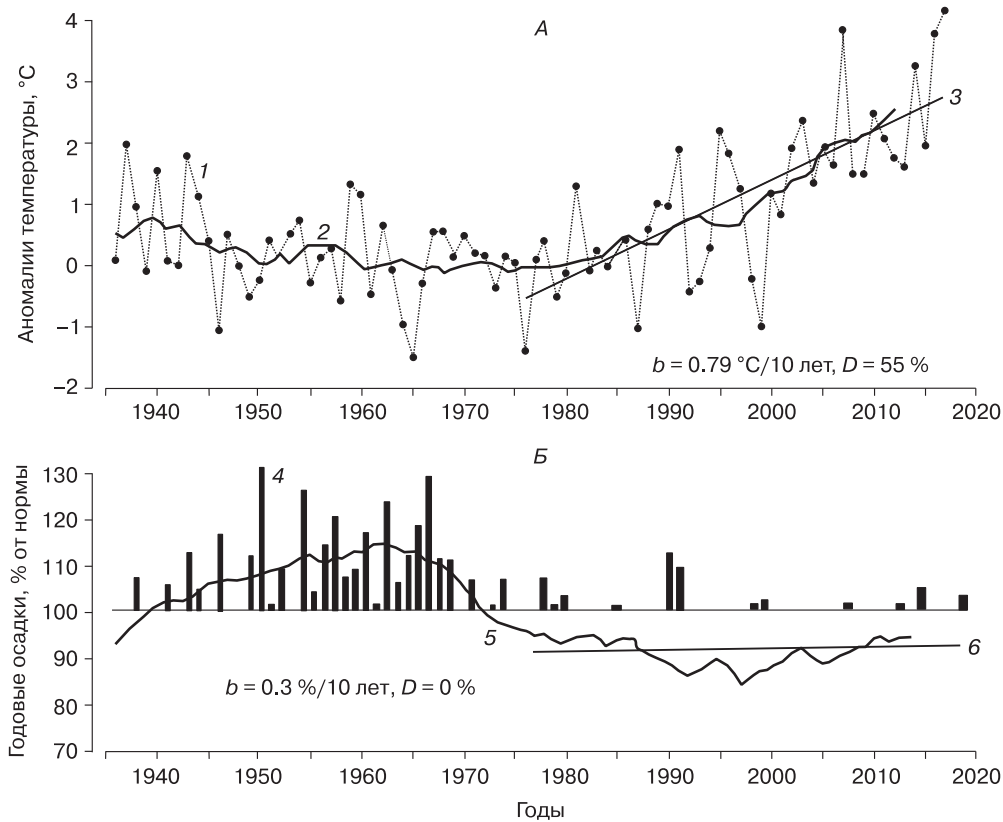


Рис. 2. Динамика основных годовых климатических характеристик Восточного сектора арктической зоны РФ по данным Росгидрометео за 1936–2018 гг. [Государственный доклад..., 2018]:

А – отклонения температуры воздуха от средних значений (линия 1); 2 – 11-летнее скользящее среднее; 3 – линейный тренд за 1976–2018 гг.; *b* – коэффициент тренда, °С/10 лет, *D* – вклад в суммарную дисперсию, %; *Б* – годовые суммы осадков (4) (в % от нормы за 1961–1991 гг.); 5 – 11-летнее скользящее среднее; 6 – линейный тренд за 1976–2018 гг.; *b* – коэффициент тренда, %/10 лет, *D* – вклад в суммарную дисперсию, %.

Многолетние наблюдения на метеостанциях в пределах заполярной части бассейна Восточно-Сибирского моря (Островное, Илирней, Певек) и за его границей (Омолон, Мыс Шмидта) показывают, что за последние 60 лет потепление наиболее значимо проявилось в 1980-е и последующие годы. Аналогично изменялись среднегодовые температуры воздуха по всему Восточному арктическому сектору (рис. 2, А) [Государственный доклад..., 2018]. Однако тенденция увеличения осадков отличается от аналогичной во всей арктической зоне России. В последней рост осадков (2.6 % от нормы за 10 лет) происходит с 1976 г. В восточном же секторе Арктики рост количества

осадков наблюдался только после 1995 г. (см. рис. 2, Б). Уменьшилось количество осадков в холодное время года, что отмечено на внутриконтинентальных метеостанциях (табл. 3) [Там же]. Причины глобальных климатических трансформаций не установлены. Возможно, они вызваны планетарными изменениями океанических течений в 1975 г., обусловленными тектоническими движениями дна океана [Harris, 2002].

Испарение, в том числе эвапотранспирацию, на Западной Чукотке не изучали. Единственная работа по этой проблеме – расчет водного баланса в водосборе руч. Цирковый в верховье р. Малый Анюй, выполненный И.М. Паперновым [1965]. Однако количество атмосферных осадков, температура воздуха, речной сток не измерялись, а рассчитаны им по высотным поясам в 100 м каждый на основе принятой автором зависимости их от высоты местности. Величины испарения и конденсации приведены с учетом результатов работы Колымской водно-балансовой станции (КВБС) [Там же]. Поэтому для ориентировочной оценки величины испарения авторы также вынуждены

Таблица 3. Количество осадков (мм) за холодный период года (октябрь–май) по материалам Колымского управления гидрометеослужбы

Метеостанция	До 1980 г.	1981–2010 гг.
Омолон	127	100
Островное	105	104
Мыс Шмидта	195	154

пользоваться материалами этой станции [Бояринцев и др., 1991; Сущанский и др., 2002]. В соответствии с этими материалами испарение с поверхности снежного покрова не превышает 12 мм, или 10–12 % суммы твердых осадков в заполярной Чукотке. В арктической тундре и каменистой пустыне на крупнообломочных осыпях выпадающие осадки проникают до уровня грунтовых вод, поэтому на испарение затрачивается, по-видимому, не более 5 % осадков. На склонах из-за уменьшения размеров обломочного материала и образования мелко- и тонкозернистого заполнителя величина испарения возрастает до 30–32 % от величины выпадающих жидких осадков. В долинах водотоков бассейна стока рек Большой и Малый Аной на площади листовенного редколесья испарение с учетом эвапотранспирации достигает наибольших значений, составляющих примерно 50 % жидких осадков. Учитывая преобладающее распространение различных видов тундры, авторы оценивают испарение на данной территории в теплое время года примерно в 25 % выпадающих осадков.

Геологическое строение. В сложении изучаемой территории принимают участие Чукотский террейн пассивной континентальной окраины и террейны активной окраины Анойско-Олойской системы (палеозой-мезозойских и мезозойских островных дуг и зоны субдукции) [Бялбжеский и др., 2006; Соколов и др., 2015]. Состав пород, слагающих террейны, достаточно однороден. Это в разной степени катагенетически преобразованные и метаморфизованные магматические и туфогенные терригенные толщи докембрийского, палеозойского и мезозойского возрастов. Преобладающим распространением пользуются терригенные отложения триаса. Развиты покровы нижнемеловых эффузивов и интрузии позднемеловых гранитов.

На склонах и в днищах долин горных рек развиты рыхлые образования четвертичного возраста различного генезиса: элювиальные, делювиальные, аллювиальные, ледниковые и водно-ледниковые. Мощность их в поймах составляет 5–7 м, местами увеличиваясь до 40–60 м. В межгорных впадинах и грабенах речных долин эти отложения перекрывают неогеновые конгломераты, песчаники и алевролиты. Гранулометрический состав отложений связан с их генезисом, положением в рельефе, составом выветриваемых коренных пород и геодинамической природой террейнов, в сложении которых участвуют эти породы. Так, аллювиальные отложения представлены галечниками с гравием. Содержание более мелких фракций увеличивается с глубиной до образования суглинистого цемента в их основании. Делювиальные отложения обогащаются мелкоземом от верхних участков склонов долины к подножию. Наименьшее содержание тонкозернистых и глинистых

фракций, при прочих равных условиях, отмечено на площади распространения терригенных пород, слагающих террейны пассивной континентальной окраины и разновозрастных магматических пород. Тонкозернистый и глинистый заполнитель в щебенчатых породах свойствен территориям развития террейнов активной окраины. Указанные особенности определяют фильтрационные свойства пород.

Геокриологическая обстановка определяется повсеместным распространением многолетнемерзлых пород, которые С.М. Фотиев [2013] рассматривал как криогенный водоупор (КВ). При разведке рудных месторождений золота и олова установлено, что мощность КВ на водоразделах достигает 450 м, под днищами водотоков 3-го и больших порядков сокращается до 70–80 м [Акименко, Акименко, 2000; Малышева и др., 2012]. Только под руслами рек существует обводненная подмерзлотная зона гипергенной трещиноватости, контуры которой соответствуют рисунку речной сети. Так как среди выявленных сквозных таликов преобладают водопоглощающие, можно предполагать, что подмерзлотные воды в речном стоке участвуют в очень ограниченном объеме и на участках, приуроченных к зонам современных активных разломов в нижних течениях рек. Во всех речных бассейнах велика роль СТС и подруслых таликов, являющихся основными элементами зоны свободного (или активного) водообмена при сплошном распространении КВ.

Сезонное оттаивание начинается в июне, подошва СТС достигает максимальной глубины в первой декаде сентября. Глубина сезонного оттаивания варьирует от 0.5–1.5 м на склонах до 2.5 м в грубодисперсных образованиях у подножия склонов, а под руслами ручьев 1–2-го порядков – до 3–5 м. При прочих равных условиях глубина протаивания в тонкодисперсных, грубообломочных отложениях и в трещиноватых коренных породах с тонкозернистым и глинистым заполнителем меньше, чем в крупнозернистых и обломочных породах. В конце сентября СТС на горных склонах практически полностью осушается или промерзает [Пономарев, 1960]. Сезонное промерзание происходит не только сверху, но и снизу, заметно превышая скорость сезонного оттаивания [Афанасенко и др., 1989]. Надмерзлотные талики, как выяснилось в последние десятилетия, развиты под руслами большинства водотоков 3-го и больших порядков. Основное и необходимое условие для их развития и существования – наличие водопроницаемых образований (гравийно-галечные, щебнистые отложения, трещиноватые горные породы) мощностью больше глубины сезонного промерзания, т. е. более 3–5 м [Толстихин, 1974; Михайлов, 2013]. Для сохранения таликов важно накопление в днище речной долины снежного по-

кровы мощностью 0,7–1,0 м и более, предохраняющего подстилающие породы от глубокого промерзания [Михайлов, 2010].

Развитые под руслами рек водоносные талики имеют наибольшую мощность (60–80 м) в пределах современных долинных грабен. Такие грабены установлены, например, в долине р. Малый Анюй в районе пос. Илirianей, в низовьях р. Большой Кепервеем, в долине р. Большой Анюй вблизи устья левого притока (р. Баимка) [Малышева и др., 2012]. Зимой при промерзании подруслового потока подобные переуглубленные участки преобразуются в криогенные бассейны, подземными водами которых питаются русловые наледы [Гидрогеология..., 1972; Алексеев и др., 2011б].

Гидрогеологические условия связаны с особенностями геологической истории дренируемых территорий [Глотов, Глотова, 2013, 2015; Глотов и др., 2018; Glotov, Glotova, 2011]. Поэтому в пределах заполярной части площади бассейна стока Восточно-Сибирского моря авторы выделяют (см. рис. 1):

– гидрогеологические массивы и адмассивы, образованные в пределах Чукотского террейна (фрагмента пассивной континентальной окраины), протягивающегося вдоль побережья Восточно-Сибирского моря;

– гидрогеологические массивы и адмассивы на основе Анюйско-Олойской системы островодужных террейнов активной окраины на водосборных площадях рек Большой и Малый Анюй, Березовка, Пегтымель.

Во всех этих районах в третьем квартале года повсеместно формируется сезонно-водоносный

слой, мощность которого контролируется глубиной сезонного протаивания.

Надмерзлотные водоносные талики в зимнее время залегают в галечниках под руслами рек и в непосредственной близости от русла на глубине 1,5–2,0 м. Уровни подземных вод с началом промерзания постоянно понижаются. На участках выклинивания аллювиальных отложений в руслах рек образуются наледы. По О.Н. Толстихину [1974], наледы являются показателями водоносности подрусловых таликов. По материалам О.Н. Толстихина, относительная наледность (отношение суммарной площади наледей к площади района их распространения, в процентах) на территории Чукотского террейна пассивной континентальной окраины равна 0,69 %, а в районе Анюйско-Олойской системы террейнов активной окраины – 0,04 %. При этом наледы здесь зафиксированы только на двух участках в верховьях рек Большой и Малый Анюй [Гидрогеология..., 1972]. В геологическом отношении эти участки отличаются распространением палеозойских карбонатных толщ.

Изложенные геологические, геокриологические и гидрогеологические особенности авторы учитывали при анализе данных многолетних наблюдений за стоком рек.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕГО РЕЖИМА РЕЧНОГО СТОКА

Величины речного стока за два периода наблюдений (до 1980 и в 1981–2010 гг.) приведены в табл. 4. Из данных табл. 4 следует, что в большин-

Таблица 4. Средний годовой сток заполярных рек Западной Чукотки

Река	Пункт	Площадь водосбора, км ²	Период наблюдений	Многолетний средний слой стока за год, мм	Прирост (+), убыль (–)	
					мм	в % к периоду до 1980 г.
Березовка	С. Березовка	15 400	1965–1980	117	+23	+20
			1981–2010	140		
Пеймына	В 1,5 км от устья	1480	1968–1980	153	–12	–10
			1981–1994	141		
Баимка	Пос. Баимка	400	1963–1980	203	+21	+10
			1981–2000	224		
Малый Анюй	С. Илirianей	8180	1958–1980	236	+3	+1
			1981–1999	239		
Малый Анюй	С. Островное	30 000	1960–1980	187	+11	+6
			1981–1997	198		
Мухтуя	С. Островное	23,7	1960–1980	213	+80	+38
			1981–2006	293		
Погынден	Устье р. Инкуливеем	12 000	1960–1980	143	+19	+13
			1981–2010	162		
Инкуливеем	В 2 км от устья	242	1960–1980	87	+25	+29
			1981–2010	112		
Паляваам	В 0,8 км ниже устья р. Кооквын	6810	1971–1980	201	–7	–3
			1981–1996	194		

стве рек намечилось увеличение среднегодового стока. В главной реке Малый Анюй это увеличение составило не более 6 %. В ее притоках сток вырос с 13.3 % (р. Погынден) до 37.6 % (руч. Мухтуя). При этом есть обратная связь прироста стока и площади водосбора. Четко выделяется группа рек со слоем стока 200 мм и более в период от начала наблюдений до 1980 г. Это – р. Малый Анюй в створе у пос. Илирней, руч. Мухтуя, реки Баимка и Паляваам. Эти же водотоки характеризуются повышенными значениями слоя стока и в период после 1981 г. Сток уменьшился в реках Пеймына и Паляваам, на которых прекратили наблюдения в 1994 и 1996 гг. соответственно. Возможно, что уменьшение общего стока связано с сокращением количества выпадающих осадков (см. рис. 2), не исключены и последствия техногенных воздействий (пожары, открытые горные работы). В настоящее время нерекультивированные долины этих рек активно зарастают травами.

Для изучения связи стока с формирующими его факторами авторы сопоставили графики многолетних колебаний среднегодовых температур воздуха, осадков и среднегодовых объемов стока

по материалам поста р. Погынден и близлежащей метеостанции – пос. Островное (рис. 3). Видно, что за последние 55 лет тренд потепления климата имеет характер устойчивого повышения температуры воздуха, что подтверждается критерием Стьюдента с уровнем значимости 5 %. Тренд среднесезонных осадков имел направленность на понижение до середины 90-х гг. XX в., хотя он статистически и незначим. Это уменьшение наиболее заметно проявилось в летние месяцы. Так, в 1982 г. в июле выпало всего 18 мм осадков, в августе того же года – 3 мм. Вместе с тем тенденция возрастания годового стока р. Погынден так же устойчива, как и температуры воздуха (см. рис. 3).

Увеличение речного стока указывает на то, что с потеплением климата в оборот все больше вовлекаются дополнительные к атмосферным осадкам источники воды. Авторы считают такими источниками в горах законсервированную в твердом виде воду в многолетних снежниках, каменных глетчерах, гольцовом льду, многолетних наледях и, возможно, погребенных повторно-жильных льдах и других видах подземных льдов, т. е. криогенный ресурс планеты, по В.Р. Алексееву

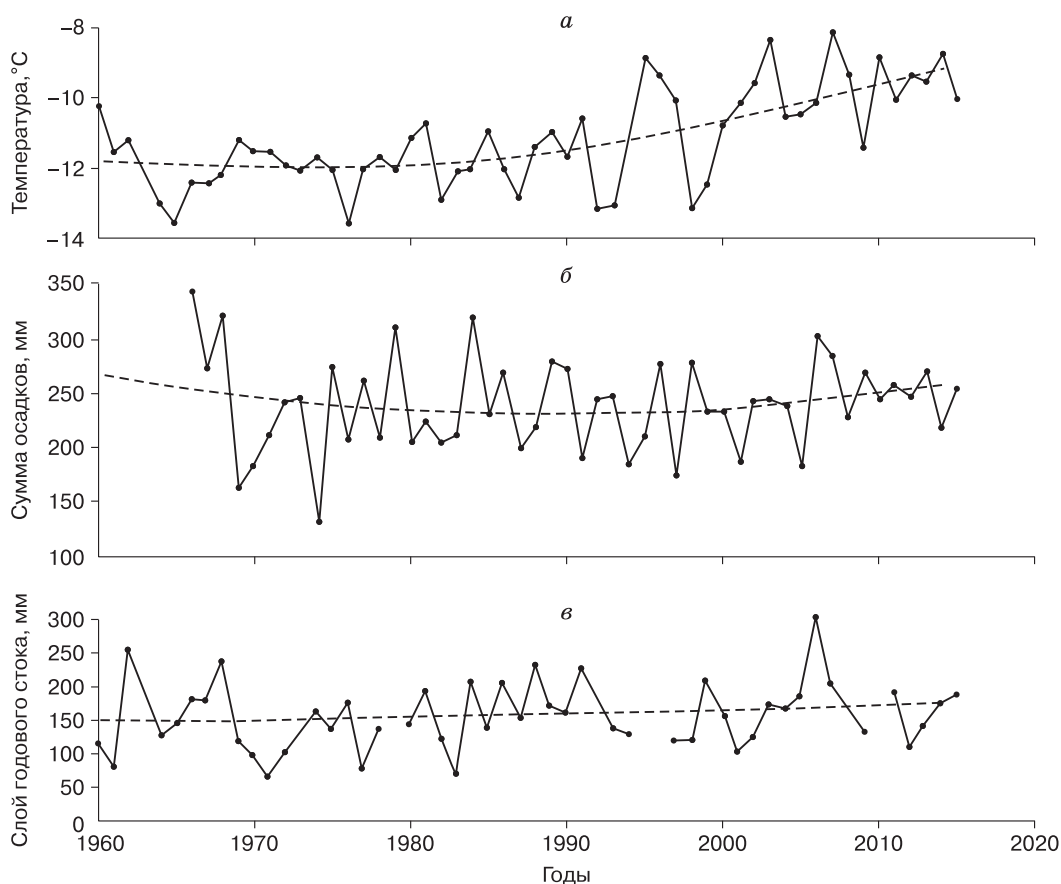


Рис. 3. Временной ход среднегодовой температуры воздуха (а), суммы атмосферных осадков за год (б) на метеостанции Островное и среднегодовых расходов воды на р. Погынден, устье р. Инкуливеем (в).

