

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1991 ГОДА

3'2019

АРКТИЧЕСКАЯ ЗОНА РОССИИ

ARCTIC ZONE OF RUSSIA



MINERAL RESOURCES OF RUSSIA. ECONOMICS & MANAGEMENT

FUEL, ENERGY & MINERAL RESOURCES • CURRENT STATE & DEVELOPMENT PROSPECTS • ECONOMICS • LEGISLATION

СОДЕРЖАНИЕ CONTENTS

3'2019 (166)

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК

АРКТИЧЕСКАЯ ЗОНА РОССИИ

ARCTIC ZONE OF RUSSIA



- 6–7 **Кобылкин Д.Н.** О роли минеральных ресурсов Арктической зоны в развитии экономики Российской Федерации
Kobilkin D.N. About the role of mineral resources of the Arctic zone in the development of the RF economy
- 8–13 **Аракчеев Д.Б., Ковтонюк Г.П., Ткачева Е.А., Анисимова А.Б., Коробко Е.И., Амелина О.И., Михайлова Г.А.** Геологическая, геофизическая и геохимическая изученность Арктической зоны России
Arakcheev D.B., Kovtonuk G.P., Tkacheva E.A., Anisimova A.B., Korobko E.I., Amelina O.I., Michaylova G.A. Geological, geophysical and geochemical studying of the Russian Arctic zone
- 14–28 **Прищепа О.М., Меткин Д.М., Боровиков И.С.** Углеводородный потенциал Арктической зоны России и перспективы его освоения
Prishepa O.M., Metkin D.M., Borovikov I.S. Hydrocarbon potential of the Russian Arctic area – prospects and the future development
- 29–33 **Логвинов М.И.** Стратегические приоритеты освоения угольного ресурсного потенциала Арктической зоны России
Logvinov M.I. Strategic priorities of assimilation of coal resource potential of the Russian Arctic zone
- 34–45 **Машковцев Г.А., Спорыхина Л.В., Быховский Л.З.** Состояние, перспективы использования и развития сырьевой базы твердых полезных ископаемых Арктической зоны России
Mashkovtsev G.A., Sporykhina L.V., Bykhovsky L.Z. The condition, prospects of use and development of the ore mineral raw materials base of the Russian Arctic zone
- 48–54 **Поселов В.А., Каминский В.Д., Жолондз С.М., Буценко В.В., Смирнов О.Е., Фирсов Ю.Г., Зинченко А.Г.** Обоснование юридического шельфа Российской Федерации в Северном Ледовитом океане
Poselov V.A., Kaminsky V.D., Zholondz S.M., Butsenko V.V., Smirnov O.E., Firsov Yu.G., Zinchenko A.G. Proof of the legal shelf of the Russian Federation in the Arctic Ocean
- 55–64 **Дубровин В.А., Брушков А.В., Дроздов Д.С., Железняк М.Н.** Изученность, современное состояние, перспективы и проблемы освоения криолитозоны Арктики
Dubrovin V.A., Brushkov A.V., Drozdov D.S., Zheleznyak M.N. Study, current state, future and challenges of development of permafrost in the Arctic
- 65–71 **Липина С.А., Череповицын А.Е., Липина А.В.** Концептуальные экологические аспекты развития арктических территорий как ключевые приоритеты модернизации России
Lipina S.A., Cherepovitsyn A.E., Lipina A.V. Conceptual environmental aspects of Arctic territories development as the key priorities of Russia's modernization
- 72–79 **Омаров Г.З., Крючек С.И., Фаррахов А.З., Дудиков М.В.** О состоянии и проблемах правового регулирования недропользования в Арктической зоне
Omarov G.Z., Kryuchek S.I., Farrakhov A.Z., Dudikov M.V. About the condition and problems of the subsoil use legal regulation in the Arctic zone

АКТУАЛЬНЫЕ НОВОСТИ NEWS

- 80 Геологическое изучение архипелага Шпицберген (АО "ПМГРЭ")

УДК 551.345(211-17)

Изученность, современное состояние, перспективы и проблемы освоения криолитозоны Арктики

В.А. Дубровин (ФГБУ "Гидроспецгеология", Москва), **А.В. Брушков** (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва), **Д.С. Дроздов** (Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН, Тюмень), **М.Н. Железняк** (Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН, Якутск)

Приведены сведения о значительных изменениях криолитозоны в результате потепления климата в последние десятилетия. Показано, что изученность вечной мерзлоты геолого-съёмочными работами и мониторинговыми наблюдениями остается крайне недостаточной, абсолютно не соответствующей современным темпам освоения Арктики и потребностям в детальной актуальной геокриологической информации. Оконтурен комплекс природных, технических, экономических, геозоологических, финансовых проблем, связанных с недостатками изучения и мониторинга мерзлоты. Рекомендована разработка межведомственной программы площадных съёмочных и стационарных режимных исследований компонентов природной обстановки и совокупности инженерных систем, влияющих на криолитозону. Предложено создание единого Центра для координации выполнения программы, законодательно наделенного соответствующими полномочиями.

Ключевые слова: Арктика; Субарктика; Арктическая зона РФ; многолетняя (вечная) мерзлота; многолетнемерзлые горные породы; потепление климата; таяние приповерхностной мерзлоты; недропользование; техногенез; программа изучения и сохранения криогенных ландшафтов и мерзлоты; единый координирующий центр; законодательное обеспечение.



Владимир Александрович ДУБРОВИН,
главный специалист,
кандидат геолого-минералогических наук



Анатолий Викторович БРУШКОВ,
заведующий кафедрой геокриологии
геологического факультета,
доктор геолого-минералогических наук,
профессор



Дмитрий Степанович ДРОЗДОВ,
заместитель директора,
доктор геолого-минералогических наук



Михаил Николаевич ЖЕЛЕЗНЯК,
директор,
доктор геолого-минералогических наук

Вечная мерзлота, или криолитозона – верхняя часть земной коры, характеризующаяся отрицательной температурой почв и горных пород различного состава и генезиса, одна часть которых находится в многолетнемерзлом состоянии и содержит лед-цемент, тонкие ледяные прослои – шлиры и макроледяные тела мощностью до десятков и протяженностью до сотен метров, другая часть включает незамерзающие растворы разнообразного химического состава [1].

Территория вечной мерзлоты занимает около 65 % площади нашей страны – 11 млн км². Это больше, чем территории таких стран, как Канада, США или Китай.

Устойчивость криолитозоны к воздействиям естественно-исторических колебаний климата или техногенеза в процессе освоения зависит, прежде всего, от температу-

ры горных пород, содержания и распределения в них подземного льда, разрушающегося при переходе температуры горных пород к положительным значениям. Разнообразное сочетание льдонасыщенности вмещающих горных пород (от нескольких до 90 %) и температурного режима (от 0 до -16°С) обуславливает в различных природных зонах развитие криогенных геологических процессов и явлений. Некоторые из них, такие как термоабразия, термоэрозия, наледи и оползни-сплывы, следует отнести к достаточно мощным рельефоформирующим факторам, способным за относительно короткое время существенно изменить внешний облик природного ландшафта. Другие процессы (пучение, термокарст и др.) менее заметно протекают в естественной обстановке, но пораженность ими отдельных регионов достигает 50 % [1, 2].

Гидрогеологические условия в криолитозоне резко дифференцируются в зависимости от сплошности распространения многолетнемерзлых пород (ММП). Так, в зоне сплошного развития мерзлых толщ практически все гидрогеологические структуры и водоносные горизонты пресных подземных вод проморожены, а подмерзлотные воды во многих случаях засолены. В зонах прерывистого и островного распространения мерзлоты, мощности ММП существенно сокращаются, и гидрогеологическая обстановка отличается значительной пестротой как в плане, так и в разрезе. Ограничения зон питания подземных вод за счет мерзлого экрана отрицательно сказывается на процессах водообмена и ресурсном потенциале месторождений подземных вод. В то же время мерзлые приповерхностные горизонты могут препятствовать загрязнению эксплуатируемых подземных водозаборов.

Инженерно-геологические условия и свойства дисперсных мерзлых грунтов практически всецело определяются величиной льдистости, засоленности и температурным режимом в годовом и многолетних циклах.

Состояние проблемы

Современное состояние и пути совершенствования экономики страны в границах среднесрочной и долгосрочной перспективы во многом будут определяться успехами развития топливно-энергетического комплекса и недропользования в целом на территории арктической криолитозоны.

Существующая стратегия освоения Арктической зоны РФ. Примерно 3,5 млн км², или 85 % территории Арктической зоны – область сплошного распространения ММП. Мощность криогенной толщи здесь достигает своих максимальных значений (до 1,5 км) и в среднем изменяется от 250 до 400 м.

В толщах вечной мерзлоты и под ней скрыта большая часть минерально-сырьевых ресурсов страны – золото, олово, ртуть, алмазы, нефть, газ и т.п. Независимо от способов и технологии их добычи, на площадях освоения на поверхности земли и в недрах происходят значительные геоэкологические изменения, в большинстве случаев мало контролируемые, поэтому опасные и разрушительные как для естественной среды, так для инженерных объектов и традиционных социумов.

В феврале 2013 г. во исполнение Основ государственной политики России в Арктике (2008), Президентом РФ утверждена "Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года" (далее – Стратегия). Правительством РФ в сентябре 2016 г. утвержден план реализации этого основополагающего документа, который предусматривает совершенствование условий деятельности российских компаний на арктическом шельфе, сохранение и развитие российского ледокольного флота, создание новых портово-производственных комплексов и модернизацию арктических портов, развитие транспортного сообщения.

К приоритетным направлениям развития Арктической зоны относятся:

- комплексное социально-экономическое развитие региона;

- развитие науки и технологий;
- создание современной информационно-телекоммуникационной инфраструктуры;
- обеспечение экологической безопасности;
- международное сотрудничество в Арктике;
- обеспечение военной безопасности и охрана государственной границы РФ в Арктике.

В настоящее время близок к утверждению Национальный проект "Экология", в котором из 10 федеральных программ к территории Арктической зоны можно отнести четыре: "Чистая страна", "Чистый воздух", "Питьевая вода" и "Строительство объектов по сортировке и переработке ТКО", но ни в одном из них не упоминается вечная мерзлота Арктики.

Следует отметить, что в утвержденной Стратегии среди ключевых факторов, оказывающих влияние на социально-экономическое развитие Арктической зоны, отмечены "экстремальные природно-климатические условия, включая низкие температуры воздуха, сильные ветры и наличие ледяного покрова на акватории арктических морей", но совершенно не упоминается вечная мерзлота, как будто она не существует в природе.

Вместе с тем влияние криолитозоны на формирование экологической обстановки при недропользовании априори является определяющим. Таковы особенности и свойства вечной мерзлоты. Однако, несмотря на чрезвычайную чувствительность криолитозоны к перестройке экологической обстановки при недропользовании, строительстве и эксплуатации промышленных и гражданских объектов, создании рекреаций и т.п., до сих пор не существует ни одной государственной программы комплексного ее изучения. А ведь внедрение интенсивного техногенеза в последние 35-45 лет в ранее необжитые, труднодоступные и малоизученные арктические регионы криолитозоны возлагает на государство и общество особую ответственность за экологическое состояние и сохранность этих территорий [3].