Штриховые – линии тренда.

[2012]. Считаем, что в данном случае более уместен термин “гидрокриогенный резерв” (ГКР). Вероятно, одним из наиболее значимых источников воды могут быть каменные глетчеры. Широкое распространение их у подножий горных склонов на Чукотке впервые показано А.А. Галаниным [2009], который отметил их возможное участие в формировании водного стока. Следует обратить внимание на масштабность ГКР в верхнеплейстоценовых ледниковых и водно-ледниковых отложениях, выполняющих в горах большинство долин водотоков, грабен-долины и межгорные котловины. Они отличаются очень высокой льдистостью (до 72.0–80.7 %) при среднем значении коэффициента пористости 1.42, т. е. отложения распуcaются льдом [Синицкая и др., 1977]. Авторы допускают, что наибольшее увеличение слоя стока при потеплении климата, отмеченное в боковых притоках р. Малый Анюй, вызвано тем, что в данном случае участие ГКР в питании водотоков в наибольшей мере проявляется в долинах начальных порядков.

Стокоформирующая роль оттаивания одного из объектов ГКР – гольцового льда в СТС – впервые выявлена В.Р. Алексеевым и Е.А. Бояринцевым на площади КВБС. Исследователи обратили внимание на возможность восполнения ресурсов гольцового льда при временных похолоданиях климата [Алексеев и др., 2011а]. В целом участие ГКР в формировании водного стока при текущем потеплении климата изучено слабо, но его важная роль в формировании современного водного стока достаточно заметна. На основе материалов многолетних работ КВБС было установлено, что при сумме температур воздуха в теплый период года

более 700 °С сток возрастает на 20–50 мм за счет таяния гольцового льда [Там же]. При уменьшении этой суммы ниже граничной величины происходит криогенное накопление воды. Этот процесс, возможно, свойствен и другим элементам ГКР до той температурной грани, при которой глубина сезонного оттаивания будет превосходить глубину сезонного промерзания. Переход этой грани будет означать безвозвратную потерю ГКР. В настоящее время для экспертной оценки доли ГКР в речном стоке можно принять ее равной доле питания горных водотоков гольцовым льдом (20–50 мм).

Поскольку заполярные реки характеризуются стоком преимущественно в период открытого русла, представляют интерес многолетние изменения стока, происходящие на третий квартал года (июль–сентябрь) (табл. 5). В третьем квартале, когда в формировании речного стока участвуют практически все элементы зоны активного водообмена, сток за период наблюдений после 1981 г. вырос на шести створах.

Вместе с тем в ряде водотоков происходило многолетнее уменьшение стока. Это выявлено в створах рек, в которых замечено сокращение среднегодового объема стока – Пеймына и Паляваам. Однако сток понизился в теплый период года и в р. Малый Анюй в створе “пос. Островной”. Допускаем, что для первых двух рек прекращение наблюдений в середине 1990-х гг. позволяет увязать уменьшение расходов воды в теплое время года с понижением количества выпадающих осадков без компенсации их талыми водами ГКР. Тем не менее не исключено, что понижение расходов воды в рассматриваемых реках произошло за счет возрастания потерь воды на эвапотранспирацию из-за

Таблица 5. Данные о речном стоке в третьем квартале (июль–сентябрь)

Река	Пункт	Площадь водосбора, км ²	Период наблюдений	Слой стока, мм	Мин. сток за 30 сут в летнюю межень, мм
Березовка	С. Березовка	15 400	1965–1980	35	3
			1981–2010	46	4
Пеймына	В 1.5 км от устья	1480	1968–1980	64	6
			1981–1994	51	8
Баимка	Пос. Баимка	400	1963–1980	96	12
			1981–2000	108	12
Малый Анюй	С. Илirianей	8180	1958–1980	100	20
			1981–1999	102	19
Малый Анюй	С. Островное	30 000	1960–1980	83	14
			1981–1997	81	14
Мухтуя	С. Островное	23.7	1960–1980	111	14
			1981–2006	168	22
Погынден	Устье р. Инкуливеем	12 000	1960–1980	50	8
			1981–2010	70	11
Инкуливеем	В 2 км от устья	242	1960–1980	10	1
			1981–2010	21	2
Паляваам	В 0.8 км ниже устья р. Кооквын	6810	1971–1980	115	28
			1981–1996	111	23

интенсификации роста трав и мхов на склонах и в днищах долин водотоков при потеплении климата.

Наибольшие значения слоя стока (более 100 мм) за июль–сентябрь за все годы наблюдений отмечены в створах руч. Мухтуя, рек Малый Анюй (у поселков Илirianей и Островное) и Баимка. В р. Паляваам этот показатель за период 1981–1996 гг. понизился относительно предшествующего со 115 до 111 мм, но оставался наиболее значимым в сравнении с другими реками. Заметим, что в этом квартале минимальный 30-суточный период открытого русла в заполярных реках приходится обычно на вторую половину августа–сентябрь [Многолетние данные..., 1985]. В это время таяние льдов ГКР в горах значительно сокращается или прекращается. Питание рек осуществляется в основном за счет подземных вод надмерзлотных таликов, поэтому увеличение стока в большей части водотоков свидетельствует о росте их объема. Уменьшение минимального стока в 30-суточный меженьный период в реках Паляваам, Малый Анюй у сел Илirianей и Баимка, когда потери воды на испарение происходят только в узком пойменном пространстве, может быть вызвано потерей стока на обходную фильтрацию по новообразованным таликам. Образование последних возможно не только при потеплении климата, но и при открытых горных работах в речных долинах, что сопровождается формированием многочисленных искусственных водоемов. На водосборной площади р. Паляваам добыча россыпного золота продолжалась не менее 40 лет, а в долине р. Баимка выше гидрометрического створа идет до сих пор. Около 10 лет назад здесь начаты широкомасштабные подготовительные работы к эксплуатации золото-медного рудного месторождения Песчанка – крупнейшего в мире по запасам меди. Полагаем, что геолого-геоморфологические последствия всех этих работ отразились на мерзлотно-гидрогеологической ситуации.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Повышение температуры воздуха в Восточном секторе арктической зоны России до середины 1990-х гг. сопровождалось уменьшением количества атмосферных осадков [Государственный доклад..., 2018]. Это соответствует данным метеостанции Островное в среднем течении р. Малый Анюй. Однако на реках с длительностью гидрометрических наблюдений до конца 1990-х–начала 2000-х гг. отмечена тенденция увеличения среднегодового стока и в третьем квартале года. Поэтому авторы делают вывод, что при потеплении климата, проявившемся в повышении среднегодовой температуры воздуха до середины 1990-х гг., активизировалось таяние многолетних снежников и льдов ГКР в результате заглублиения подошвы СТС [Константинов и др., 2006]. Талые воды из

этого резерва вовлеклись в процесс формирования водного стока. Годовой слой стока после 1980 г. возрастает у большинства водотоков, кроме рек Паляваам и Пеймына, на водосборных площадях которых объема ГКР, видимо, недостаточно для компенсации дефицита осадков. Не исключено, что на сокращение объема подземных льдов и многолетних снежников повлияла 40–50-летняя деятельность людей по добыче россыпного золота, возможны и иные причины. Закономерности площадного распределения подземных льдов и многолетних снежников в горных районах заполярной Чукотки предстоит изучить.

Следует обратить внимание на то, что показатели речного стока в третьем квартале года контролируются физико-географическими и геологическими условиями. При протаивании СТС до глубины 15–20 см, т. е. уже в первой декаде июля, поверхностный склоновый сток полностью трансформируется в грунтовый, даже при обильных и затяжных дождях [Кузнецов, Насыбулин, 1970]. Фактически в третьем квартале реки в криолитозоне питаются подземными водами СТС. Источником воды в этом слое, как и в подрусовых таликах, являются не только выпадающие дожди, но и талые воды ГКР. В 30-суточный период минимального стока основным источником питания служат водоносные талики. В свою очередь, емкостные и фильтрационные свойства СТС и таликов определяются геодинамической природой дренируемых террейнов. Оптимальные условия для накопления и фильтрации воды создаются при выветривании пород, слагающих террейны кратонные и пассивных континентальных окраин, и карбонатных пород на террейнах активных окраин. Этим объясняется то, что среди заполярных рек Западной Чукотки среднегодовой слой стока более 190 мм имеют водотоки, дренирующие Чукотский террейн пассивной континентальной окраины (р. Паляваам) и островодужные террейны активной окраины, в основаниях которых имеются карбонатные толщи (верховье рек Малый Анюй, Баимка, руч. Мухтуя). Эти же водотоки в третьем квартале и в 30-суточный период минимального летнего стока обладают наиболее высокими показателями речного стока и относительной наледности.

ВЫВОДЫ

Результаты изучения многолетних изменений стока заполярных рек Западной Чукотки (бассейн Восточно-Сибирского моря) позволили выявить следующие гидрологические особенности.

1. Современное потепление климата сопровождается увеличением речного стока большинства рек. Это связано не только с увеличением количества атмосферных осадков, но и с повышением среднегодовых температур воздуха. Последнее

приводит к стаиванию накопленных в предшествующие годы многолетних снежников и вытаяванию подземных льдов в отложениях ледникового комплекса, в каменных глетчерах, гольцового льда в кровле мерзлых толщ и других составляющих гидрокриогенного резерва в горных арктических районах.

Вместе с тем выделяются реки, водный сток в которых при потеплении уменьшился в целом за год и в отдельные фазы режима. Предположительно, это связано с уничтожением части гидрокриогенного резерва при добыче россыпного золота, возможно, с активизацией процессов испарения воды при многолетнем повышении температуры воздуха.

2. Отмечена связь характеристик речного стока с геодинамической природой дренируемых террейнов и наличием карбонатных пород в составе слагающих их толщ.

3. Обоснована необходимость изучения закономерностей распространения многолетних снежников, каменных глетчеров и других элементов гидрокриогенного резерва воды и возможной его связи с геодинамической природой террейнов.

Авторы выражают благодарность рецензентам, критические замечания которых позволили улучшить содержание статьи, членам редакционной группы журнала за высокий профессионализм в работе, а также с.н.с. Глотовой Л.П., оказавшей существенную помощь при выполнении данного исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-60036).

Литература

- Акименко Г.М., Акименко А.В. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000, лист R-58-XXXV-XXXVI. 2-е изд. Объяснит. записка. С.-Петербург, ВСЕГЕИ, 2000, 198 с.
- Алексеев В.Р. Талые воды – криогенный ресурс планеты // География и природ. ресурсы, 2012, № 1, с. 24–31.
- Алексеев В.Р., Бояринцев Е.Л., Гопченко Е.Д. и др. Механизмы криогенного регулирования стока в формировании водного баланса малых горных рек зоны многолетнемерзлых пород // Укр. гидрометеорол. журн., 2011, № 8, с. 182–194.
- Алексеев В.Р., Горин В.В., Котов С.В. Наледи – тарыны Северной Чукотки // Лед и снег, 2011б, т. 51, № 4, с. 83–85.
- Анохин А.Н. Методы экспертных оценок. Учеб. пособие. Обнинск, Ин-т атомной энергетики, 1996, 148 с.
- Афанасенко В.Е., Замолотчикова С.А., Тишин М.И., Зуев И.А. Северо-Чукотский регион // Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток. М., Недра, 1989, с. 280–292.
- Беликович А.В. Природа и ресурсы Чукотки / А.В. Беликович, А.В. Галанин, А.А. Галанин и др. Магадан, СВНЦ ДВО РАН, 1997, 236 с.
- Бояринцев Е.Л., Гопченко Е.Д., Сербов И.Г. и др. Экспериментальные исследования испарения с поверхности су-

ши в условиях незначительного протаивания в деятельном слое. М., 1991, 10 с. Деп. в ИЦ ВНИИ ГМИ-ДИД 16.01.91, № 1046.

Бялобжеский С.Г., Горячев Н.А., Шпикерман В.М. Кратоны и орогенные пояса Востока России // Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. Владивосток, Дальнаука, 2006, кн. 1, с. 144–152.

Волков А.В. Месторождения золота и серебра Чукотки / А.В. Волков, В.И. Гончаров, А.А. Сидоров. Магадан, СВНЦ ДВО РАН, 2006, 221 с.

Галанин А.А. Каменные глетчеры северо-востока Азии: картографирование и географический анализ // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 4, с. 49–61.

Гидрогеология СССР. Т. 26. Северо-Восток СССР / Ред. О.Н. Толстихин. М., Недра, 1972, 297 с.

Глотов В.Е., Глотова Л.П. Связь фундамента Охотско-Чукотского вулканоплутонического пояса с водными ресурсами зоны активного водообмена // Вестн. Сев.-Вост. науч. центра ДВО РАН, 2013, № 4, с. 67–75.

Глотов В.Е., Глотова Л.П. Гидрогеология зоны активного водообмена на арктическом побережье Севера Дальнего Востока // Вестн. Сев.-Вост. науч. центра ДВО РАН, 2015, № 1, с. 28–36.

Глотов В.Е., Глотова Л.П., Ушаков М.В. Связь стока горных рек с особенностями геологической истории дренируемых террейнов // Геоэкология. Инж. геология. Гидрогеология. Геокриология, 2018, № 4, с. 14–26.

Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году. Гл. 12. Арктическая зона Российской Федерации. М., Мин. природы России, 2018, с. 683–725.

Заявление ВМО о состоянии глобального климата в 2015 году. ВМО № 1167. Женева, Publications Board World Meteorological Organization, 2016, 26 с.

Катцов В.М., Порфирьев Б.Н. Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // Арктика: экология и экономика, 2012, № 2 (6), с. 66–79.

Константинов П.Я., Аргунов Р.Н., Герасимов Е.Ю., Угаров И.С. О связи глубины сезонного протаивания с межгодовой изменчивостью средней годовой температуры грунтов // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 3, с. 15–22.

Кузнецов А.С., Насыбулин Ш.С. Особенности формирования стока на реках верхней Колымы // Сб. работ Магадан. гидрометеорол. обсерватории. Магадан, 1970, вып. 5, с. 52–65.

Мальшева Г.И., Исаева Е.П., Тихомиров Ю.Б. Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Лист Q-59. Объяснит. записка. СПб., ВСЕГЕИ, 2012, 226 с.

Михайлов В.М. Разнообразие таликов речных долин и их систематизация // Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 3, с. 43–51.

Михайлов В.М. Пойменные талики Северо-Востока России. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2013, 244 с.

Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Л., Гидрометеоиздат, 1985, т. I, вып. 17, 429 с.

Папернов И.М. Расчет и распределение осадков в бассейне Малого Аноя // Тр. Магадан. гидрометеорол. обсерватории. Л., Гидрометеоиздат, 1965, вып. 1, с. 41–58.

Пономарев В.И., Каплуненко Д.Д., Крохин В.В. Тенденции изменений климата во второй половине XX века в Северо-Восточной Азии, на Аляске и северо-западе Тихого океана // Метеорология и гидрология, 2005, № 2, с. 15–26.