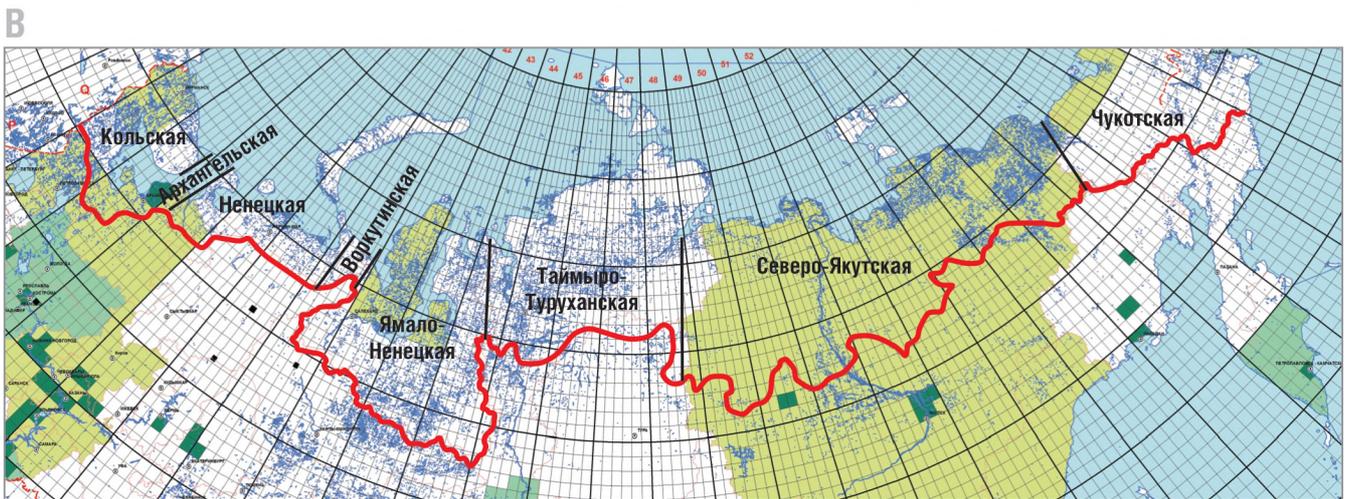
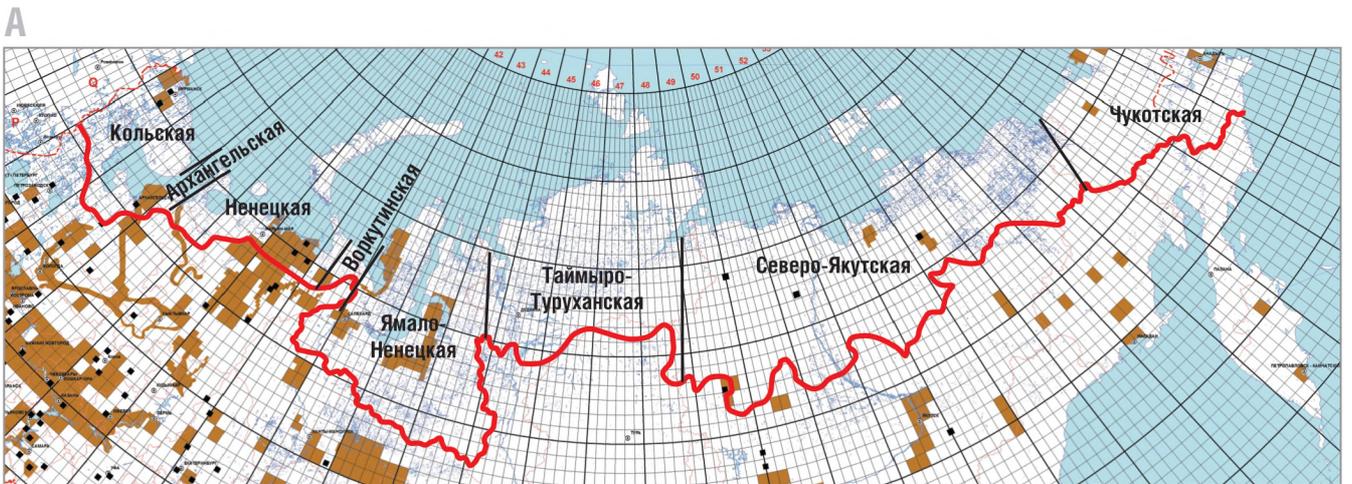
Из многочисленных проблем изучения и освоения арктической криолитозоны, которые могут серьезно усложнить дальнейшее продвижение и развитие недропользования, включая топливно-энергетический комплекс страны в высоких широтах, остановимся на главных, которые можно отнести к "системным проблемам".

Государственное геологическое изучение недр – эта главная задача, десятилетиями стоявшая перед Министерством геологии СССР (в настоящее время в компетенции Минприроды России и Роснедр), особенно в части экологически значимых исследований, существенным образом изменилась и трансформировалась.

На рис. 1 приведены картограммы изученности инженерно-геологическими работами масштабов 1:200 000; 1:500 000-1:1 000 000 и эколого-геологическими масштабов 1:50 000 и 1:50 000-1:1 000 000, входящими в состав комплексных работ на территории Арктической зоны.

В Арктике на шельфе и на суше выдано 407 лицензий на углеводородное сырье и 248 лицензий на пользование недрами с целью геологического изучения, разведки и добычи твердых полезных ископаемых. Выдавая лицензии, государство утратило контроль в вопросах регионального и мониторингового геологического изучения недр. Не-

Рис. 1. Карты изученности Арктической зоны России



Вид изученности	Масштаб работ			
	1:50 000	1:100 000-1:200 000	1:500 000	1:1 000 000
Инженерно-геологическая	■	■	■	■
Эколого-геологическая	■	■	■	■

 опорная зона развития

А, Б – картограммы изученности инженерно-геологическими работами масштабов 1:50 000–1:200 000 (А) и 1:500 000–1:1 000 000 (Б); В – картограмма изученности эколого-геологическими работами масштабов 1:50 000–1:1 000 000

выполнение значительного объема работ в рамках лицензионных соглашений заставило правительство принять решение о временном моратории на предоставление в пользование новых участков недр континентального шельфа. Но планомерное изучение так и не началось: цели и задачи в части, касающейся картирования и мониторинга криолитозоны в лицензионных соглашениях полностью отсутствуют либо носят декларативный характер и не требуют выполнения каких-либо работ. Кроме того, научные организации, занимающиеся исследованием мерзлоты, не имеют доступа к материалам и проведению работ на большинстве лицензионных участках

Напомним, что в "не мерзлой" зоне России основополагающим первоначальным документом для постановки и проведения изысканий являются материалы гидрогеологической и инженерно-геологической съемок масштаба 1:200 000 (и крупнее). Здесь такие съемки входят в обязательный комплекс работ на территории, и это требование выполняется неукоснительно. Для арктических регионов и большей части криолитозоны России в целом, которые несравненно более сложны для промышленного и гражданского строительства, исходным материалом для характеристики мерзлотных условий на стадии предпроектной подготовки является не "двухсоттысячные" карты, а "Геокриологическая карта СССР масштаба 1:2 500 000", составленная еще в начале 1980-х и изданная в 1990-х гг.

Геокриологическая, гидрогеологическая и инженерно-геологическая изученность и картографирование в необходимых масштабах Арктической зоны остается крайне низкой, не соответствующей перспективным задачам освоения Арктики. Это видно по структуре Государственного мониторинга состояния недр (ГМСН) Федерального агентства по недропользованию, включающего мониторинг: подземных вод; опасных экзогенных геологических процессов; опасных эндогенных геологических процессов. Мониторинг криолитозоны до сих пор не фигурирует в системе ГМСН. Подразумевается, что он должен входить в подраздел "мониторинг опасных экзогенных геологических процессов", что абсолютно не верно. Давно назрела необходимость соответствующей редакции этого нормативного документа, утвержденного Роснедрами от 24.11.2005.

Неудовлетворителен объем мониторинговой сети, которая в системе ГМСН Роснедр в Арктике включает только два объекта – Воркутинский мерзлотно-гидрогеологический полигон и геокриологический стационар (полигон) Марре-Сале на западном побережье Центрального Ямала близ полярной гидрометеорологической станции Марре-Сале (рис. 2).

Геокриологический стационар Марре-Сале был создан в 1978 г. ВСЕГИНГЕО в связи с проведением опытно-методических региональных инженерно-геокриологических работ на п-ове Ямал по заданиям Мингазпрома и Мингео СССР

Рис. 2. Схема размещения наблюдательных сетей мониторинга криолитозоны Арктики



и является фоновым объектом мониторинга для большей части территории Центрального и Западного Ямала [4, 5].

В связи с фактической ликвидацией ВСЕГИНГЕО в 2017 г. (в "год экологии России") геокриологические наблюдения на Марре-Сале переданы ФГБУ "Гидроспецгеология" и выполняются в настоящее время в рамках государственных контрактов по заданию Роснедр.

Основная задача функционирования полигона Марре-Сале – изучение динамики теплового состояния мерзлых толщ в арктической криолитозоне, закономерностей сезонного протаивания грунтов и криогенных процессов, из которых важнейшие связаны с разрушением коренного берега в результате термоабразии и термоэрозии.

Воркутинский мерзлотно-гидрогеологический полигон требует в настоящее время реконструкции и приборного переоснащения наблюдательной сети.

Мониторинг криолитозоны в системе СО РАН. Наиболее масштабная наблюдательная сеть геокриологического мониторинга в криолитозоне принадлежит Институту мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. В Центральной и Южной Якутии она представлена полутора десятками действующих стационаров, из которых Чабыда, Якутск, Улахан-Тарын, Нелегер и др. ведут наблюдения с середины 1980-х гг. В северной части Республики Саха (Якутия) всего два стационара: Игарка и Самойловский. Там также действуют 5 наблюдательных участков регулярного посещения, из которых особо следует выделить Тикси, где комплексные наблюдения осуществляются на стационаре Института космофизических исследований и аэронауки СО РАН. Кроме того, Институт мерзлотоведения СО РАН располагает многочисленными площадками из наблюдательных скважин периодического обследования на Таймыре, Северной Якутии и Чукотке.

Институт криосферы Земли СО РАН ведет мониторинговые геокриологические наблюдения на Европейском Севере (мыс Болванский, а также Кумжа, Шапкина) и Западной Сибири (Васькины Дачи, Надым, Уренгой и др.).

Новосибирский институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН совместно с Институтом мерзлотоведения СО РАН с 2014 г. выполняет комплексные научные исследования на о-ве Самойловский в дельте р.Лена, ориентированные на изучение многолетней мерзлоты.

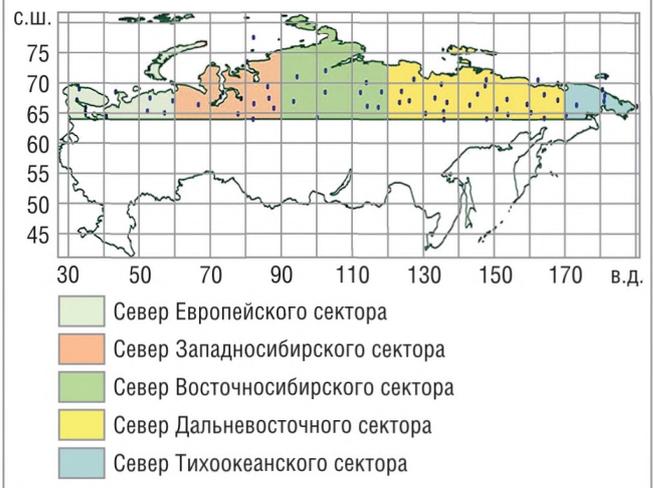
Климатические изменения в Арктике

Циклические изменения – характеристическая особенность климата. Уже второе столетие длится повышение температуры с градиентом 0,6-0,7°C за 100 лет. При этом лишь за последнее десятилетие из-за наложения климатических флуктуаций разной продолжительности средняя температура воздуха повысилась на несколько десятых градуса. На севере страны это повышение больше, чем на юге, и за последние 30-40 лет оно составило около 2°C.

Территория Арктической зоны севернее 64° с.ш. разбита на 5 климатических секторов (рис. 3).

Изменения температуры воздуха на Севере Европейского сектора. Для анализа изменения температуры воздуха в высоких широтах европейской территории России были выбраны 10 длиннорядных репрезентативных станций: Сыктывкар, Нарьян-мар, Усть-Цильма, Хоседа-Хард,

Рис. 3. Климатические сектора Арктической зоны России



Мурманск, Малые Кармакулы, Гридино, Кемь, Канин Нос, Архангельск. Станции начали работать в разные годы, но с 1950-х гг. все они действуют в одном режиме.

В 1920-1930 гг. температурный режим превышал среднее значение по региону, затем до середины 1970-х гг. отмечалось похолодание, сменившееся потеплением, продолжающимся по настоящее время (рис. 4).

Рис. 4. Изменение средней скользящей по 5 годам температуры воздуха на Севере Европейского сектора



Изменения температуры воздуха на Севере Западно-сибирского сектора. Для анализа изменения температуры воздуха были выбраны 11 длиннорядных репрезентативных станций, расположенных в пунктах: Салехард, Марре-Сале, Новый Порт, Тазовский, Туруханск, Дудинка, Игарка, Норильск, Диксон, Хатанга, Се-Яха. Размах колебаний среднегодовой температуры воздуха относительно условного среднегодового значения по региону (-9°C) намного значительнее, чем на Севере Европейского сектора (рис. 5). По данным приведенных метеостанций начиная с 1950-х гг. наблюдалось похолодание, сменившееся в 1980-е гг. ростом температуры воздуха. Начавшееся потепление отчетливо прослеживается до сих пор.

Рис. 5. Изменение средней скользящей по 5 годам температуры воздуха на Севере Западносибирского сектора

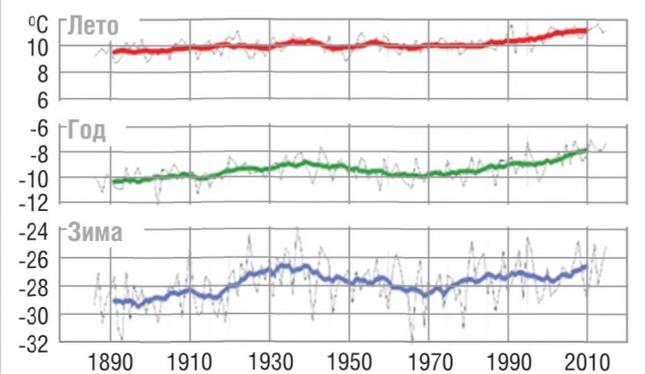


Рис. 6. Изменение температуры воздуха на Севере Восточносибирского сектора



Изменения температуры воздуха на Севере Восточносибирского сектора. Для анализа были выбраны 9 длиннорядных репрезентативных станций, включая: Шелагонцы, Челюскин, Тикси, Тура, Сухана, Саскылах, Оленек, Ессей, Волочанка. До 1950 г. средняя годовая температура воздуха превышала среднюю многолетнюю, затем до 1990 г. она была ниже средней многолетней, а в 1990-х гг. нача-

Рис. 7. Интегральные 11-летние скользящие значения изменения температуры воздуха по всей Арктической зоне



лось потепление, продолжающееся до настоящего времени (рис. 6).