- Пономарев В.М.** Подземные воды территории с мощной толщей многолетнемерзлых горных пород. М., Изд-во АН СССР, 1960, 200 с.
- Прикладной** климатологический справочник Северо-Востока СССР / Под ред. Н.К. Клокина. Магадан, 1960, 427 с.
- Ресурсы** поверхностных вод СССР. Т. 19. Северо-Восток. Л., Гидрометеиздат, 1969, 282 с.
- Синицкая В.М., Сабельников А.В., Ефимова Д.В.** Аннойско-Чукотский регион // Инженерная геология СССР. Т. 4. Дальний Восток. М., Изд-во Моск. ун-та, 1977, с. 157–178.
- Соколов С.Д., Тучков М.И., Ганелин А.В. и др.** Тектоника Южно-Анной структуры (Северо-Восток Азии) // Геотектоника, 2015, № 1, с. 5–30.
- Стоцкунте Ю.В., Василевская Л.Н.** Многолетние изменения температуры воздуха и почвы на Крайнем Северо-Востоке России // Геогр. вестн., 2016, № 2 (37), с. 84–96.
- Сушанский С.И., Глотов В.Е., Глотова Л.П.** Многолетние, сезонные и суточные изменения стокоформирующих факторов и общего водного стока руч. Контактный // Факторы формирования общего стока малых горных рек в Субарктике (по материалам Колымской водно-балансовой станции). Магадан, СВКНИИ ДВО РАН, 2002, с. 35–58.
- Толстикхин О.Н.** Наледи и подземные воды Северо-Востока СССР. Новосибирск, Наука, 1974, 162 с.
- Тынанкергав Г.А., Ямпольский В., Гаврилин Д.А.** Чукотка – Развитие – Новые горизонты // Глобус. Геология и бизнес, 2019, № 1 (1955), с. 32–46.
- Ушаков М.В.** Современные изменения термического режима вегетационного и зимнего периодов на Чукотке // Геогр. вестн., 2017, № 2 (41), с. 81–90.
- Фотиев С.М.** Подземные воды криогенной области России (классификация) // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 2, с. 41–59.
- Glotov V.E., Glotova L.P.** Terrain tectonics in the formation of the groundwater runoff in the active water-exchange zone of Mountainous River valleys in the cryolithzone // Russ. J. Pacific Geology, 2011, vol. 5, No. 5, p. 458–468.
- Harris S.A.** Global heat budget, plate tectonics and climatic change // Geografiska Annaler, 2002, vol. 84A, p. 1–10.
- Lamontagne-Hallé P., McKenzie J.M., Kurylyk B.L., Zipper S.C.** Changing groundwater discharge dynamics in permafrost regions // Environ. Res. Lett., 2018, vol. 13, No. 8, p. 1–12.
- Makarieva O., Shikhov A., Nesterova N., Ostashov A.** Historical and recent auffs in the Indigirka River basin (Russia) // Earth Syst. Sci. Data, 2019, No. 11, p. 409–420, DOI: 10.5194/essd-11-409-2019.
- Tananaev N.I., Makarieva O.M., Lebedeva L.S.** Trends in annual and extreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia // Geophys. Res. Lett., 2016, vol. 43 (20), p. 10764–10772, DOI: 10.1002/2016GL070796.
- URL:** <http://meteo.ru/data> (дата обращения: 12.01.2018).
- References**
- Akimenko G.M., Akimenko A.V. State geological map of the Russian Federation, scale 1:200 000, sheet R-58-XXXV-XXXVI. 2nd ed. Explanatory note. St. Petersburg, VSEGEI, 2000, 198 p.
- Alekseev V.R. Melt water as the cryogenic resource of the planet. Geografiya i prirodnye resursy [Geography and Natural Resources], 2012, No. 1, p. 24–31 (in Russian).
- Alekseev V.R., Boyarintsev E.A., Gopchenko E.D., Serbov N.G., Zavalij N.V. Mechanisms of cryogenic flow regulation in the formation of the water balance of small mountain rivers in the permafrost zone. Ukrainskiy gidrometeorologicheskij zhurnal [Ukraine Hydrometeorological Journal], 2011b, No. 8, p. 182–194 (in Russian).
- Alekseev V.R., Gorin V.V., Kotov S.V. Naled – taryns of Northern Chukotka. Led i Sneg [Ice and Snow], 2011a, No. 4, p. 83–85 (in Russian).
- Anokhin A.N. Metody ekspertykh otsenok [Methods of Expert Judgment]. Tutorial. Obninsk, Institute of Atomic Energy, 1996, 148 p. (in Russian).
- Afanasenko V.E., Zamolotchikova S.A., Tishin M.I., Zuev I.A. North Chukotka region. In: Geocryology of the USSR. Eastern Siberia and the Far East. Moscow, Nedra, 1989, p. 280–292 (in Russian).
- Belikovich A.V., Galanin A.V., Galanin A.A. et al. Priroda i resursy Chukotki [Nature and Resources of Chukotka]. Magadan, SVNC DVO RAN (Northeast Scientific Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences), 1997, 236 p. (in Russian).
- Boyarintsev E.L., Gopchenko E.D., Serbov I.G. et al. Experimental studies of evaporation from the land surface in conditions of slight thawing in the active layer. 10 sec. Dep. in the Research Center of the All-Russian Research Institute of GMI-DID 01.16.91, No. 1046 (in Russian).
- Byalobzheskiy S.G., Goryachev N.A., Shpikerman V.M. Kratons and orogenic belts of the East of Russia. In: Geodinamika, magmatizm i metallogeniya Vostoka Rossii [Geodynamics, magmatism and metallogeny of the East of Russia]. Vladivostok, Dal'nauka, 2006, Book 1, p. 144–152 (in Russian).
- Volkov A.V., Goncharov V.I., Sidorov A.A. Mestorozhdeniya zolota i serebra Chukotki [Gold and Silver Deposits of Chukotka]. Magadan, SVKNII DVO RAN (NEISRI FEB RAS), 2006, 221 p. (in Russian).
- Galanin A.A. Rock glaciers of the North-Eastern Asia: mapping and geographical analysis. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2009, vol. XIII, No. 4, p. 49–61 (in Russian).
- Tolstikhin O.N. (Ed.). Hydrogeology of the USSR, vol. 26. Northeast of the USSR. Moscow, Nedra, 1972, 297 p. (in Russian).
- Glotov V.E., Glotova L.P. The relationship between the foundation of the Okhotsk-Chukotka volcano-plutonic belt and the water resources of the active water exchange zone. Vestnik SVKNII DVO RAN [Bulletin NEISRI FEB RAS], 2013, No. 4, p. 67–75 (in Russian).
- Glotov V.E., Glotova L.P. Hydrogeology of the zone of active water exchange on the Arctic coast of the North of the Far East. Vestnik SVKNII DVO RAN [Bulletin of the Northeast Scientific Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences], 2015, No. 1, p. 28–36 (in Russian).
- Glotov V.E., Glotova L.P., Ushakov M.V. The relationship of mountain river runoff with the geological history of drained terranes. Geoekologiya, Inzhenernaya geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya [Geoecology, Engineering Geology. Hydrogeology. Geocryology], 2018, No. 4, p. 14–26 (in Russian).
- State report on the state and environmental protection of the Russian Federation in 2017. Chapter 12. Arctic zone of the Russian Federation. Moscow, Min. Prirody Rossii, 2018, p. 683–725. – URL: nangs.org/analytikos/minprirody-rossii-gosudarstvennyj-doklad-o-soswtoyani-i-ob-okhran-okruzhnyushchej-srede-rossiyskoi-federacii-pdf
- WMO statement on the status of the global climate in 2015. WMO-No. 1167. Geneva, Publications Board World Meteorological Organization, 2016, 26 p. (in Russian).

- Katzov V.M., Porfir'ev B.N. Climate change in the Arctic: implications for the environment and the economy. *Arktika: ekologiya i ekonomika [Arctic: Ecology and Economics]*, 2012, No. 2 (6), p. 66–79 (in Russian).
- Konstantinov P.Ya., Argunov R.N., Gerasimov E.Yu., Ugárov I.S. On the relationship between seasonal thaw depth and interannual variation of mean annual ground temperature. *Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]*, 2006, vol. X, No. 3, p. 15–22 (in Russian).
- Kuznetsov A.S., Nasybulin Sh.S. Features of runoff formation on the Upper Kolyma rivers. In: Collection of works of the Magadan Hydrometeorological Observatory. Magadan, 1970, iss. 5, p. 52–65 (in Russian).
- Malysheva G.I., Isaeva E.P., Tikhomirov Yu.B. The State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (3rd edition). Sheet Q-59. Explanatory note. St. Petersburg, VSEGEI, 2012, 226 p. (in Russian).
- Mikhaylov V.M. Diversity and systematization of taliks in river valleys. *Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]*, 2010, vol. XIV, No. 3, p. 43–51 (in Russian).
- Mikhaylov V.M. Poimennye taliki Severo-Vostoka Rossii [Floodplain Taliks of the North-East of Russia]. Novosibirsk, Acad. Publishing House Geo, 2013, 244 p. (in Russian).
- Long-term data on the regime and resources of land surface water. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1985, vol. I, iss. 17, 429 p. (in Russian).
- Papernov I.M. Calculation and distribution of precipitation in the basin of Malyi Anyui. In: Collection of works of the Magadan Hydrometeorological Observatory. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1965, iss. 1, p. 41–58 (in Russian).
- Ponomarev V.I., Kaplunenko D.D., Krohin V.V. Climate change trends in the second half of the twentieth century in Northeast Asia, Alaska and the Northwestern Pacific Ocean. *Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and Hydrology]*, 2005, No. 2, p. 15–26 (in Russian).
- Ponomarev V.M. Podzemnye vody territorii s moshchnoi tolshchei mnogoletnemerzlykh gornykh porod [Groundwater of a Territory with a Thick Stratum of Permafrost]. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1960, 200 p. (in Russian).
- Klyukin N.K. (Ed.). Applied climatological guide of the North-East of the USSR. Magadan, 1960, 427 p. (in Russian).
- Surface Water Resources of the USSR. Vol. 19. North-East. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1969, 282 p. (in Russian).
- Sinitskaya V.M., Sabel'nikov A.V., Yefimova D.V. Anyuysko-Chukotskiy region. In: *Inzhenernaya geologiya SSSR [Engineering Geology of USSR]*. Vol. 4. Dal'niy Vostok. Moscow, Moscow University Press, 1977, p. 157–178 (in Russian).
- Sokolov S.D., Tuchkov M.I., Ganelin A.V. et al. Tectonics of the South Anyui structure (North-East Asia). *Geotektonika [Geotectonics]*, 2015, No. 1, p. 5–30 (in Russian).
- Stochkute Yu.V., Vasilevskaya L.N. Long-term changes in air and soil temperature in the Far North-East of Russia. *Geograficheskiy Vestnik [Geographical Bulletin]*, 2016, No. 2 (37), p. 84–96 (in Russian).
- Sushchansky S.I., Glotov V.E., Glotova L.P. Long-term, seasonal and diurnal changes in the drainage factors and the total water flow of the stream Kontaktoviyi. In: Factors of formation of the total runoff of small mountain rivers in the Subarctic (based on materials from the Kolyma water-balance station). Magadan, NECS FEB RAS, 2002, p. 35–58 (in Russian).
- Tolstikhin O.N. Icings and Groundwater of the North-East of the USSR. Novosibirsk, Nauka, 1974, 162 p. (in Russian).
- Tynankergav G.A., Yampol'skiy V., Gavrilin D.A. Chukotka – Development – New Horizons. *Globus. Geologiya i biznes [Globe. Geology and Business]*, 2019, No. 1 (1955), p. 32–46 (in Russian).
- Ushakov M.V. Modern changes in the thermal regime of the vegetation and winter periods in Chukotka. *Geograficheskiy vestnik [Geographical Bulletin]*, 2017, No. 2 (41), p. 81–90 (in Russian).
- Fotiev S.M. Underground waters of cryogenic area of Russia (classification). *Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]*, 2013, vol. XVII, No. 2, p. 41–59 (in Russian).
- Glotov V.E., Glotova L.P. Terrain tectonics in the formation of the groundwater runoff in the active water-exchange zone of Mountainous River valleys in the cryolithzone. *Russ. J. Pacific Geology*, 2011, vol. 5, No. 5, p. 458–468.
- Harris S.A. Global heat budget, plate tectonics and climatic change. *Geografiska Annaler*, 2002, vol. 84A, p. 1–10.
- Lamontagne-Hallé P., McKenzie J.M., Kurylyk B.L., Zipper S.C. Changing groundwater discharge dynamics in permafrost regions. *IOP Publishing Ltd, 20. Environ. Res. Lett.*, 2018, vol. 13, No. 8, p. 1–12.
- Makarieva O., Shikhov A., Nesterova N., Ostashov A. Historical and recent auffs in the Indigirka River basin (Russia). *Earth Syst. Sci. Data*, 2019, No. 11, p. 409–420, DOI: 10.5194/essd-11-409-2019.
- Tananaev N.I., Makarieva O.M., Lebedeva L.S. Trends in annual and extreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia. *Geophys. Res. Lett.*, 2016, vol. 43 (20), DOI: 10.1002/2016GL070796.
- URL: <http://meteo.ru/data> (last visited: 12.01.2018).

*Поступила в редакцию 30 августа 2019 г.,
после доработки – 15 июля 2020 г.,
принята к публикации 1 августа 2020 г.*

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ

УДК 550.837; 551.341

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-6(45-54)

**ИЗУЧЕНИЕ ТАЛИКА ПОД МАЛЫМ ВОДОТОКОМ
МЕТОДОМ БЕСКОНТАКТНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ****Д.В. Копылов^{1,2}, М.Р. Садуртдинов²**¹ООО “Тюменский нефтяной научный центр”, 625000, Тюмень, а/я 747, Россия; kopylovdmitr@yandex.ru²Институт криосферы Земли, Тюменский научный центр СО РАН,
625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия; mr_sadurtdinov@mail.ru

Приведены результаты применения метода бесконтактной электроразведки в комплексе инженерно-геокриологических исследований на территории объекта нефтегазовой промышленности. Установлено наличие несквозного талика под малым водотоком, который образовался в результате фильтрации подземных вод. Составлена схема строения талика на глубину до 12 м под руслом ручья. Выявлено, что в результате антропогенного изменения рельефа местности подрусловой талик в настоящее время существенно превышает ширину русла ручья. Показана эффективность применения метода бесконтактной электроразведки в условиях Заполярья.

Бесконтактное измерение электрического поля, нефтегазовая инфраструктура, талик, электроразведка, индекс глубины исследований

**THE STUDY OF TALIK UNDER A SMALL WATERCOURSE
BY THE CAPACITIVE RESISTIVITY METHOD****D.V. Kopylov^{1,2}, M.R. Sadurtdinov²**¹Tyumen Petroleum Research Center, P/O box 747, Tyumen, 625000, Russia; kopylovdmitr@yandex.ru²Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Center SB RAS,
86, Malygina str., Tyumen, 625026, Russia; mr_sadurtdinov@mail.ru

The results of application the method of capacitive resistivity prospecting in the complex of engineering-geocryological studies on the territory of the oil and gas industry area are presented. The presence of a closed talik under a small watercourse, formed as a result of groundwater filtration, has been established. A diagram of the talik structure has been compiled up to the depth of 12 m under the stream bed. It has been revealed that, as a result of anthropogenic changes in the terrain, the talik depth now significantly exceeds the stream channel width. The effectiveness of the application of the method of contactless electrical prospecting in the conditions of the Polar region has been demonstrated.

Capacitive resistivity survey method, oil and gas infrastructure, talik, electrical prospecting, index depth of investigation

ВВЕДЕНИЕ

Электроразведка методом сопротивления в геофизике криолитозоны занимает лидирующее место среди других методов геофизической разведки. Метод наиболее разработан и широко применяется для решения различных инженерно-геокриологических задач. Накоплен большой практический и научный опыт применения электроразведки для исследования многолетнемерзлых пород [Фролов, 1998; Зыков, 2007; Якунов, 2008; Sjoberg et al., 2014]. От первых электромагнитных исследований мерзлых пород в Забайкалье в 1934 г. до настоящего времени сформировалось большое количество методик полевых работ, а также способов обработки и интерпретации полученных данных [Хмелевской, 1984; Огильви, 1990].

Активное освоение нефтегазовых месторождений Арктики обуславливает увеличивающийся объем инженерно-геокриологических исследований на объектах нефтегазовой инфраструктуры. По данным И.Г. Ященко [2017], 38 % от общего числа месторождений России размещены в областях с островным, прерывистым или сплошным распространением многолетнемерзлых пород (ММП), однако по объемам запасов нефти территория криолитозоны существенно богаче. Это обстоятельство определяет необходимость проектирования и строительства большого количества трубопроводов, кустовых площадок и других сооружений нефтегазовой инфраструктуры с обеспечением их высокой надежности в процессе экс-

плуатации. В связи с этим сформирован ряд инженерно-геокриологических задач нефтегазового комплекса, для решения которых перспективно применять электроразведку и как самостоятельный метод, и в комплексе с другими методами геофизики и инженерно-геокриологическими исследованиями.

На территории Русского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) с целью детального изучения геокриологического строения разреза, обнаружения и картирования талых грунтов в зоне взаимодействия с нефтегазовой инфраструктурой были выполнены электроразведочные исследования, некоторые результаты которых изложены в статье.

ОПЫТ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕГАЗОВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В современной научной литературе имеются немногочисленные публикации по применению электроразведки и геофизических исследований в целом при инженерно-геокриологических работах на объектах нефтегазовой инфраструктуры. Кроме того, современные российские нормативные документы не обязывают, а рекомендуют выполнять геофизические исследования при инженерно-геологических изысканиях [СП 11-105-97, 2004], за исключением определения коррозионной агрессивности грунтов к углеродистой и низколегированной стали и определения “блуждающих” токов для металлических сооружений [ГОСТ 9.602-2016, 2016].

Необходимо отметить работу [Смилевец, 2003], в которой обобщается многолетний опыт ее автора по выполнению геофизических исследований на нефтегазовых объектах Западной Сибири. В ней акцентируется внимание на неоднородном блоковом строении верхней части разреза криолитозоны с наличием переходных зон, рекомендуется изучение ММП геофизическими методами круглогодично для выявления изменений физико-механических свойств грунтов оснований зданий и сооружений, а также описываются новые способы изучения ММП, в том числе с помощью аппаратуры для бесконтактных измерений электромагнитного поля. Однако недостатком этой работы является то, что интерпретация результатов геофизических исследований выполнялась в рамках одномерной горизонтально-слоистой модели.

В настоящее время при инженерно-геокриологических исследованиях активно применяют электротомографию [Бобачев, Горбунов, 2005; Оленченко и др., 2019; Yanhui et al., 2013; Sjoberg et al., 2014; Christophe et al., 2018]. Под электротомографией понимается современная модификация метода сопротивлений с определенной методикой полевых наблюдений, приемами обработки и ин-

терпретации в рамках двумерной и трехмерной моделей [Бобачев и др., 2006; Loke, 2009]. С помощью электротомографии с высокой детальностью решается широкий круг инженерно-геокриологических задач на объектах нефтегазовой инфраструктуры:

- выявление области растепления ММП вблизи добывающих и нагнетательных скважин на кустовых площадках [Сергеев и др., 2015];

- оконтуривание подземных льдов и высокольдистых грунтов, изучение криогенных процессов и их динамики по трассам линейных сооружений и площадочным объектам [Оленченко, 2015; Копылов, Садуртдинов, 2019];

- оценка льдистости и пористости грунтов на территории месторождения [Котелевец, Скобелев, 2016];

- дифференциация мерзлых и охлажденных пород разной степени засоления, выявление структурных особенностей строения изучаемого разреза на территории месторождения [Квон и др., 2019];

- проведение электротомографии для сред с высокопроводящими неоднородностями сложной формы, где рассматривается кустовая площадка месторождения, на которой в качестве помех выступают металлические трубы (сваи сооружений, обсадные трубы скважин) [Сергеев и др., 2015; Мариненко и др., 2019].

К существенным ограничениям электротомографии на сегодняшний день можно отнести необходимость использования гальванического заземления электродов, что сложно выполнить в зимний сезон на неосвоенной территории криолитозоны и невозможно осуществить на застроенной территории (мерзлая песчаная отсыпка кустовых площадок, автодорог и т. д.). Выполнение полевых работ возможно либо в короткий летний сезон, либо в зимний сезон, но с дополнительным оборудованием для организации гальванического заземления электродов (перфоратор, генератор и др.) [Пригара, Татаркин, 2012], что существенно увеличивает стоимость работ и трудозатраты. Для условий, когда невозможно произвести гальваническое заземление электродов, был разработан метод бесконтактного измерения электрического поля (БИЭП) [Сапожников, 1982, 1985]. В работе [Груздев, 2017] определены области применения бесконтактной технологии методом сопротивлений, влияния снежного покрова на бесконтактные измерения, представлены результаты сравнения метода сопротивлений с гальваническим заземлением и бесконтактным методом при измерениях современной аппаратурой как отечественного производства, так и импортного.

К сожалению, в немногих публикациях рассматривается бесконтактное измерение электрического поля на территории распространения

ММП для решения инженерно-геокриологических задач [Груздев и др., 2013; Hauck, Kneisel, 2006], хотя в настоящее время при постоянно растущих темпах строительства нефтегазовой инфраструктуры на территории криолитозоны требуется изучение геокриологической обстановки круглогодично.

ОБЪЕКТ И ТЕРРИТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Территория исследований относится к Ямало-Ненецкому автономному округу и расположена в северо-восточной части Западно-Сибирской равнины на Пур-Тазовской возвышенности (рис. 1).

В геокриологическом отношении участок расположен в северной геокриологической зоне, в подзоне сплошного распространения ММП. Мощность многолетнемерзлых пород в районе работ более 300 м, мощность сезонного талого слоя (СТС) около 1 м. Тундровая равнина представляет собой низменность с возвышающимися над ней на 50–100 м холмами и грядами. Для этой местности характерны заболоченные участки с волнистой поверхностью и краевые ледниковые образо-

вания – следы зырянского оледенения [Андреева, 1978]. В геологическом строении принимают участие верхнеплейстоценовые озерно-ледниковые отложения ермаковского горизонта, представленные песками, супесями, суглинками, глинами, перекрытые современными болотными отложениями, представленными торфами. Гидрографическая сеть района характеризуется наличием рек, озер и болотных комплексов, которые относятся к бассейну Карского моря (левобережная часть бассейна р. Таз). Наиболее крупным водотоком, пересекающим месторождение в меридиональном направлении, является р. Пяндымыха – левый приток третьего порядка р. Таз с множеством впадающих в него небольших безымянных рек и ручьев. Изучаемый район бассейна р. Пяндымыха представляет собой обширную, заболоченную (на 70 %) равнину. Реки тундровой зоны имеют небольшие размеры. Вследствие равнинного рельефа и близкого залегания к земной поверхности кровли многолетнемерзлых толщ реки имеют мелкие долины, неглубокие и очень извилистые русла и низкие берега. Преобладают малые и средние по размерам озера с площадью акватории до 1 км², расположенные среди недренированных плоско-

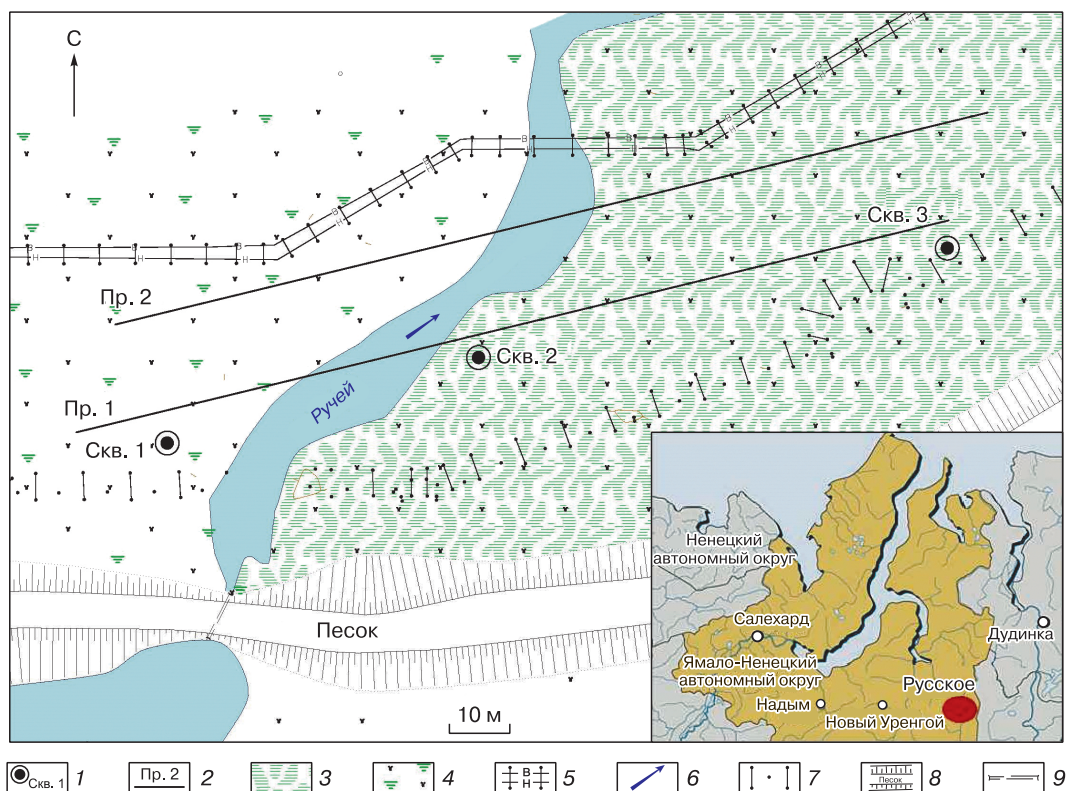


Рис. 1. Местоположение месторождения и схема участка работ.

1 – инженерно-геологическая скважина, ее номер; 2 – электроразведочный профиль, его номер; 3 – заболоченные земли; 4 – растительность; 5 – эстакада трубопроводов (в – водовод, н – нефтепровод); 6 – направление течения водотока; 7 – опоры эстакады; 8 – автомобильная дорога; 9 – водопропускная труба.

бугристых торфяников. По причине мелководности основная масса озер зимой промерзает.

Исследования проводились в верхней части разреза в пределах малого водотока (ручья) на территории месторождения Русское (см. рис. 1). Ручей вытекает из озера, имеет протяженность 7.8 км и глубину до 1 м. Площадь водосбора ручья 26.7 км², заболоченность бассейна 65 %, заозеренность 25 %. Долина неясно выражена, пойма узкая, местами не прослеживается совсем. Русло слабоврезанное, зимой ручей полностью перемерзает. В связи с тем что водотоки находятся в районе нефтяного месторождения, они испытывают значительную антропогенную нагрузку [Бешенцев, Павлова, 2012]. Исследования выполнены на участке, где водоток пересекают две параллельные автомобильные дороги с установленными водопропускными трубами. Также на участке проходят две эстакады внутрипромысловых трубопроводов на металлических сваях, заглубленных в грунт на 12 м. Сооружения оказывают большую техногенную нагрузку на многолетнемерзлые грунты в непосредственной близости от водотока. Кроме того, в летнее время наблюдается существенное затопление прилегающей к автодорогам территории в районе водопропускных труб.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

На территории месторождения в пределах ручья выполнен комплекс инженерно-геокриологических исследований, в состав которых входили рекогносцировочное обследование, буровые работы и геофизические исследования. Были пробурены три скважины глубиной 17 м, в которых выполнены термометрические наблюдения. Буровые работы выполнялись в октябре, когда СТС имел максимальную мощность или только начал промерзать. Для картирования и оконтуривания области распространения талых грунтов был применен метод БИЭП. Выбор методики бесконтактных измерений связан с выполнением исследований в зимний период (деятельный слой начал промерзать), когда применение гальванического заземления затруднительно. В качестве регистрирующей применялась электроразведочная аппаратура БИКС, разработанная в ОАО «СКБ СП» [Электроразведочная аппаратура..., 2012]. Измерения



Рис. 2. Схема используемой установки.

АВ – длина питающей линии, MN – длина приемной линии, ОО* – расстояние между центрами диполей.

проводились с помощью дипольно-осевой установки МNAB, переносимой по прямолинейному профилю. Расстояние между М и N, А и В (параметр a) принималось равным 2.5, 5 и 10 м, коэффициент разделения диполей (параметр n) изменялся от 3 до 13, максимальный разнос ОО* равен 130 м (рис. 2). Исследования выполнялись с рабочей частотой 16.6 кГц.

Работы производились по двум параллельным профилям длиной 160 м, расположенным вдоль эстакад трубопроводов (см. рис. 1). Расстояние между профилями составляло 16 м, шаг измерений по профилю – 5 м. Выбор метода электроразведки обусловлен большим различием в величине удельного электрического сопротивления (УЭС) у талых и мерзлых пород. Понижение температуры и увеличение содержания льда в грунтах приводит к соответствующему росту УЭС мерзлого грунта [Фролов, 1998; Якунов, 2008]. В результате полевых измерений получен массив данных со значениями кажущегося электрического сопротивления, разностей, номеров пикетов и профилей. Кажущееся сопротивление (ρ_k) вычислялось по формуле

$$\rho_k = \frac{KU_{\text{вх}}}{I},$$

где K – коэффициент измерительной установки, м; $U_{\text{вх}}$ – амплитудное значение напряжения, поступающего на вход приемника, В; I – амплитудное значение выходного тока излучателя, А.

Коэффициент измерительной установки вычислялся по формуле

$$K = 2\pi L \left\{ \ln \left[\left(\frac{b^2}{b^2 - 1} \right)^{2b} \left(\frac{b^2 + 2b}{(b+1)^2} \right)^{b+2} \left(\frac{b^2 - 2b}{(b-1)^2} \right)^{b-2} \right] \right\}^{-1},$$

$$b = \frac{R}{L},$$

где L – длина диполя, м; R – расстояние между излучателем и приемником, м.

Обработка, качественная и количественная интерпретация полученных данных выполнялись в программе ZondRes2d [Каминский, 2012], в результате чего получены геоэлектрические разрезы и схема распределения УЭС на глубине заложения нижнего конца свай эстакады (12 м).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ

В ходе рекогносцировочного обследования территории выявлено техногенное затопление участка поверхностными водами в районе расположения водопропускной трубы насыпной автодороги. При строительстве промышленных объектов (эстакад трубопроводов, насыпей дорог и кустовых площадок) природный рельеф видоизменяется. Появляются положительные формы

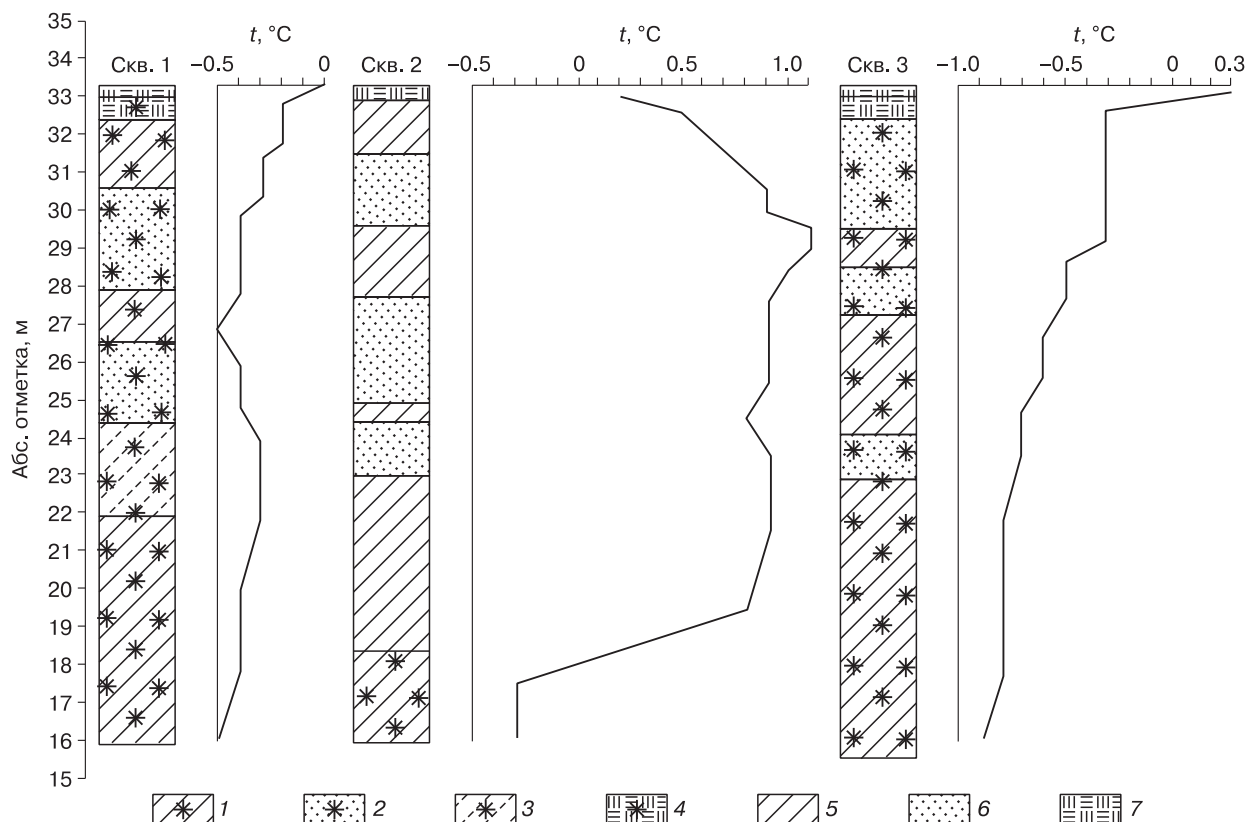


Рис. 3. Геологические колонки скважин 1–3 и распределение по глубине температуры грунтов.

1 – суглинок мерзлый льдистый; 2 – песок твердомерзлый слабольдистый; 3 – супесь твердомерзлая слабольдистая; 4 – торф мерзлый сильнольдистый; 5 – суглинок талый; 6 – песок талый водонасыщенный; 7 – торф талый. t – температура грунта, °C (11.10.2019 г.).

рельефа антропогенного характера, которые меняют поверхностный и подземный сток в летний сезон и увеличивают снегонакопление в зимний. В связи с этим происходит затопление больших территорий, которое может привести к активизации опасных инженерно-геокриологических процессов. Зимой из-за большой мощности снега уменьшается глубина промерзания ММП, а летом в результате затопления увеличивается глубина их оттаивания вследствие отепляющего влияния поверхностных вод.

По данным инженерно-геологических скважин 1 и 3 (рис. 3) установлено, что разрез представлен чередованием твердомерзлых слабольдистых песков и твердомерзлых льдистых суглинков с температурой от -0.2 до -0.9 °C. По скв. 2 разрез представлен чередованием водонасыщенных песков и мягкопластичных суглинков с температурой от $+0.1$ до $+1.1$ °C.

В результате качественной интерпретации получен псевдоразрез наблюдаемых кажущихся сопротивлений по профилю Пр. 1 (рис. 4). По нему выполнен анализ пространственного изменения

кажущихся электрических сопротивлений, что позволило определить закономерности распределения кажущегося сопротивления, выделить области аномально повышенных и пониженных значений.

Значения кажущегося сопротивления на участке исследований лежат в пределах 48–2480 Ом·м. Нижнее значение характерно для талых водонасыщенных грунтов, верхнее – для мерзлых суглинисто-песчаных грунтов. По характеру распределения кажущегося сопротивления выделяется область относительно низких значений, характерных для талых дисперсных грунтов. Согласно классификации таликов области многолетнемерзлых горных пород [Романовский, 1972], область талых грунтов является несвязным таликом (тип – гидрогенный (подводно-тепловой), подтип – подрусловой, класс – грунтово-фильтрационный, подкласс – термальный). Гидрогенные (подводно-тепловые) подрусловые талики образуются под действием отепляющего влияния водотока на подрусловые грунты. Кроме того, происходит техногенное отепляющее воздействие на

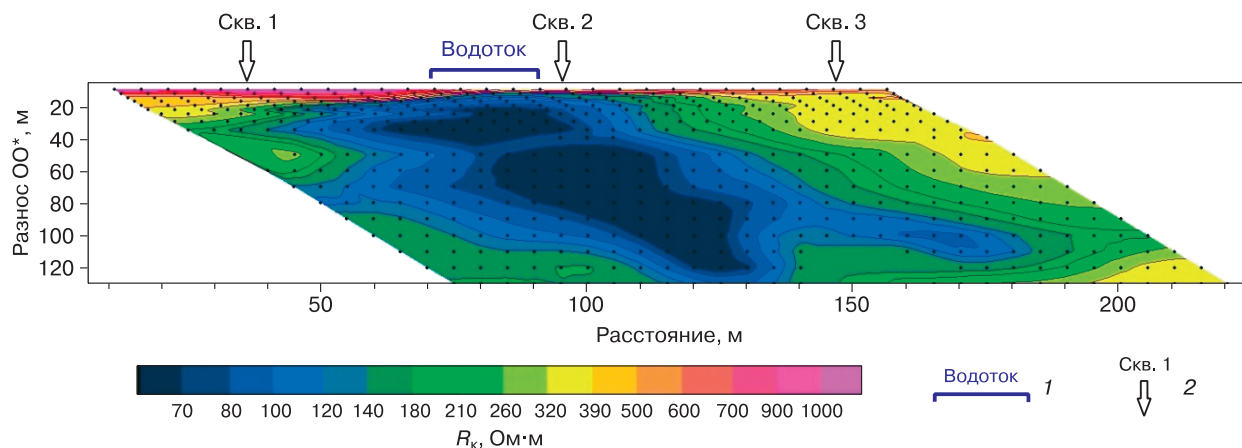


Рис. 4. Псевдоразрез наблюдаемых кажущихся сопротивлений (R_k) по профилю Пр. 1.