Аналогичная картина наблюдается и при анализе изменений температуры воздуха в высоких широтах **Дальневосточного и Тихоокеанского секторов Арктики.** Для анализа климатических изменений в этих регионах были выбраны соответственно 31 и 8 длиннорядных репрезентативных метеостанций.

Наиболее высокая средняя среднегодовая температура воздуха за много лет отмечается на Севере Европейского сектора (-1,3°C). Затем следуют Север Западносибирского сектора (-7,8°C) и Север Тихоокеанского (-8,8°C) сектора. Наиболее низкие средние многолетние среднегодовые температуры воздуха отмечаются на Севере Восточносибирского сектора (-11,9°C) и Севере Дальневосточного сектора (-12,8°C).

На рис. 7 приведены интегральные значения изменения температуры воздуха по всей Арктической зоне по данным 72 метеостанций.

Изменение теплового состояния мерзлых толщ в арктической криолитозоне

В системе мониторинга криолитозоны изучению закономерностей формирования температурного режима горных пород отводится одно из главенствующих мест, поскольку именно температурный режим определяет как физико-механические свойства ММП, так и развитие и протекание в них многочисленных криогенных процессов, в том числе опасных.

Температурный режим верхних слоев криолитозоны определяется структурой радиационно-теплового баланса поверхности, тепловым влиянием наземных покровов, (снег, растительность, поверхностная вода), теплопотоком из недр Земли, а также процессами тепломассопереноса в массиве пород.

Основные параметры, характеризующие температурный режим пород, – средняя годовая температура, амплитуда колебания температуры грунта на различных глубинах в течение годового цикла, глубина проникновения этих колебаний вглубь массива (так называемая глубина нулевых годовых амплитуд). При этом за глубину нулевых годовых амплитуд принимается глубина, на которой температура грунта не изменяется в течение одного года (при заданной точности измерений $\pm 0,1^\circ\text{C}$) [2]. В зависимости от изменения значений среднегодовой температуры пород по глубине определяется стационарность температурного режима: в случае постоянства этих значений режим признается стационарным; при их изменении по глубине – нестационарным. Более высокие значения среднегодовой температуры пород до глубины нулевых амплитуд свидетельствуют о процессе потепления, и наоборот.

Климатические изменения в Арктике обусловили повсеместное повышение температурного режима мерзлых толщ во всех секторах, начиная с регионов Европейского Севера и заканчивая Чукоткой. Об этом свидетельствуют данные мониторинговых наблюдений, выполненные различными научными и производственными организациями, располагающими наблюдательной сетью скважин в Арктической зоне.

Рис. 8. Интегральное изменение температуры многолетнемерзлых пород в основных однотипных ландшафтах на наблюдательных площадках на Севере Европейского и Севере Западносибирского секторов

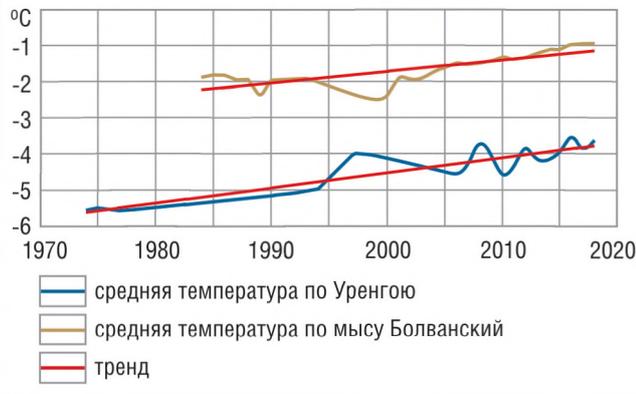


Рис. 9. Изменения среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород за 2001–2017 гг. на полигоне Марре-Сале

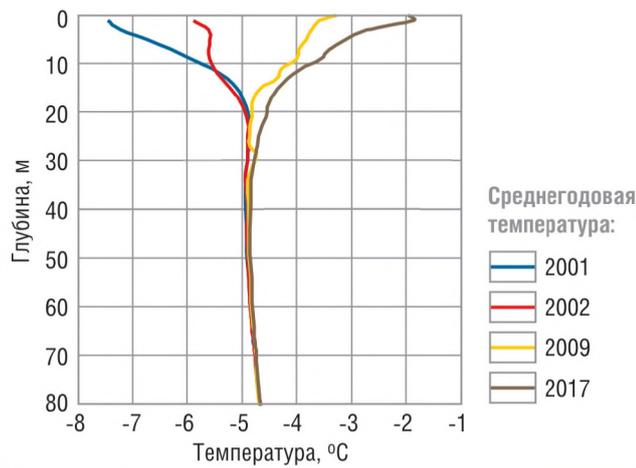
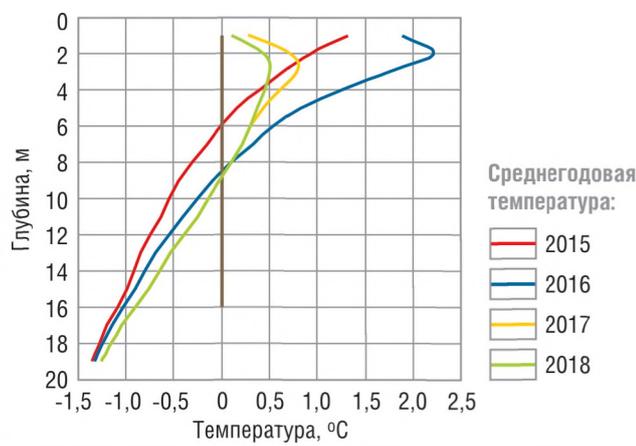


Рис. 10. Изменение среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород в скважине на шельфе Карского моря за 2015–2018 гг.



В европейской части Арктики на мысе Болванский (широта 70° с.ш.), по данным Института криосферы Земли СО РАН, с 1984 по 2018 г. температура мерзлых пород на глубине 10 м повысилась в среднем на 1°С (0,5...1,4°С) во всех наблюдаемых типах ландшафтов [6].

По тем же источникам, на Севере Западносибирского сектора в районе Уренгойского газоконденсатного месторождения (примерно 67° с.ш.) интегральное (по всем наблюдаемым скважинам) повышение температуры в доминантных типах урочищ с 1975 г. по настоящее время составило почти 1,9°С за период (рис. 8).