1 – границы водотока; 2 – проекции скважин.

прилегающую к водотоку территорию в связи с затоплением ее в результате возведения насыпей автомобильных дорог, которые затрудняют естественный сток.

На рис. 5 представлен геоэлектрический разрез по профилю Пр. 1, построенный в результате 2D-инверсии. Верхняя часть разреза неоднородна по распределению УЭС. По левому берегу водотока в интервале профиля 0–70 м выделяется аномальная область с высоким УЭС до 3000 Ом·м, мощностью 2 м, приуроченная к торфу мерзлому, сильнольдистому. Грунты правого берега водотока в интервале профиля 90–160 м имеют относительно низкие УЭС (до 700 Ом·м) и также характеризуются наличием мерзлого торфа в верхней части разреза. Неоднородность грунтов правого и левого берегов по УЭС объясняется разной температурой промерзания верхней части разреза. В связи с тем что буровые работы и отбор керна

выполнялись в октябре, когда СТС находился в талом состоянии, а геофизические исследования – в декабре при промерзшем СТС, в районе скважин 1 и 2 наблюдаются повышенные значения УЭС верхней части геоэлектрического разреза, которые характерны для мерзлых грунтов.

В интервале профиля 40–140 м до абсолютной отметки 16 м выделяется аномально низкоомная область с УЭС от 30 до 100 Ом·м, которая характеризуется наличием талых суглинисто-песчаных грунтов. По данным скважин 1 и 2, талик приурочен к пескам, в которых происходит фильтрация подземных вод, что приводит к отеплению этой части разреза.

Пороговое значение УЭС 100 Ом·м, разделяющее талые и мерзлые грунты на геоэлектрическом разрезе, принято с учетом литературных данных [Фролов, 1998; Зыков, 2007] и результатов анализа архивных материалов геофизических ис-

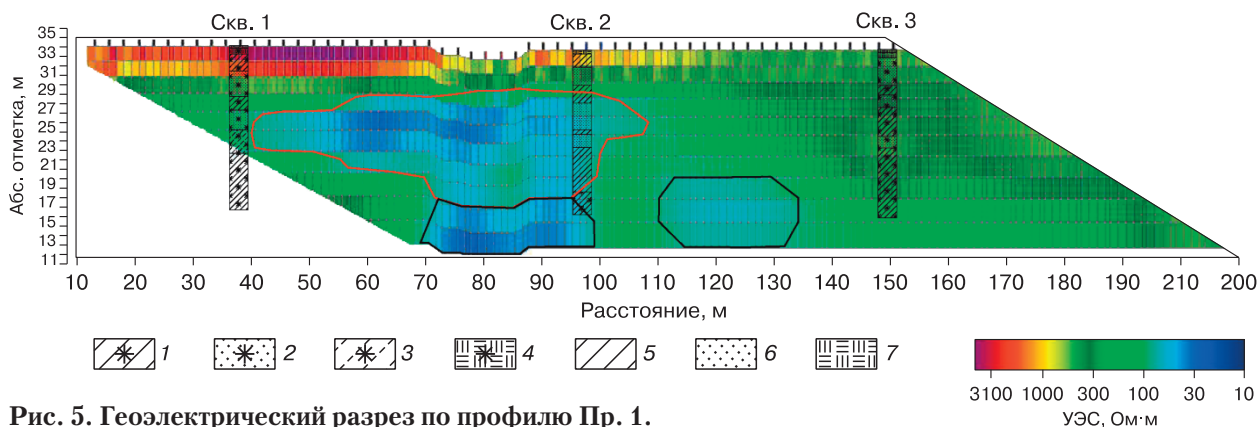


Рис. 5. Геоэлектрический разрез по профилю Пр. 1.

1 – суглинок мерзлый; 2 – песок мерзлый; 3 – сусень мерзлая; 4 – торф мерзлый; 5 – суглинок талый; 6 – песок талый; 7 – торф талый; красная линия – контур области с УЭС ≤ 100 Ом·м, черная линия – область предполагаемого влияния металлических свай коммуникаций.

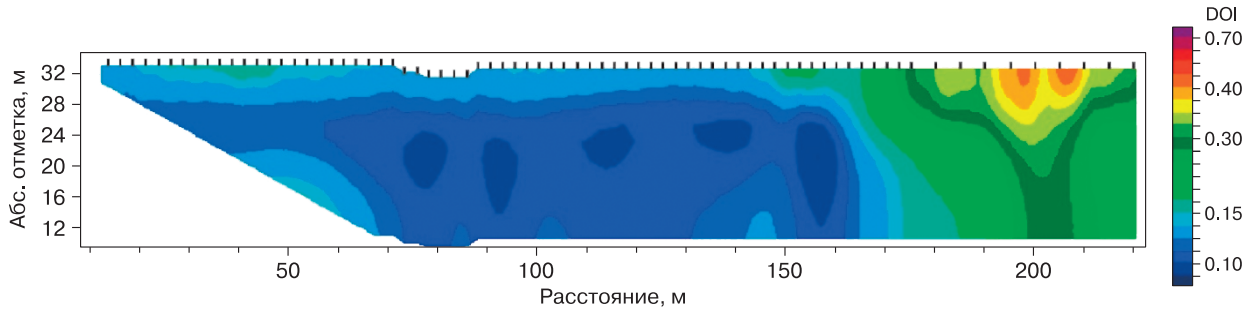


Рис. 6. Разрез, отражающий распределение индекса DOI.

следований, выполненных на близлежащих участках со сходным составом грунтов.

В интервалах профиля 70–100 и 110–135 м, в нижней части разреза, с глубины 15 м выделяется низкоомная область, что предположительно связано с влиянием металлических свай коммуникаций на измеряемые значения разности потенциалов на больших расстояниях.

Для оценки качества и надежности результатов инверсии использовался индекс глубины исследований DOI (depth of investigation), предложенный в работе [Oldenburg, Li, 1999]. В его основе лежит сопоставление двух инвертированных моделей УЭС одного и того же набора данных с использованием различных значений электрического сопротивления опорной (эталонной) модели.

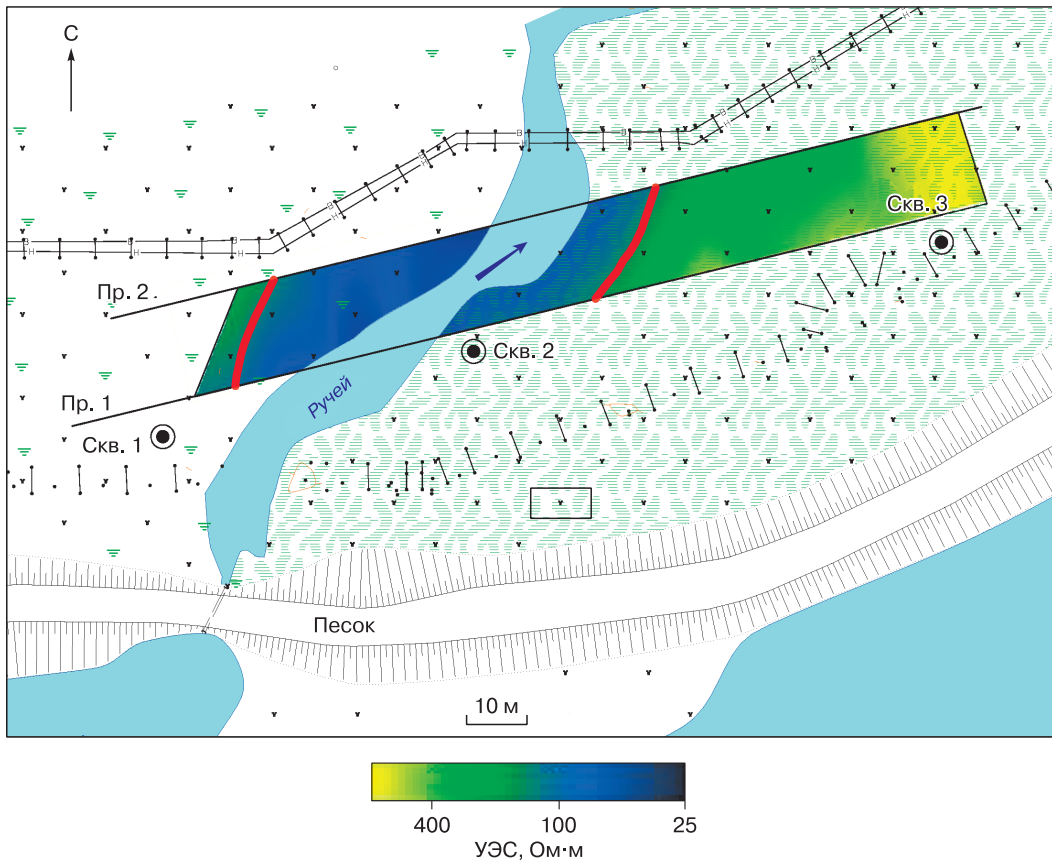


Рис. 7. Распределение удельного электрического сопротивления грунта в плане на глубине нижнего конца сваи (12 м).

Красная линия – область талика по данным электроразведки. Остальные усл. обозн. см. на рис. 1.

Первое эталонное значение (q_A) обычно рассчитывается из среднего логарифма наблюдаемого кажущегося значения удельного сопротивления. Второе эталонное значение удельного сопротивления (q_B) устанавливается в 10 раз больше q_A . Значение индекса DOI (R_{AB}) для ячейки модели определяется по формуле

$$R_{AB}(x, z) = \frac{q_A(x, z) - q_B(x, z)}{q_A - q_B}$$

Значение R будет приближаться к нулю в частях модели, где два процесса инверсии воспроизводят одинаковые значения УЭС. В таких областях ячейки содержат объективную информацию об удельном сопротивлении. В областях, где данные не содержат информации об удельном сопротивлении ячейки, R будет приближаться к единице, так как удельное сопротивление ячейки будет похоже на эталонное удельное сопротивление.

На рис. 6 представлен разрез, отражающий распределение индекса DOI вдоль профиля Пр. 1.

В правой части разреза со 160 м и далее отчетливо выделяется область относительно повышенных значений индекса. В связи с особенностями методики проведения полевых работ в данной области измерения не производились, но в процессе выполнения инверсии значения УЭС автоматически рассчитывались программой обработки. Поэтому данная область выделяется повышенными значениями индекса DOI и интерпретируется как ложная аномалия. В интервале профиля 50–140 м выделяется область с индексом DOI от 0.08 до 0.13, что является признаком объективно подобранной модели УЭС. Она интерпретируется как подрусловый талик.

По двум практически идентичным геоэлектрическим разрезам профилей Пр. 1 и Пр. 2 построена схема распределения удельного электрического сопротивления грунтов (рис. 7) на глубине заложения нижнего конца свайного фундамента 12 м.

Распространение талых грунтов на глубине 12 м наблюдается не только в подрусловой части, но и выходит за ее пределы. Выделенная на схеме область с низкими значениями УЭС (менее 100 Ом·м) интерпретируется как талые грунты, обладающие низкой несущей способностью по сравнению с мерзлыми грунтами с высоким УЭС. Ширина талой зоны грунтов на глубине 12 м составляет около 70 м в плане. Ввиду того что при проектировании и строительстве сооружений нефтегазовой инфраструктуры на территории месторождения используют первый принцип – сохранение мерзлого состояния грунтов в основании сооружения в течение всего срока его эксплуатации, наличие талых грунтов необходимо учитывать при организации инженерной защиты существующих сооружений.

ВЫВОДЫ

В результате комплексных инженерно-гео-криологических исследований установлено наличие несквозного подруслового талика, который образовался за счет фильтрации подземных вод в песках. Водоток полностью перемерзает в зимнее время года. Выявлено техногенное затопление территории поверхностными водами, что может активизировать опасные инженерно-геокриологические процессы. Составлена схема распределения УЭС на глубине 12 м, по которой прослеживается область талых слабонесущих грунтов, существенно выходящая за пределы русловой части водотока.

Оценка индекса DOI показала, что применяемая бесконтактная установка и схема УЭС разреза дают возможность получать объективную информацию до глубины 20 м.

Необходимо отметить, что на больших расстояниях установок существенное влияние на измеряемый параметр оказывают металлические сооружения, находящиеся в непосредственной близости от исследуемого профиля. Что, в свою очередь, приводит к искажению УЭС и появлению ложных аномалий на геоэлектрическом разрезе.

Выполненные геофизические исследования показали хорошую согласованность полученных результатов с данными инженерно-геологических скважин. Показана эффективность применения бесконтактного метода электроразведки в условиях Заполярья и необходимость использования электроразведки не только на стадии инженерных изысканий, но и в процессе эксплуатации сооружений с целью экспресс-мониторинга активизации опасных инженерно-геокриологических процессов.

Авторы выражают благодарность канд. геол.-мин. наук Оленченко В.В. (ИНГГ СО РАН) за ценные рекомендации и замечания при написании статьи.

Литература

- Андреева С.М. Зырянское оледенение на севере средней Сибири // Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1978, № 5, с. 72–79.
- Бешенцев В.А., Павлова Е.И. Состояние окружающей среды, обусловленное техногенным воздействием в результате освоения и эксплуатации Русского нефтегазового месторождения // Вестн. Тюм. гос. ун-та, 2012, № 7, с. 161–166.
- Бобачев А.А., Горбунов А.А. Двумерная электроразведка методом сопротивлений и вызванной поляризации: аппаратура, методики, программное обеспечение // Разведка и охрана недр, 2005, № 12, с. 52–54.
- Бобачев А.А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики, 2006, № 02, с. 14–17.
- ГОСТ 9.602-2016. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. М., Стандартинформ, 2016, 94 с.

- Груздев А.И.** Определение области применения бесконтактной технологии метода сопротивлений: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2017, 22 с.
- Груздев А.И., Науменко Д.А., Богданов П.С. и др.** Бесконтактное измерение электрического поля с помощью OhmMapper в условиях Крайнего Севера // Электрон. науч. издание "Георазрез", 2013, № 1 (13), с. 1–23.
- Зыков Ю.Д.** Геофизические методы исследования криолитозоны. М., Изд-во Моск. ун-та, 2007, 272 с.
- Каминский А.Е.** Инструкция к программе двумерной интерпретации данных метода сопротивлений и вызванной поляризации ZondRes2D. СПб., Zond geophysical software, 2012, 70 с.
- Квон Д.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. и др.** Применение электротомографии для идентификации в разрезе мерзлых и охлажденных пород разной степени засоленности // Криосфера Земли, 2019, т. XXIII, № 3, с. 3–12.
- Копылов Д.В., Садуртдинов М.Р.** Применение электро-разведки при инженерно-геокриологических исследованиях на объектах нефтегазовой инфраструктуры // Экспозиция нефть–газ, 2019, № 6 (73), с. 12–15.
- Котелев Д.В., Скобелев А.Д.** Льдистость и пористость мерзлых грунтов Харасавэйского ГКМ по данным электро-разведки // Арктика и Антарктика, 2016, № 2, с. 116–125.
- Мариненко А.В., Эпов М.И., Оленченко В.В.** Решение прямых задач электротомографии для сред с высокопроводящими неоднородностями сложной формы на примере кустовой площадки месторождения // Сиб. журн. индустр. математики, 2019, № 1 (77), с. 63–73.
- Огильви А.А.** Основы инженерной геофизики: учебник. М., Недра, 1990, 504 с.
- Оленченко В.В.** Применение электротомографии при прогнозе развития опасных экзогенных процессов на объектах инфраструктуры Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения // Тр. Междунар. конф. "Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы" (Тюмень, 2–5 июня 2015 г.). Тюмень, Эпоха, 2015, с. 276–279.
- Оленченко В.В., Цибизов Л.В., Каргозия А.А., Есин Е.И.** Электротомография чаши дренированного термокарстового озера на о. Курунгнах в дельте р. Лены // Проблемы Арктики и Антарктики, 2019, т. 65, № 1, с. 92–104.
- Пригара А.М., Татаркин А.В.** Инженерно-геофизические исследования в неблагоприятных климатических условиях // Инж. изыскания, 2012, № 11, с. 20–24.
- Романовский Н.Н.** Талики в области многолетнемерзлых пород и схема их подразделения // Вестн. Моск. ун-та, 1972, № 1, с. 23–34.
- Сапожников Б.Г.** Рекомендации по методике полевых наблюдений и методике расчета кажущегося удельного электрического сопротивления при электропрофилировании с установками срединного градиента и незаземленными рабочими линиями. Л., Недра, 1982, 65 с.
- Сапожников Б.Г.** Электропрофилирование с незаземленными рабочими линиями. Л., Недра, 1985, 96 с.
- Сергеев К.С., Рыжков В.И., Белоусов А.В. и др.** Изучение многолетнемерзлых пород с использованием комплекса методов инженерной геофизики (на примере кустовой площадки нефтегазоконденсатного месторождения в Западной Сибири) // Инж. изыскания, 2015, № 10–11, с. 46–53.
- СП 11-105-97.** Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. VI. Правила производства геофизических исследований. М., Госстрой РФ, 2004, 58 с.
- Смилевец О.Д.** Методика и технология геофизических исследований верхней части геологического разреза при проектировании технических сооружений в нефтегазоносных районах криолитозоны: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Саратов, 2003, 43 с.
- Фролов А.Д.** Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пушино, ОНТИ ПНЦ РАН, 1998, 515 с.
- Хмелевской В.К.** Электроразведка. М., Изд-во Моск. ун-та, 1984, 422 с.
- Электроразведочная аппаратура "БИКС".** Руководство по эксплуатации. Саратов, СКБ сейсмич. приборостроения, 2012, 56 с.
- Якупов В.С.** Геофизика криолитозоны. Якутск, Изд-во Якут. ун-та, 2008, 342 с.
- Ященко И.Г.** Нефтяные ресурсы криолитозоны России (обзор) // Изв. Коми науч. центра УрО РАН, 2017, № 3 (31), с. 59–70.
- Christophe R., Lemieux G., Molson J.** Geophysical investigation and numerical modelling of heat transfer in a talik beneath the Kuuguluk River at Salluit, northern Québec, Canada // 5th Europ. Conf. on Permafrost (Chamonix-Mont Blanc, 23 June–1 July 2018). Chamonix-Mont Blanc, France, 2018, p. 426–427.
- Hauck C., Kneisel C.** Application of capacitively coupled and DC electrical resistivity imaging for mountain permafrost studies // Permafrost and Periglacial Processes, 2006, vol. 17 (2), p. 169–177.
- Loke M.H.** Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys, RES2DINV Manual. 2009 [Электрон. ресурс]. – URL: <http://www.abem.se/files/res/2dnotes.pdf> (дата обращения: 12.05.2020).
- Oldenburg D.W., Li Y.G.** Estimating depth of investigation in DC resistivity and IP surveys // Geophysics, 1999, No. 64 (2), p. 403–416.
- Sjoberg Y., Marklund P., Pettersson R., Lyon S.W.** Geophysical mapping of palsa peatland permafrost // The Cryosphere, 2014, No. 9, p. 465–478.
- Yanhui You, Qihao Yu, Xicai Pan et al.** Application of electrical resistivity tomography in investigating depth of permafrost base and permafrost structure in Tibetan Plateau // Cold Regions Sci. and Technol., 2013, vol. 87, p. 19–26.

References

- Andreeva S.M. Zyryan glaciation in the North of Central Siberia. Izvestiya AN SSSR [Herald of the USSR Academy of Sciences], 1978, No. 5, p. 72–79 (in Russian).
- Beshentsev V.A., Pavlova E.I. State of the environment as a result of technogenic influence caused by the development and operation of Russkoe oil and gas field. Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta [Tyumen State University Herald], 2012, No. 7, p. 148–152 (in Russian).
- Bobachev A.A., Gorbunov A.A. 2D geoelectrical prospecting by resistivity and induced polarization technique: tools, methodology, software. Razvedka i okhrana nedr [Exploration and Protection of Resources], 2005, No. 12, p. 52–54 (in Russian).
- Bobachev A.A., Gorbunov A.A., Modin I.N., Shevnin V.A. The method of electrical tomography resistivity and induced polarization. Pribory i sistemy razvedochnoy geofiziki [Devices and systems of Exploration Geophysics], 2006, No. 02, p. 14–17 (in Russian).
- GOST 9.602-2016. Unified system of corrosion and ageing protection. Underground constructions. General requirements for corrosion protection. Moscow, Standardinform, 2016, 94 p. (in Russian).

- Gruzdev A.I. Opredeleniye oblasti primeneniya beskontaktnoy tekhnologii metoda soprotivleniy [Determination of the scope of non-contact technology of the resistance method]. Abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences. Moscow, 2017, 22 p. (in Russian).
- Gruzdev A.A., Naumenko D.A., Bogdanov P.S. et al. Capacitive resistivity survey with Ohmmapper system in far north conditions. Georazrez [Geosection], 2013, No. 1 (13), p. 1–23.
- Zykov Yu.D. Geofizicheskiye metody issledovaniya kriolitozony [Geophysical Surveys in Permafrost]. Moscow, Moscow University Press, 2007, 272 p. (in Russian).
- Kaminskiy A.E. Instruktziya k programme dvumernoy interpretatsii dannykh metoda soprotivleniy i vyzvannoy polarizatsii ZondRes2D [Instructions for the program for two-dimensional interpretation of the data of the resistance method and the induced polarization ZondRes2D]. St. Petersburg, Zond geophysical software, 2012, 70 p. (in Russian).
- Kvon D.A., Modin I.N., Shevvin V.A., Makarov D.V., Skobelev A.D. Electrical resistivity tomography for identification of frozen and cold saline rocks. Earth's Cryosphere, 2019, vol. XXIII, No. 3, p. 3–10.
- Kopylov D.V., Sadurtdinov M.R. Using geoelectrical prospecting for engineering-geocryological studies on objects of oil and gas infrastructure. Ekspozitsiya Neft'–Gaz [Exposition Oil–Gas], 2019, No. 6 (73), p. 12–15 (in Russian).
- Kotelevets D.V., Skobelev A.D. The ice content and the porosity of frozen grounds of the Kharasavey gas field according to electrical sounding data. Arktika i Antarktika [Arctic and Antarctic], 2016, No. 2, p. 116–125 (in Russian).
- Marinenko A.V., Epov M.I., Olenchenko V.V. Solving direct problems of electrical resistivity tomography for media with high-conductivity irregular-shaped heterogeneities by an example of a multiple well platform. Siberian J. Industrial Mathematics, 2019, No. 1 (77), p. 93–102.
- Ogilvi A.A. Osnovy inzhenernoy geofiziki [Fundamentals of Engineering Geophysics]. Moscow, Nedra, 1990, 504 p. (in Russian).
- Olenchenko V.V. The application of electrical resistivity tomography in the evaluation of the degree influence of hazardous exogenous processes on the infrastructure of the Bovanenkovo deposit. In: Proc. of the Intern. Conf. "Arctic, Subarctic: mosaic, contrast, variability of the Cryosphere" (Tyumen, June 2–5, 2015). Tyumen, Epoch, 2015, p. 276–279 (in Russian).
- Olenchenko V.V., Tsimbizov L.V., Kartziya A.A., Esin E.I. Electrical resistivity tomography of drained thermokarst lake basin on Kurungnakh island in the Lena river delta. Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research]. 2019, vol. 65, No. 1, p. 92–104 (in Russian).
- Prigara A.M., Tatarkin A.V. Engineering geophysical investigations under unfavourable climatic conditions. Inzhenernyye izyskaniya [Engineering Survey], 2012, No. 11, p. 20–24 (in Russian).
- Romanovskiy N.N. Taliks in the field of permafrost and the scheme of their division. Vestnik Moskovskogo universiteta [Bulletin of Moscow University], 1972, No. 1, p. 23–34 (in Russian).
- Sapozhnikov B.G. Rekomendatsii po metodike polevykh nablyudeniy i metodike raschota kazhushchegosya udel'nogo elektricheskogo soprotivleniya pri elektroprofilirovaniy s ustanovkami seredinnogo gradiyenta i nezazemlennymi rabochimi liniyami [Recommendations on the method of field observations and methods for calculating the apparent resistivity in electrical profiling with the facilities of the middle gradient and ungrounded working lines]. Leningrad, Nedra, 1982, 65 p. (in Russian).
- Sapozhnikov B.G. Elektroprofilirovaniye s nezazemlennymi rabochimi liniyami [Electroprofiling with Ungrounded Working Lines]. Leningrad, Nedra, 1985, 96 p. (in Russian).
- Sergeev K.S., Ryzhkov V.I., Belousov A.V. et al. Study of permafrost soils using a complex of methods of engineering geophysics (by the example of a well cluster of an oil and gas condensate field in Western Siberia). Inzhenernyye izyskaniya [Engineering Survey], 2015, No. 10–11, p. 46–53 (in Russian).
- SP 11-105-97. Engineering geological surveys for purposes of construction. Part IV. Rules and regulations on geophysical surveys. Moscow, Gosstroj RF, 2004, 58 p. (in Russian).
- Smilevets O.D. Metodika i tekhnologiya geofizicheskikh issledovaniy verkhney chasti geologicheskogo razreza pri proyektirovaniy tekhnicheskikh sooruzheniy v neftegazonosnykh rayonakh kriolitozony [Methodology and technology of geophysical studies of the upper part of the geological section when designing technical structures in the oil and gas bearing regions of the permafrost zone]. Dissertation abstract for the degree of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences. Saratov, 2003, 43 p. (in Russian).
- Frolov A.D. Elektricheskie i uprugie svoystva merzlykh porod i l'dov [Electrical and Elastic Properties of Frozen Rocks and Ice]. Pushchino, ONTI PNTs RAN, 1998, 515 p. (in Russian).
- Khmelevskoy V.K. Elektrorazvedka [Electrical Exploration]. Moscow, Moscow University Press, 1984, 422 p. (in Russian).
- Elektrorazvedochnaya apparatura "BIKS". Rukovodstvo po ekspluatatsii [Operation manual]. Saratov, LLC SKB of seismic instrument engineering, 2012, 56 p. (in Russian).
- Yakupov V.S. Geofizika kriolitozony [Geophysics of Permafrost Areas]. Yakutsk, Yakutsk University Press, 2008, 342 p. (in Russian).
- Yashenko I.G. Oil resources of cryolithozone of Russia (overview). Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN [Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Division of the Russian Academy of Sciences], 2017, No. 3 (31), p. 59–70 (in Russian).
- Christophe R., Lemieux G., Molson J. Geophysical investigation and numerical modelling of heat transfer in a talik beneath the Kuuguluk River at Salluit, northern Québec, Canada. In: 5th European Conference on Permafrost (Chamonix-Mont Blanc, 23 June–1 July 2018). Chamonix-Mont Blanc, France, 2018, p. 426–427.
- Hauck C., Kneisel C. Application of capacitively coupled and DC electrical resistivity imaging for mountain permafrost studies. Permafrost and Periglacial Processes, 2006, vol. 17, No. 2, p. 169–177.
- Loke M.H. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys, RES2DINV Manual. 2009. – URL: <http://www.abem.se/files/res/2dnotes.pdf> (last visited: 12.05.2020).
- Oldenburg D.W., Li Y.G. Estimating depth of investigation in DC resistivity and IP surveys. Geophysics, 1999, No. 64 (2), p. 403–416.
- Sjoberg Y., Marklund P., Pettersson R., Lyon S.W. Geophysical mapping of palsa peatland permafrost. The Cryosphere, 2014, No. 9, p. 465–478.
- Yanhui You, Qihao Yu, Xicai Pan et al. Application of electrical resistivity tomography in investigating depth of permafrost base and permafrost structure in Tibetan Plateau. Cold Regions Science and Technology, 2013, vol. 87, p. 19–26.

Поступила в редакцию 7 июня 2020 г.,
после доработки – 5 августа 2020 г.,
принята к публикации 29 августа 2020 г.

ХРОНИКА

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-6(55-56)

ВЯЧЕСЛАВ НИКОЛАЕВИЧ КОНИЩЕВ
(14.02.1938–21.07.2020)

В.В. Рогов, Л.И. Зотова, И.Д. Стрелецкая, Н.Г. Белова

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический ф-т, кафедра криолитологии и гляциологии, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; irinastrelets@gmail.com

21 июля 2020 г. после тяжелой продолжительной болезни скончался доктор географических наук, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова Вячеслав Николаевич Конищев. Всю жизнь он проработал в Московском университете и в течение 24 лет возглавлял кафедру криолитологии и гляциологии. Внес огромный вклад в развитие науки и образования в области исследования многолетнемерзлых пород.

Многолетнемерзлые породы, криолитозона, лессовидные отложения, ледовый комплекс, коэффициент криогенной контрастности

VYACHESLAV NIKOLAEVICH KONISHCHEV
(14.02.1938–21.07.2020)

V.V. Rogov, L.I. Zotova, I.D. Streletskaia, N.G. Belova

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Cryolithology and Glaciology, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; irinastrelets@gmail.com

Vyacheslav Nikolaevich Konishchev, Doctor of Geography, Professor of the Lomonosov Moscow State University passed on July 21, 2020, after a prolonged illness. Having worked all his life at Moscow University and for 24 years heading the Department of Cryolithology and Glaciology, Vyacheslav Nikolaevich made a huge contribution to the development of science and education in the field of permafrost research.

Frozen ground, permafrost zone, loess-like deposits, Ice Complex, cryogenic contrast coefficient



Вячеслав Николаевич родился 14 февраля 1938 г. в Москве. В 1955 г. поступил на географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова и в 1960 г. окончил его по специальности “физическая география”. С тех пор он навсегда связал свою дея-

тельность с Московским университетом, пройдя путь от старшего лаборанта до профессора. В 1965 г. В.Н. Конищев защитил кандидатскую диссертацию по теме “Генезис и палеогеографические условия формирования покровных лессо-

видных образований восточной части Большеземельской тундры”, а в 1978 г. – докторскую диссертацию по теме “Криогенное выветривание как фактор формирования лессовидных образований Северной Евразии”.

В.Н. Конищев – всемирно известный ученый-мерзлотовед и географ, педагог и организатор науки. Им было опубликовано более 250 научных и учебно-методических работ, в том числе 7 монографий и 9 учебных пособий, ряд его работ издан за рубежом. Исследовательская работа Вячеслава Николаевича была связана с изучением значения и места криогенеза в системе природных процессов на Земле, динамики минерального вещества в криолитозоне, эволюции и геоэкологической роли криосферы Земли. Он организовывал и проводил полевые экспедиционные исследования в суровых условиях различных районов Арктики, участвовал в экспедициях в канадскую Арктику и высокогорный Тибет. Материалы, полученные в этих экспедициях, позволили ему решить многие фундаментальные научные проблемы. Им был обоснован и доказан принципиально новый ряд устойчивости минеральных образований, присущий только криолитозоне. На этой теоретической базе Вячеслав Николаевич открыл криогенную природу минерального вещества лессовидных отложений и обосновал полигенетическую природу ледового комплекса Сибири, показал ведущую роль криогенеза в формировании минерального вещества этих широко распространенных отложений. Данной теме посвящена одна из наиболее известных его монографий “Формирование состава дисперсных пород в криолитозоне” (1981). Большое научное значение получила предложенная В.Н. Конищевым концепция расширяющейся криосферы Земли. В последние годы Вячеслав Николаевич развивал представление о неоднозначности реакции различных ландшафтов криолитозоны на изменение климата. Этому направлению посвящена его последняя монография “Вечная мерзлота и изменения климата” (2012).

Более полувека Вячеслав Николаевич вел активную педагогическую работу, сочетая требовательность и доброжелательность, высокую культуру и профессионализм, постоянную готовность помочь молодежи советом и делом. Он многие годы читал курсы лекций по общему и региональному мерзлотоведению, истории криосферы Земли, методам криолитологических исследований. При его непосредственном участии подготовлены учебные пособия по региональной криолитологии и методам криолитологических исследований, изданные в период с 1985 по 1995 г. Вячеслав Николаевич был активным пропагандистом знаний о криосфере, им были опубликованы популярные работы для юношества и осуществлены научно-популярные проекты на телевидении.

С 1993 по 2017 г. В.Н. Конищев возглавлял кафедру криолитологии и гляциологии – единствен-

ную в мире кафедру, готовящую специалистов в сфере комплексного изучения криосферы Земли. Под его руководством подготовлены девять кандидатов и один доктор наук. Долгие годы Вячеслав Николаевич вел большую научно-организационную работу: в течение 16 лет был заместителем декана географического факультета МГУ по научной работе, с 1981 по 2016 г. – председателем специализированного совета ВАК по защите докторских и кандидатских диссертаций, в разное время он был членом ученого совета по естественным наукам МГУ, ученого совета Института географии РАН, членом экспертного совета Госкомобразования, членом ученого совета географического факультета МГУ и объединенного совета РАН по криологии Земли, экспертом Российского научного фонда (РНФ), Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) и президентских фондов по поддержке молодых ученых и научных школ. Он входил в состав редколлегии ряда журналов: “Вестник Московского университета. География”, “Криосфера Земли”, “Инженерная геология”, международного журнала “Permafrost and Periglacial Processes”. В 1998 г. Вячеславу Николаевичу было присуждено почетное звание заслуженного деятеля науки Российской Федерации, в 2004 г. – заслуженного профессора МГУ. Многие годы В.Н. Конищев вел научную и научно-организационную работу в международных организациях мерзлотоведов и географов, был секретарем терминологической комиссии Международной ассоциации мерзлотоведов (ИРА). В международном сообществе географов, мерзлотоведов и гляциологов Вячеслав Николаевич заслуженно пользовался авторитетом и уважением как выдающийся ученый, талантливый педагог, организатор науки, доброжелательный, чуткий и отзывчивый человек.

Вячеслав Николаевич был в числе основателей журнала “Криосфера Земли”, он непосредственно участвовал в создании концепции журнала и в работе редколлегии и редакционной группы с момента организации журнала (1997 г.) и до конца своей жизни. Будучи членом редколлегии, он помогал журналу и организационно, и как опытный рецензент. Ответственно подходя к процессу рецензирования, он зачастую становился наставником для молодых исследователей, помогая им структурировать материал и углублять выводы. Этот колоссальный труд выполнялся им постоянно в течение всех лет работы в журнале. Заботясь о рейтинге журнала, он подавал в него свои лучшие статьи, как тематические, так и обзорные. Эти работы В.Н. Конищева неизменно способствовали повышению рейтинга журнала.