На геокриологическом полигоне Марре-Сале (70° с.ш.) на участке хорошо дренированной тундры в пределах краевой части II озерно-аллювиальной равнины с преимущественно песчаным составом подстилающих пород температура ММП на глубине 10 м за период наблюдений (2001-2017) повысилась на 2°С, а на глубине 40 м – на 0,2°С (рис. 9).

На заторфованных и заболоченных ландшафтах темпы повышения температуры ММП заметно снижаются.

Высокая динамика температуры донных отложений до глубины 19 м отмечена при мониторинговых наблюдениях на шельфе Карского моря (рис. 10). Наблюдательная скважина здесь была пробурена в 2014 г. на удалении 960 м от берега и изобате 5 м. Полученные уникальные данные также свидетельствуют о повышении с 2015 по 2018 г. температуры мерзлых толщ не только на суше и береговой части, но и на акватории.

Однонаправленное изменение температурного режима мерзлых толщ во всех типах ландшафтов, включая мелководную часть акватории Карского моря, позволяет оценить интегральный ход изменения температуры вечной мерзлоты на полигоне Марре-Сале, составленный по данным 12 наблюдательных скважин за 10-летний период (рис. 11).

Мониторинг температурного режима ММП в скважинах на суше и в пределах прибрежной части, включая участок мелководного шельфа, свидетельствует о закономерном продолжении процесса повышения среднегодовой

Рис. 11. Интегральный ход изменения температуры многолетнемерзлых пород по глубине на полигоне Марре-Сале за 2009–2018 гг.

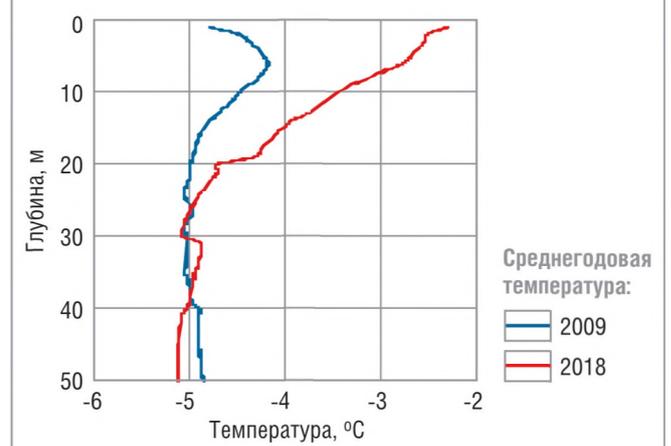
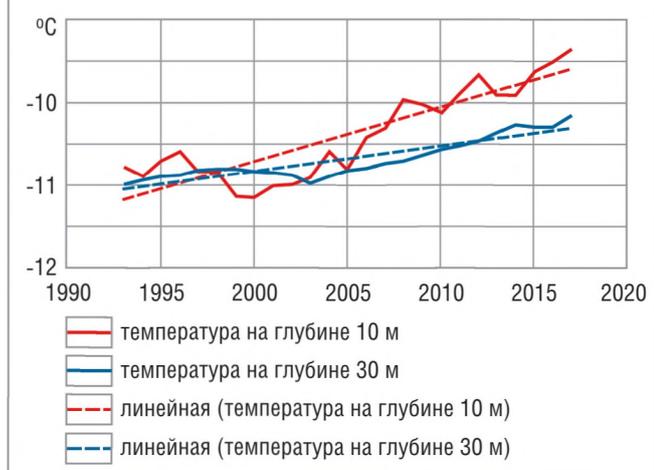


Рис. 12. Многолетняя динамика средней годовой температуры многолетнемерзлых пород на глубинах 10 и 30 м для участка горной тундры в районе Тикси за период 1993–2017 гг.



температуры грунтов во всех без исключения пунктах наблюдений в соответствии с климатическими вариациями в Арктическом регионе Западной Сибири в целом.

Установленные величины повышения температуры грунтов во всех типах доминантных урочищ арктических ландшафтов на территории западной части Центрального Ямала на глубине 10 м за 10-летний период составляют в среднем 0,8°C, достигая в отдельных случаях 1,25°C.

В Арктическом секторе Республики Саха (Якутия) в районе пос.Тикси исследования за тепловым режимом грунтов начаты в 1992 г. Институтом мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН совместно с Институтом низких температур Университета Хоккайдо (Япония). В 1998 г. там совместно с Японским научным агентством по морским и наземным исследованиям и технологиям (JAMSTEC) была установлена автоматическая метеорологическая станция с комплексом площадок для наблюдений за режимом осадков, термическим режимом приземной температуры воздуха, почв и подстилающих многолетнемерзлых грунтов.

На основании 25-летних наблюдений на этом участке установлено, что средняя годовая температура грунтов на глубине 10 м с 1993 по 2000 г. имела незначительную тенденцию к понижению, а с 2000 г. по настоящее время наблюдается ее заметное повышение на 1,8°C. В целом тренд повышения с 1993 по 2017 г. составил 0,64°C за 10 лет (рис. 12).

В результате климатических изменений происходит постепенное смещение на север границ природных зон со сменой растительности, изменением путей миграции животных, птиц и рыб, ростом продуктивности биоценозов. Например, в Западной Сибири за последние 40 лет граница между южной и северной лесотундрой смещалась со скоростью примерно 1 км в год, т.е. начинается общая перестройка экосистем [7].

Вслед за потеплением воздуха и сменой ландшафтов, несколько отставая от них, следует повышение температуры мерзлых толщ. На Крайнем Севере и северо-востоке страны грунты теплеют, но остаются в мерзлом состоянии. Ближе к южной границе вечной мерзлоты происходит переход температуры грунтов через 0°C, сплошная мерзлота сменяется прерывистой, прерывистая – островной, от островной остаются лишь небольшие мерзлые пятна со специфическим местным тепловым балансом.

По имеющимся данным, на Европейском Севере в Большеземельской тундре в 1970-2006 гг. произошла значительная перестройка геокриологических условий: южная граница области ММП отступила на север на 30-40 км и более в минеральных грунтах Печорской низменности и на многие десятки километров – в Приуралье; южная граница зоны сплошного распространения ММП также сместилась к северу*.

В ходе климатического потепления процессы криогенного ряда активизируются, особенно в аномальные годы. В последнее десятилетие аномально теплыми оказались 2007-2008 и 2012-2014 гг., и геокриологический мониторинг показал, как на это прореагировала вечная мерзлота и ландшафты в целом:

- увеличилась пучинистость грунтов;
- активизировались процессы термокарста и термодеградации; увеличилось количество криогенных оползней и интенсифицировалась солифлюкция;
- увеличились темпы термоэрозии и оврагообразования;
- в лесотундровых ландшафтах повсеместно наблюдается опускание кровли мерзлых грунтов и формирование обширных надмерзлотных таликов, принципиально изменяющих тепло- и влагообмен, гидрогеологические условия, несущую способность грунтов;
- увеличились площади выгорания бореальных лесов;
- разрушаются льдистые берега (скорость отступления до 15 м/год вместо обычных 0,5-2,0 м/год);

Таким образом, начавшаяся общая перестройка экосистем переходит в их разрушение и деградацию [7].

Микробиологические перспективы и биолого-эпидемиологические угрозы. Мерзлая часть литосферы традиционно считалась областью биогеохимического покоя, хотя сведения о наличии в мерзлоте живых бактерий появились в России в конце XIX в. Описаны живые организмы, извлеченные из Гренландского ледника, снега Антарктиды, древней вечной мерзлоты Якутии и Колымы, ледяных жил Аляски. Известен рост бактерий при температуре ниже 0°C. Микроорганизмы отличаются устойчивостью к замораживанию; многие из них его легко переносят. Недавно в ММП были найдены и вирусы – бактериофаги [8].

Микробиота, состав природных вод и другие составляющие природных условий влияют на особенности физиологии и патологии людей.

При этом не ясны механизмы выживания и развития микробно-вирусных сообществ в экстремальных геологических, геохимических и температурных условиях.

* Отчет по теме: "Разработать методику количественной оценки современной и прогнозируемой деградации многолетнемерзлых пород на примере территории Республики Коми и Ненецкого автономного округа под воздействием климатического потепления", 2008.

Многолетнемерзлые породы часто содержат значительное число (до 10^7 и более на грамм) живых микроорганизмов, разнообразие, формы существования и активность которых изучены недостаточно. Некоторые микроорганизмы сохраняются во льду и мерзлых отложениях в течение миллионов лет [1].

Чрезвычайно важной является проблема возможного сохранения в мерзлоте болезнетворных бактерий и вирусов, в том числе еще неизвестных науке. Микробные сообщества криолитозоны изучены исключительно слабо и могут представлять собой крайне опасную угрозу, особенно учитывая то, что большая часть территории России находится именно в этой зоне.

Мерзлота содержит в значительном количестве парниковые газы – метан и углекислый газ, которые при оттаивании мерзлоты выделяются в атмосферу и приведут к резкому росту температуры поверхности Земли [9]. Большое количество содержащегося в мерзлых породах органического вещества начнет активно разлагаться и произойдет дополнительный выброс парниковых газов, оценки которого пока мало обоснованы, но выглядят крайне угрожающе для окружающей среды и человека.

В процессе происходящей деградации дисперсных ММП в окружающую среду попадает биологический и микробиологический материал прошлых геологических и исторических эпох. В связи с этим может возникнуть опасность для здоровья людей и всего живого. Споры сибирской язвы сохраняются в почвах около 100 лет и более. В первую очередь это касается скотомогильников и захоронений предыдущих веков, связанных с вспышками сибирской язвы, которая может проявиться при вскрытии таких могильников, а неожиданное вскрытие неизвестного может произойти в любой момент, и ускоренное оттаивание мерзлоты повышает такую вероятность.

Активизация техногенеза. Инженерная деятельность в Арктике усугубляет природные риски, и обществу приходится нести существенные затраты по ликвидации накопленного экологического ущерба. Наиболее активный техногенез связан с недропользованием. По условиям недропользования территория криолитозоны – это сложные и особо сложные геологические, инженерно-геологические, гидрогеологические, геокриологические и геоэкологические условия. А слабая их изученность предопределяет повышенные риски при освоении. Строительство в среднем дорожает в 3-8 раз по сравнению с "немерзлыми" регионами [3, 7].

Растет аварийность геотехнических систем – выпучивание, осадки, деформации свайных оснований сооружений и объектов. Вдоль магистральных газопроводов происходит заболачивание и как следствие – всплытие газопроводов, а на перегибах рельефа – активная эрозия. По данным [10], в конце 1990-х гг. на территории криолитозоны в течение 1 года "всплывало" до 15 км газопроводов. Серьезные проблемы возникают при строительстве железных и автомобильных дорог, особенно при пересечении часто чередующихся ландшафтов, сформировавшихся на разной литогенной и криогенной основе [9].

В советское время Норильск был образцом свайного строительства на вечной мерзлоте, однако позже резко сократилась работа мерзлотной службы, нарушаются пра-

вила эксплуатации, и массовыми стали аварийные деформации промышленных и гражданских зданий и сооружений. Аналогичная картина наблюдается и в других северных городах – Воркуте, Игарке, Якутске, Анадыре.

Сейчас в Западной Сибири на севере Ямало-Ненецкого АО несущая способность мерзлых горных пород за счет повышения их температуры по сравнению с данными 1980-1990 гг. снизилась на 5-30 %. Причем области максимального снижения несущей способности захватывают основные традиционные центры газовой промышленности: полоса по линии Салехард – Надым – Пангоды – Новый Уренгой и далее на Норильск, полоса по линии Белоярский – Казым – Тарко-Сале. Все сооружения, построенные здесь в последней трети XX в. и имевшие запас прочности $K < 1,3$, находятся в аварийном или предаварийном состоянии. Около 50 % зданий и сооружений в криолитозоне имеют недопустимые деформации [7].

Заключение

Анализ сложившейся современной мерзлотно-климатической ситуации в Арктической зоне РФ свидетельствует о сложности происходящих процессов трансформации криолитозоны в условиях изменяющегося климата в Северном полушарии.

Основной вывод заключается в том, что во всех регионах Арктики происходит однонаправленный процесс повышения температуры ММП с различными скоростями, в ряде случаев достигающих $0,1^\circ\text{C}$ в год. Следует признать, что это очень высокие темпы изменения естественной среды, которые будут вызывать не только в ближайшей, но и в долгосрочной перспективе серьезные затруднения в экологически безопасном освоении Арктической зоны. Судя по характеру кривых изменения температуры воздуха в различных ее секторах – от Европейского Севера до Чукотки, направленность климатических изменений сохранится как минимум 15-20 лет. Для понимания и осознания последствий этих процессов необходим государственный климатический прогноз, отличающийся от обычного тем, что за него надо отвечать. Таких прогнозов пока не существует. Поэтому нет реального геокриологического прогноза на средне- и долгосрочную перспективу.