Светлая память о Вячеславе Николаевиче, большом ученом и замечательном человеке, останется в сердцах родных, близких, коллег, друзей и учеников.

*Поступила в редакцию
9 сентября 2020 г.*

ГЕОРГИЙ ЗАХАРОВИЧ ПЕРЛЬШТЕЙН
(05.10.1937–26.08.2020)

О.И. Алексеева¹, С.А. Гулый¹, В.В. Шепелев¹, М.Н. Железняк¹, А.Н. Хименков²

¹ *Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; o.i.alekseeva@mpi.ysn.ru*

² *Институт геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН, 101000, Москва, Уланский пер., 13, стр. 2, а/я 145, Россия*

26 августа 2020 г. ушел из жизни замечательный ученый, доктор геолого-минералогических наук, профессор Георгий Захарович Перльштейн. Много лет он работал в Магадане во ВНИИ-1, был заведующим Северо-Восточным отделением Института мерзлотоведения СО РАН, заведующим лабораторией гео-криологии Института геоэкологии РАН, членом редакционной коллегии журнала “Криосфера Земли”. Его имя хорошо известно как в России, так и за рубежом. Хорошая память о Георгии Захаровиче, его прекрасных деловых и человеческих качествах навсегда останется в сердцах людей, знавших его по работе и в жизни.

Перльштейн Георгий Захарович, мерзлотоведение, водно-тепловая мелиорация

GEORGY ZAKHAROVICH PERLSHTEIN
(05.10.1937–26.08.2020)

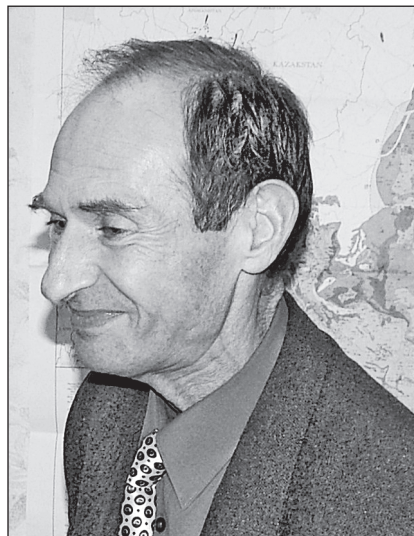
O.I. Alekseeva¹, S.A. Gulyi¹, V.V. Shepelev¹, M.N. Zheleznyak¹, A.N. Khimenkov²

¹ *Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, 36, Merzlotnaya str., Yakutsk, 677010, Russia; o.i.alekseeva@mpi.ysn.ru*

² *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, RAS, 13, bldg. 2, Ulansky per., Moscow, 101000, Russia*

On August 26, 2020, a renowned scientist, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor Georgy Zakharovich Perlshtein passed away. For many years he worked in Magadan at VNIИ-1, was the head of the North-Eastern branch of the Melnikov Permafrost Institute SB RAS, head of the geocryology laboratory at the Institute of Environmental Geoscience RAS, member of the editorial board of the “Earth’s Cryosphere” journal. His name is well known both in Russia and abroad. The good memory of Georgy Zakharovich, his excellent business and human qualities will forever remain in the hearts of people who knew him from work and life.

Perlshtein Georgy Zakharovich, permafrost, warm water amelioration



Георгий Захарович родился в Москве в 1937 г. После окончания средней школы в 1954 г. поступил на геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова. Окончив университет, в 1959 г. Г.З. Перльштейн начал свой профессиональный путь в Магадане во Всесоюзном научно-исследовательском институте (ВНИИ-1). Уже через год, перейдя на работу в экспедицию 104 геологиче-

ского факультета МГУ на должность начальника партии – младшего научного сотрудника, Георгий Захарович принял участие в гео-криологических исследованиях в Бодайбо, одном из крупнейших золотодобывающих центров СССР.

В 1965 г. Георгий Захарович поступил в аспирантуру МГУ, продолжая трудиться в Якутской экспедиции кафедры мерзлотоведения. Защитив в

1968 г. кандидатскую диссертацию по теме “Влияние инфильтрации воды на оттаивание песчаных и крупнообломочных пород”, он вернулся в Магадан во ВНИИ-1 на должность старшего научного сотрудника.

В 1973 г. Г.З. Перльштейн занял должность заведующего лабораторией отдела мерзлотоведения, а с 1982 г. руководил исследовательской группой водно-тепловой подготовки мерзлых пород к выемке. Работа группы была нацелена на оптимизацию технологий золотодобычи в условиях криолитозоны, благодаря ее исследованиям на производстве были сэкономлены миллионы рублей.

В 1983 г. Георгий Захарович защитил докторскую диссертацию по теме “Основы водно-тепловой мелиорации мерзлых пород (на примере россыпных месторождений Северо-Востока СССР)”.

С 1989 по 2002 г. он заведовал Северо-Восточным отделением Института мерзлотоведения (ИМЗ) им. П.И. Мельникова СО РАН, которое в 1994 г. было реорганизовано в Северо-Восточную научно-исследовательскую мерзлотную станцию ИМЗ СО РАН.

С 2002 по 2016 г. работал заведующим лабораторией геокриологии и главным научным сотрудником Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН.

Научной общественности Георгий Захарович Перльштейн известен своими работами по искусственному оттаиванию мерзлых горных пород. Им было разработано и запатентовано геокриологическое обоснование способа подготовки мерзлых пород, который включал оттаивание и дренирование пород и при котором дренажные выработки производились ниже подготавливаемого слоя на величину капиллярной каймы, что давало значительный экономический эффект. Детально разработанный способ был опубликован в монографии “Водно-тепловая мелиорация мерзлых пород на Северо-Востоке СССР” (1979). Монография сосредоточила основные достижения и открытия Георгия Захаровича: найденные закономерности теплоассопереноса в оттаивающих горных породах, тонкости технологий оттаивания дисперсных пород, основанных на кондуктивном переносе тепла, гидравлическом оттаивании, а также растеплении пород под действием внутренних тепловых источников, способы защиты талых пород от сезонного промерзания, способы подготовки искусственных сушенцов и особенности проектирования мероприятий водно-тепловой мелиорации при разработке россыпей.

Г.З. Перльштейном были разработаны “Временные инструктивные положения по фильтрационно-дренажному оттаиванию и подготовке искусственных сушенцов” (1979), написаны разделы в монографиях “Теплофизические исследования криолитозоны Сибири” (1983), “Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток” (1989). Им разработана теория и предложены математические модели методов гидравлического

оттаивания мерзлых пород, принципы и методы снижения прочности промерзающих продуктивных горизонтов россыпей путем осушения дренированием, исследованы особенности конвективного теплообмена в крупнообломочных и крупнодисперсных породах.

Научные интересы Г.З. Перльштейна были чрезвычайно широки: теплоассоперенос в пористых средах, использование природных ресурсов тепла и холода, решение геоэкологических проблем на территории криолитозоны – вот далеко не полный перечень направлений его деятельности. В XXI в. Георгий Захарович сосредоточился на совершенствовании теории теплообмена через земную поверхность, что позволило учесть ряд нетемпературных факторов и повысить точность геокриологического прогноза. Был сделан ряд интересных расчетов для эффективного применения тепловых насосов как инструмента управления теплообменом грунта с фундаментами сооружений. Результаты исследований Г.З. Перльштейна отражены более чем в ста публикациях, в том числе нескольких монографиях и авторских свидетельствах.

На протяжении многих лет Георгий Захарович был активным членом докторского диссертационного совета ИМЗ СО РАН.

С момента основания журнала “Криосфера Земли” в 1997 г. Г.З. Перльштейн был одним из активнейших членов редакционной коллегии журнала, а в 2003–2008 гг. непосредственно участвовал в работе редакционной группы. Неоценим его вклад в работу журнала и как автора, и как рецензента.

Государство высоко оценило трудовые заслуги Георгия Захаровича, в 1989 г. он получил звание заслуженного деятеля науки РСФСР, а в 1996 г. – звание профессора. Г.З. Перльштейн неоднократно был премирован за эффективные производственно-технические решения, награжден медалью “Ветеран труда”.

Научные достижения Георгия Захаровича, его высокая эрудиция и харизма позволили ему стать заметной величиной не только в российской науке. Международное геокриологическое сообщество избрало Г.З. Перльштейна вице-президентом Международной ассоциации мерзлотоведов (РА) на период 2003–2008 гг. Активное участие в международных проектах, множество друзей, участие в работе оргкомитетов многих международных научных конференций – вот вехи его достойного жизненного пути.

Георгий Захарович Перльштейн был замечательным, душевным человеком со светлым отношением к людям, живым интересом к литературе, музыке, спорту, с тонким юмором и острым умом.

Добрая память о Георгии Захаровиче, его прекрасных деловых и человеческих качествах навсегда останется в сердцах людей, знавших его по работе и в жизни.

*Поступила в редакцию
28 августа 2020 г.*

ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ ГОЛУБЕВ
(08.08.1937–24.07.2020)



24 июля 2020 г. скончался Владимир Николаевич Голубев – доктор географических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории снежных лавин и селей географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Владимир Николаевич родился 8 августа 1937 г. в Москве. После окончания школы он поступил в Московский институт цветных металлов и золота, который закончил в 1959 г. Участие в работах, связанных с ядерными испытаниями на Новой Земле, привлекло Владимира Николаевича к гляциологическим исследованиям, которым он и посвятил всю свою жизнь в науке, начав деятельность на кафедре геоокриологии геологического факультета МГУ.

С 1965 г. Владимир Николаевич работал на географическом факультете МГУ в научно-исследовательской лаборатории снежных лавин и селей. Научные взгляды Владимира Николаевича складывались под влиянием таких основоположников гляциологии, как Б.А. Савельев и К.Ф. Войтковский. В 1975 г. В.Н. Голубев защитил кандидатскую диссертацию по теме “Структура и условия возникновения льда на твердых телах” (кандидат геолого-минералогических наук), в 1992 г. – докторскую диссертацию по теме “Закономерности формирования структуры конжеляционных льдов в криосфере Земли” (доктор географических наук). С 1985 г. Владимир Николаевич имел звание ВАК старшего научного сотрудника (доцент по специальности).

Фокусом его научных исследований было изучение зарождения и роста льда в атмосфере, гидросфере и в грунте, а также физических процессов в снежной толще. При этом интересы его были очень широки – от обледенения судов до реакции ледников на изменение климата и влияния снежного покрова на промерзание грунтов. Владимир Николаевич участвовал в экспедиционных исследованиях на Новой Земле, Новосибирских островах, в Антарктиде и на Кавказе. Он являлся научным руководителем более чем десяти грантов. Им воспитаны десятки исследователей, работающих в настоящее время в научных организациях по всей стране. Для студентов географического факультета МГУ В.Н. Голубев читал учебные курсы “Структурное ледоведение” и “Лед в криосфере Земли”.

Владимир Николаевич – автор более 150 научных работ, среди которых учебные пособия “Структурное ледоведение. Теоретические основы конжеляционного льдообразования” (1999) и “Структурное ледоведение. Строение конжеляционных льдов” (2000).

В.Н. Голубев являлся членом диссертационных советов на географическом факультете МГУ и в Институте географии РАН, был членом редколлегии журналов “Криосфера Земли”, “Лед и снег”. В его лице редколлегия журнала “Криосфера Земли” потеряла вдумчивого и тактичного рецензента, замечательного автора.

Владимир Николаевич запомнится всем, знавшим его, как талантливый ученый, внимательный к работе и коллегам.

Коллеги, друзья

СЕРГЕЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ СУХОДОЛЬСКИЙ
(18.01.1925–29.06.2020)



29 июня 2020 г. на 96-м году ушел из жизни видный исследователь и изыскатель в области гидрогеологии, геокриологии и инженерной геологии С.Е. Суходольский. Более 60 лет он посвятил исследованиям в разных регионах России и зарубежья, разработке методик инженерно-гео-криологических полевых исследований, нормативных документов по проведению инженерных изысканий для строительства в области вечно-мерзлых пород.

Сергей Евгеньевич Суходольский родился 18 января 1925 г. Его отец, Евгений Иванович Суходольский (1895–1945), был одним из ведущих сотрудников Комитета по изучению вечной мерзлоты АН СССР, преобразованного позднее в Институт мерзлотоведения им. В.А. Обручева (ИНМЕРО). Это во многом предопределило выбор специальности Сергея Евгеньевича.

В 1950 г. С.Е. Суходольский окончил Московский геолого-разведочный институт им. Серго Орджоникидзе (МГРИ) по специальности “горный инженер-гидрогеолог”. Еще до окончания МГРИ в 1948 г. он приобрел огромный экспедиционный опыт, участвуя в комплексных исследованиях толщ мерзлых горных пород бассейна р. Полуй, проводимых Институтом мерзлотоведения им. В.А. Обручева АН СССР под руководством Александра Иосифовича Попова.

После окончания МГРИ Сергей Евгеньевич был направлен на работу по специальности в Германскую Демократическую Республику для проведения гидрогеологических поисковых работ. После их завершения он поступил в НИС МГРИ

и в должности начальника партии участвовал в исследовании гидрогеокриологических условий эксплуатации флогопитовых месторождений Южной Якутии. В апреле 1953 г. Сергей Евгеньевич поступил на работу в ИНМЕРО в должности младшего научного сотрудника. В течение последующих лет С.Е. Суходольский проводил исследования на севере Сибирской платформы и в Южной Якутии. В год поступления он был включен в состав экспедиции Игарской научно-исследовательской мерзлотной станции (НИМС) института. Поставленная перед сотрудниками экспедиции (Л.С. Хомичевская, К.А. Кондратьева, З.М. Каневский) задача состояла в получении сведений об особенностях гео-криологических условий обширной котловины оз. Ессей Среднесибирского нагорья.

В 1954 г. в пос. Чульман начала работать Алданская НИМС Института мерзлотоведения. Создание станции было связано с началом промышленного освоения угольных и железорудных месторождений Южной Якутии, расположенных в области островного распространения многолетне-мерзлых толщ. Со времени организации станции С.Е. Суходольский три года проработал начальником гидрогеологического отряда. В ходе зимних маршрутов была выявлена серия субквальных выходов подземных вод с дебитами от десятков до первых тысяч литров в секунду, составлен каталог источников. Исследования подтвердили и уточнили представления о благоприятных условиях накопления в недрах бассейна больших запасов подземных вод, на базе которых может быть

организовано крупное водоснабжение промышленных предприятий.

В публикациях и научных отчетах того периода отражены работы Сергея Евгеньевича по изучению гидрогеологических условий сезонно- и многолетнемерзлых горных пород, криогенных процессов и их влияния на условия освоения территории Севера России, совершенствования методов геокриологической съемки и картирования.

С 1957 г. для С.Е. Суходольского начинается период изучения подземных вод и мерзлых пород на европейском Северо-Востоке России. В 1963 г. Сергей Евгеньевич был назначен на должность заведующего лабораторией общего мерзлотоведения Северного отделения ИНМЕРО в Воркуте, а после реорганизации ИНМЕРО в конце 1963 г. – Института оснований и подземных сооружений (НИИОСП) Госстроя СССР. Результатами этих исследований стало множество статей и две монографии (с соавторами): “Геокриологические условия Печорского угольного бассейна” (1964) и “Гидрогеология СССР. Том 27” (1970). Совместно с сотрудниками его отдела (Т.Ф. Иванова, О.П. Овчинников и др.) составлен ряд детальных геокриологических карт Печорского угольного бассейна, в том числе шахтного поля крупнейшей в европейской части России шахты Воргашорская-1.

Главная проблема, которая была поставлена и решалась в этих публикациях: парагенезис подземных вод и многолетнемерзлых горных пород. Задачи взаимодействия подземных вод и мерзлых пород решались и ранее, но Сергей Евгеньевич не только четко сформулировал проблему, но и теоретически обосновал ее на обширном региональном фактическом материале. В 1970 г. по этой теме С.Е. Суходольский защитил диссертацию, и ему была присуждена ученая степень кандидата геолого-минералогических наук, в 1972 г. присвоено звание старшего научного сотрудника.

В 1974–1976 гг. С.Е. Суходольский работал во Всесоюзном институте по строительству трубопроводов (ВНИИСТ), где занимался оценкой инженерно-геологических и геокриологических условий трасс магистральных трубопроводов на Севере России. В публикациях и научно-технических отчетах этого времени Сергеем Евгеньевичем даны конкретные предложения по учету природной обстановки при проектировании.

В 1976 г. Сергей Евгеньевич переходит в отдел инженерно-геокриологических исследований Производственного и научно-исследовательского института по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС) Госстроя СССР. Здесь в должности научного руководителя полевых подразделений института он проводит исследование инженерно-геокриологических условий освоения газоконденсатных месторождений Западной Сибири, прежде всего Бованенковского ГКМ. В соавторстве с И.Д. Стрелецкой и В.В. Ермаковым в

1977 г. С.Е. Суходольский составил первую инженерно-геокриологическую карту этого месторождения масштаба 1:100 000. На ней отражены основные закономерности формирования и распространения многолетнемерзлых грунтов самого крупного месторождения полуострова. В последующие годы в соавторстве (С.Ю. Пармузин, И.Д. Стрелецкая, Н.С. Данилова, И.Л. Кузнецова и др.) составлен альбом разномасштабных специальных геокриологических карт месторождения масштаба от 1:100 000 до 1:5 000. Некоторые из карт опубликованы в монографии “Инженерно-геологический мониторинг промыслов Ямала. Том 2” (1996). Большинство карт сопровождалось рекомендациями по оптимальному размещению объектов обустройства месторождения.

В 1980 г. С.Е. Суходольский подготовил к печати монографию “Парагенезис подземных вод и многолетнемерзлых пород”, ставшую итогом его многолетних исследований этой проблемы.