Техногенез усиливает процессы растепления мерзлых толщ, внося не только сопоставимые изменения в тепловое состояние горных пород, но зачастую превышая естественные темпы в несколько раз. Так, натурные и расчетные данные показывают, что накопление снега в Арктической зоне Западной Сибири высотой более 2 м на небольших площадках в течение 5 лет в результате хозяйственной деятельности обеспечивает повышение температуры ММП на глубине 10 м на $2,7^\circ\text{C}$. Все объекты газовой промышленности на территории Ямало-Ненецкого АО ограждены сеточными заборами, формирующими снежные сугробы высотой 3 м и более.

Непонимание роли вечной мерзлоты в освоении Арктики, а порой просто безграмотность при проектировании и строительстве объектов, обуславливают экономические потери, исчисляемые десятками миллиардов рублей в год. За период освоения газоконденсатных месторождений на территории Пур-Надымского междуречья нет ни одной ав-

тодороги с бетонным покрытием, включая межпромысловые трассы, которые не перестраивались бы как минимум 2 раза. Факты всплытия газопроводов в результате подтопления территорий, разрушения насыпей железных дорог, разрушения современных зданий и т.п. приводятся на всех форумах мерзлотоведов, но действенных мер не принимается.

Представляется необходимым пересмотреть существующие узко ведомственные подходы к освоению Арктики и разработать национальную комплексную программу "Вечная мерзлота России". "Концепция изучения вечной мерзлоты в связи с освоением Арктической зоны Российской Федерации" разработана и получила одобрение в научных советах ведущих вузов и академических институтов страны [3]. Для координации и финансирования такой программы представляется необходимым создать при Правительстве РФ государственный межведомственный центр по обеспечению экологически безопасного освоения районов распространения вечной мерзлоты (по типу "Государственной Комиссии по вечной мерзлоте" (1927), или "Комитета по вечной мерзлоте" (1936).

Возможный экономический эффект от реализации программы "Вечная мерзлота России" по самым скромным подсчетам может составить в периоды предпроектной подготовки, строительства и эксплуатации объектов и инфраструктуры недропользования, промышленного и гражданского строительства, реализации природозащитных мероприятий и охраны окружающей среды не менее 6-7 % суммы инвестиций в Арктику.

Литература

- Harris S., Brouchkov A., Cheng G. *Geocryology: Characteristics and Use of Frozen Ground and Permafrost Landforms*. 2017. Taylor & Francis (United Kingdom). – 766 с.
- Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях / В.А. Кудрявцев, Л.С. Гарагуля, К.А. Кондратьева, В.Г. Меламед; под ред. В.А.Кудрявцева. – М.: Изд-во Московского ун-та, 1974. – 431 с.
- Принятие доктрины изучения и охраны вечной мерзлоты – необходимый элемент стратегии развития Арктической зоны РФ / В.П. Мельников, В.Т. Трофимов, В.П. Орлов [и др.] // Сб. докл. расширенного заседания научного совета по криологии Земли РАН. "Актуальные проблемы геокриологии", МГУ, 15-16 мая 2018 г. Т. 1. – М.: Университетская книга, 2018. – С. 6-19.
- Дубровин В.А., Крицук Л.Н., Полякова Е.И. Температура, состав и возраст отложений шельфа Карского моря в районе геокриологического стационара Марре-Сале // Криосфера земли. – 2015. – Т. XIX, № 4. – С. 3-16.
- Дубровин В.А., Крицук Л.Н. Геокриологические условия Приямальского мелководного шельфа Карского моря в районе геокриологического стационара ВСЕГИНГЕО Марре-Сале // Разведка и охрана недр. – 2015. – № 8. – С. 44-51.
- Современные климатические изменения и температурный режим многолетнемерзлых пород Европейского Севера / Г.В. Малкова, Ю.В. Коростелев, М.Р. Садуртдинов [и др.] // Сб. докл. расширенного заседания научного совета по криологии Земли РАН "Актуальные проблемы геокриологии", МГУ, 15-16 мая 2018 г. Т. 1. – М.: Университетская книга, 2018. – С. 98-104.
- Мельников В.П., Брушков А.В., Дроздов Д.С. Криосфера и снижение рисков инженерной деятельности // Матер. 5-й конф. геокриологов России, МГУ, 14-17 июня 2016 г. Т. 1. – М.: Университетская книга, 2016. – С. 5-25.
- Фаговые частицы в подземных льдах Арктики / Н.А. Сургучева, С.Н. Филиппова, Е.Е. Куликова [и др.] // Микробиология. – 2019. – Т. 88, № 2. – С. 224-229.
- Закономерности распределения метана в верхних горизонтах многолетнемерзлых пород Центральной Якутии / М.Ю. Чербунина, Д.Г. Шмелев, А.В. Брушков [и др.] // Вестн. Московского ун-та. Сер. 4. Геология. – 2017. – № 6. – С. 105-112.
- Седых А.Д., Хренов Н.Н. Актуальные проблемы безопасности действующих газопроводов севера Западной Сибири // Нефтегазовое строительство. – 1999. – Январь-март. – С. 58-61.

© Дубровин В.А., Брушков А.В., Дроздов Д.С., Железняк М.Н., 3/2019
 Дубровин Владимир Александрович, dva946@yandex.ru
 Брушков Анатолий Викторович, brouchkov@geol.msu.ru
 Дроздов Дмитрий Степанович, ds_drozдов@mail.ru
 Железняк Михаил Николаевич, fe1956@mail.ru

Study, current state, future and challenges of development of permafrost in the Arctic

V.A. Dubrovin (Hydrospecgeologya, Moscow), **A.V. Brushkov** (Lomonosov Moscow State University, Moscow), **D.S. Drozdov** (Earth Cryosphere Institute of Tyumen Scientific Center SB RAS, Tyumen), **M.N. Zheleznyak** (Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk)

Data on significant changes in the cryolithozone as a result of climate warming in recent decades are presented. It is shown that the study of permafrost by means of geological surveys and monitoring observations remains extremely insufficient. The level of this study absolutely does not corresponds to the current pace of development of the Arctic and the need for detailed relevant geocryological information. The complex of natural, technical, economic, geoeological, financial problems associated with the shortcomings of the study and monitoring of permafrost is outlined. The development of an interdepartmental program of area survey and stationary regime studies of the components of the natural environment and a set of engineering systems affecting the cryolithozone is recommended, as well as the creation of a single Center to coordinate the implementation of the program, legally endowed with the relevant powers.

Key word: Arctic; Subarctic; Arctic Zone of the Russian Federation; permafrost; frozen ground; climate warming; thawing of near-surface permafrost; subsoil use; technogenesis; program of study and preservation of cryogenic landscapes and permafrost; single coordinating Center; legislative support.