В июне 1980 г. С.Е. Суходольский был переведен в лабораторию инженерно-гидрогеологических исследований для разработки темы по изучению подтопления застраиваемых северных территорий. Совместно с проф. Е.С. Дзекцером им предложены профилактические мероприятия по борьбе с подтоплением в Западной Сибири. В 1983 г. Сергей Евгеньевич вернулся на прежнюю должность старшего научного сотрудника в лабораторию геокриологического прогноза ПНИИИС. В этом же году он завершил составление СНиП по изысканиям трубопроводов в сложных условиях и разработал классификатор опасных криогенных процессов.

В 1985–1987 гг. С.Е. Суходольский подготовил к печати несколько основных глав и разделов монографии “Геокриология СССР. Европейская территория СССР”, опубликованной издательством “Недра” в 1988 г. В это же время он участвовал в разработке разделов СНиП 02-07-87 “Инженерные изыскания для строительства” и пособия к нему.

В 1987 г. С.Е. Суходольский через Внешнеэкономическое объединение “Внештехника” был командирован в Монгольскую Народную Республику, где проработал два года. Он проводил полевые наблюдения в районах распространения многолетнемерзлых пород и глубокого зимнего промерзания, постоянно вел учебно-консультационную работу с изыскателями, проектировщиками, строителями Монголии. Результаты исследований закономерностей формирования и распространения многолетнемерзлых пород Монголии доложены на совещаниях в Монголии и России, а также отражены в монографии “Основы геокриологии. Часть III” (1998).

Накопленный многолетний опыт инженерно-геологических изысканий в районах с разными геокриологическими условиями был использован С.Е. Суходольским при разработке нормативных

документов и рекомендаций. В соавторстве с Г.И. Дубиковым составлен раздел СНиП 11-02-96 “Инженерные изыскания для строительства”, а затем СП 11-105-97 “Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть IV. Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов” (Г.И. Дубиков, С.М. Микляев и др.).

С.Е. Суходольский награжден медалью “Ветеран труда”, в 1999 г. ему присвоено звание “Почетный строитель России”.

С начала 2000-х гг. деятельность Сергея Евгеньевича была направлена на методические разработки для мелко- и среднемасштабного картирования для инженерно-геокриологического обеспечения проектирования трубопроводов в разных зональных и региональных природных условиях Сибири и Дальнего Востока. Совместно с сотрудниками отдела геокриологических исследований ПНИИИС Н.В. Ивановой, И.Л. Кузнецовой, Ф.М. Ривкиным он разработал методику инженерно-геологического картирования, учитывающую специфику строительства трубопроводов большой протяженности. Основы методики изложены в статье, опубликованной в журнале “Криосфера Земли” (2003). По этой методике С.Е. Суходольским и сотрудниками ПНИИИС был составлен ряд инженерно-геологических карт трасс большой протяженности (ВСТО, железной дороги от г. Лабитнанги до пос. Полуночное и др.).

На пенсию Сергей Евгеньевич вышел только в 2009 г. За время трудовой деятельности им опубликовано около 90 работ, в том числе упомянутая выше монография и 7 коллективных монографий.

С.Е. Суходольский являлся также одним из соавторов опубликованной Издательством МГУ “Геокриологической карты России и сопредельных территорий”. Сергеем Евгеньевичем неформально воспитаны и обучены многие молодые специалисты, научные сотрудники и инженеры. Как во время трудовой деятельности, так и после выхода на пенсию он с большим интересом следил за профессиональной деятельностью коллег, давал ценные рекомендации и делился примерами из личного опыта. Для тех, кто знал Сергея Евгеньевича, работал с ним в поле, он был образцом порядочности и интеллигентности. Его научные знания и громадный жизненный опыт сочетались с неизменным и неиссякаемым жизнелюбием. Обыденный производственный процесс, написание отчетов и нормативных документов Сергей Евгеньевич обогащал высокой научной значимостью, а доброе чувство юмора, ставшие крылатыми ироничные фразы и замечания приносили легкость и позитив при решении сложных исследовательских задач.

Обладая широким научным кругозором, Сергей Евгеньевич был богатой творческой личностью, умел организовать, сплотить и увлечь коллег по работе не только для выполнения трудовых задач, но и для проведения разнообразных культурных программ на многочисленных праздниках, будь то поездка за город, встреча Нового года или 8 Марта. Его участие всегда было залогом новых интересных задумок и решений. Он основал многие добрые традиции, которые продолжают жить и развиваться в коллективах, где трудятся его ученики и последователи.

Коллеги, друзья

СОДЕРЖАНИЕ ТОМА XXIV

К 80-летию академика В.П. Мельникова	4
<i>КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ КРИОЛОГИИ</i>	
Мельников В.П., Федоров Р.Ю. Воззрения на холод в истории познания природы: от спекулятивного знания к криософии	6
<i>ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ</i>	
Фотиев С.М. Дискуссионные проблемы геокриологии: обзор достижений	3
<i>РЕГИОНАЛЬНАЯ И ИСТОРИЧЕСКАЯ ГЕОКРИОЛОГИЯ</i>	
Васильчук Ю.К., Васильчук А.К. Изотопно-геохимический состав повторно-жильных льдов склоновой едомы хребта Кулар и реконструкция среднеянварской палеотемпературы воздуха 47–25 тысяч лет назад	3
Васильчук Ю.К., Васильчук А.К. Сингенетические повторно-жильные льды и возраст склоновой едомы в предгорье хребта Кулар	2
Железняк М.Н., Шац М.М., Сериков С.И., Сысолятин Р.Г., Скачков Ю.Б., Жижин В.И. Высотная геотемпературная поясность Центрального Алтая	3
<i>ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ В КРИОЛИТОЗОНЕ</i>	
Голубева Е.М., Кондратьева Л.М., Шгарева А.В., Крутикова В.О. Особенности распределения токсичных элементов во льдах реки Амур	5
<i>ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ</i>	
Васильев А.А., Гравис А.Г., Губарьков А.А., Дроздов Д.С., Коростелев Ю.В., Малкова Г.В., Облогов Г.Е., Пономарева О.Е., Садуртдинов М.Р., Стрелецкая И.Д., Стрелецкий Д.А., Устинова Е.В., Широков Р.С. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в западном секторе российской Арктики	2
<i>ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ И ВО ЛЬДУ</i>	
Чувилин Е.М., Соколова Н.С., Буханов Б.А., Истомин В.А., Мингареева Г.Р. Определение температуры начала замерзания грунтов на основе измерения потенциала поровой воды	6
Чувилин Е.М., Соколова Н.С., Буханов Б.А., Шевчик Ф.А., Истомин В.А., Мухаметдинова А.З., Алексеев А.Г., Гречищева Э.С. Применение водно-потенциометрического метода для определения содержания незамерзшей воды в мерзлых грунтах различного состава	5
<i>ГЕОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ И ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КРИОСФЕРЕ</i>	
Каверин Д.А., Пастухов А.В., Новаковский А.Б. Особенности современного температурного режима почвогрунтов на участке пересечения бугристого торфяника автодорогой на юге Большеземельской тундры	1
<i>ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБРАЗОВАНИЯ</i>	
Баду Ю.Б., Никитин К.А. Бугры пучения на площади газоносных структур севера Западной Сибири	6
Марахтанов В.П. Сдвиговый механизм роста многолетних инъекционных бугров пучения	1
<i>КРИОПЕДОЛОГИЯ</i>	
Каверин Д.А., Пастухов А.В., Марущак М., Биязи К., Новаковский А.Б. Влияние микроклиматических и ландшафтных изменений на температуру и глубину сезонного протаивания почв при полевом эксперименте в Большеземельской тундре	4
<i>КРИОЛИТОГЕНЕЗ</i>	
Бутаков В.И., Слагода Е.А., Опокина О.Л., Томберг И.В., Жученко Н.А. Особенности формирования гидрохимического и микроэлементного состава разных типов подземных льдов мыса Марре-Сале	5

Ларин С.И., Алексеева В.А., Лаухин С.А., Ларина Н.С., Гусельников В.Л. Особенности формирования состава реликтовых грунтовых жил в основании покровных отложений лесостепного Притоболья	4
<i>КРИОГЕННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МОРЯХ И ОКЕАНАХ</i>	
Федоров В.М., Гребенников П.Б., Фролов Д.М. Оценка роли инсоляционного фактора в изменениях площади морских льдов в российской Арктике	3
Федоров В.М., Фролов Д.М. Связь изменения площади морских льдов в Северном полушарии и общего содержания озона в атмосфере	2
Харитонов В.В., Бородкин В.А. Стамухи: термины и методы исследования	4
<i>ПОВЕРХНОСТНЫЕ И ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ СУШИ</i>	
Глотов В.Е., Ушаков М.В. Климатически обусловленные изменения стока заполярных рек Западной Чукотки	6
Макарьева О.М., Лебедева Л.С., Виноградова Т.А. Моделирование процессов формирования стока на малых горных водосборах криолитозоны (по материалам Колымской водно-балансовой станции)	1
<i>ГАЗЫ И ГАЗОВЫЕ ГИДРАТЫ В КРИОСФЕРЕ ЗЕМЛИ</i>	
Давлетшина Д.А., Чувиллин Е.М. Экспериментальная оценка возможности газогидратообразования в тонкодисперсных грунтах при отрицательных температурах	4
Чувиллин Е.М., Гребенкин С.И., Давлетшина Д.А., Жмаев М.В. Влияние гидратообразования на изменение газопроницаемости мерзлых песчаных пород	2
Чувиллин Е.М., Давлетшина Д.А., Буханов Б.А., Гребенкин С.И., Огиенко М.В., Бадец К., Станиловская Ю.В. Влияние состава и давления газа на теплофизические свойства газонасыщенного песчаного грунта в мерзлом и талом состояниях	1
<i>ИНЖЕНЕРНАЯ КРИОЛОГИЯ</i>	
Аникин Г.В., Мочалов Д.В. Оценка эффективности системы типа “ГЕТ” с углекислотой и аммиаком в качестве хладагента	2
Аникин Г.В., Спасенникова К.А. Оценка эффективности работы системы “ГЕТ”	5
Ашпиз Е.С., Хрусталева Л.Н. Предотвращение деградации многолетнемерзлых грунтов в основании насыпей железных дорог	5
Мельников В.П., Аникин Г.В., Ишков А.А., Андрианов И.Е., Гуртовой В.А. Исследование режимов течения диоксида углерода в системах температурной стабилизации грунтов в зависимости от тепловой нагрузки	3
Нерадовский Л.Г. Изменение фоновой температуры мерзлых грунтов в Якутске в период потепления климата в Сибири (1976–2011)	4
<i>СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ПОРОД И ЛЬДА</i>	
Галанин А.А. Стабильные изотопы ¹⁸ O и D в пещерных льдах Национального парка “Ленские Столбы” (Восточная Сибирь)	1
<i>СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ</i>	
Докукин М.Д., Калов Р.Х., Черноморец С.С., Гяургиев А.В., Хаджиев М.М. Снежно-ледово-каменная лавина на леднике Башкара в ущелье Адыл-Су (Центральный Кавказ) 24 апреля 2019 года	1
Терехов А.В., Демидов В.Э., Казаков Э.Э., Анисимов М.А., Веркулич С.Р. Определение баланса массы ледника Вёринг (Западный Шпицберген) геодезическим методом, 2013–2019 годы	5
Чернов Р.А., Муравьев А.Я. Природная катастрофа ледниково-подпрудного озера Спартаковское на острове Большевик (Северная Земля).	4
<i>МИКРОБИОЛОГИЯ КРИОСФЕРЫ</i>	
Ривкина Е.М., Абрамов А.А. Метан как индикатор условий формирования мерзлых отложений Антарктиды	3
<i>МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ</i>	
Копылов Д.В., Садуртдинов М.Р. Изучение талика под малым водотоком методом бесконтактной электроразведки	6
Панькова Д.С., Оленченко В.В., Цибизов Л.В., Камнев Я.К., Шеин А.Н., Сеницкий А.И. Строение многолетнемерзлой толщи в районе стационара Парисенто (Гыданский полуостров) по геофизическим данным.	2

ХРОНИКА

Алексеева О.И., Гулый С.А., Шепелев В.В., Железняк М.Н., Хименков А.Н. Георгий Захарович Перльштейн (05.10.1937–26.08.2020)	6
Голубев Владимир Николаевич (08.08.1937–24.07.2020)	6
Дубровин В.А. Пармузин Станислав Юрьевич (07.03.1946–11.10.2019)	3
Оспенников Е.Н., Гордеева Г.И. Гарагуля Людмила Семеновна (10.12.1934–30.06.2019)	2
Павлова О.П., Ривкин Ф.М. Владимир Викторович Баулин (18.01.1932–11.01.2020)	4
Рогов В.В., Зотова Л.И., Стрелецкая И.Д., Белова Н.Г. Вячеслав Николаевич Конищев (14.02.1938–21.07.2020)	6
Суходольский Сергей Евгеньевич (18.01.1925–29.06.2020)	6

РЕЦЕНЗИЯ

Алексеева О.И. Рецензия на монографию Р.В. Чжана, С.А. Великина, Г.И. Кузнецова, Н.В. Крук “Грунтовые плотины в криолитозоне России”	5
---	---

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ ТОМА XXIV

- Абрамов А.А. 3, 51
 Алексеев А.Г. 5, 16
 Алексеева В.А. 4, 5
 Алексеева О.И. 5, 64; 6, 57
 Андрианов И.Е. 3, 58
 Аникин Г.В. 2, 48; 3, 58; 5, 51
 Анисимов М.А. 5, 55
 Ашпиз Е.С. 5, 45
- Бадец К. 1, 57
 Баду Ю.Б. 6, 21
 Белова Н.Г. 6, 55
 Биазы К. 4, 34
 Бородкин В.А. 4, 19
 Бутаков В.И. 5, 29
 Буханов Б.А. 1, 57; 5, 16; 6, 11
- Васильев А.А. 2, 15
 Васильчук А.К. 2, 3; 3, 25
 Васильчук Ю.К. 2, 3; 3, 25
 Веркулич С.Р. 5, 55
 Виноградова Т.А. 1, 43
- Галанин А.А. 1, 3
 Глотов В.Е. 6, 33
 Голубева Е.М. 5, 3
 Гордеева Г.И. 2, 68
 Гравис А.Г. 2, 15
 Гребенкин С.И. 1, 57; 2, 40
 Гребенников П.Б. 3, 38
 Гречищева Э.С. 5, 16
 Губарьков А.А. 2, 15
 Гульй С.А. 6, 57
 Гуртовой В.А. 3, 58
 Гусельников В.Л. 4, 5
 Гяргиев А.В. 1, 64
- Давлетшина Д.А. 1, 57; 2, 40; 4, 25
 Демидов В.Э. 5, 55
 Докукин М.Д. 1, 64
 Дроздов Д.С. 2, 15
 Дубровин В.А. 3, 58
- Железняк М.Н. 3, 18; 6, 57
 Жижин В.И. 3, 18
 Жмаев М.В. 2, 40
 Жученко Н.А. 5, 29
- Зотова Л.И. 6, 55
- Истомин В.А. 5, 16; 6, 11
 Ишков А.А. 3, 58
- Каверин Д.А. 1, 23; 4, 34
 Казаков Э.Э. 5, 55
- Калов Р.Х. 1, 64
 Камнев Я.К. 2, 52
 Кондратьева Л.М. 5, 3
 Копылов Д.В. 6, 45
 Коростелев Ю.В. 2, 15
 Крутикова В.О. 5, 3
- Ларин С.И. 4, 5
 Ларина Н.С. 4, 5
 Лаухин С.А. 4, 5
 Лебедева Л.С. 1, 43
- Макарьева О.М. 1, 43
 Малкова Г.В. 2, 15
 Марахтанов В.П. 1, 34
 Марущак М. 4, 34
 Мельников В.П. 3, 58; 6, 3
 Мингареева Г.Р. 6, 11
 Мочалов Д.В. 2, 48
 Муравьев А.Я. 4, 58
 Мухаметдинова А.З. 5, 16
- Нерадовский Л.Г. 4, 46
 Никитин К.А. 6, 21
 Новаковский А.Б. 1, 23; 4, 34
- Облогов Г.Е. 2, 15
 Огиенко М.В. 1, 57
 Оленченко В.В. 2, 52
 Опокина О.Л. 5, 29
 Оспенников Е.Н. 2, 68
- Павлова О.П. 4, 69
 Панькова Д.С. 2, 52
 Пастухов А.В. 1, 23; 4, 34
 Пономарева О.Е. 2, 15
- Ривкин Ф.М. 4, 69
 Ривкина Е.М. 3, 51
 Рогов В.В. 6, 55
- Садуртдинов М.Р. 2, 15; 6, 45
 Сериков С.И. 3, 18
 Синицкий А.И. 2, 52
 Скачков Ю.Б. 3, 18
 Слагода Е.А. 5, 29
 Соколова Н.С. 5, 16; 6, 11
 Спасенникова К.А. 5, 51
 Станиловская Ю.В. 1, 57
 Стрелецкая И.Д. 2, 15; 6, 55
 Стрелецкий Д.А. 2, 15
 Сысолятин Р.Г. 3, 18
- Терехов А.В. 5, 55
 Томберг И.В. 5, 29

Устинова Е.В. 2, 15
Ушаков М.В. 6, 33

Федоров В.М. 2, 31; 3, 38
Федоров Р.Ю. 6, 3
Фотиев С.М. 3, 3
Фролов Д.М. 2, 31; 3, 38

Хаджиев М.М. 1, 64
Харитонов В.В. 4, 19
Хименков А.Н. 6, 57
Хрусталеv Л.Н. 5, 45

Цибизов Л.В. 2, 52

Чернов Р.А. 4, 58
Черноморец С.С. 1, 64
Чувилин Е.М. 1, 57; 2, 40; 4, 25; 5, 16; 6, 11

Шац М.М. 3, 18
Шевчик Ф.А. 5, 16
Шеин А.Н. 2, 52
Шепелев В.В. 6, 57
Широков Р.С. 2, 15
Штарева А.В. 5, 3