

## ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ

УДК 624.139.6

DOI: 10.15372/KZ20220401

## РАЗВИТИЕ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИРОДНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

**В.П. Мельников<sup>1-4</sup>, В.И. Осипов<sup>5</sup>, А.В. Брушков<sup>6</sup>, А.Г. Алексеев<sup>7,8</sup>, С.В. Бадина<sup>6,9</sup>, Н.М. Бердников<sup>1</sup>, С.А. Великин<sup>10</sup>, Д.С. Дроздов<sup>1,11</sup>, В.А. Дубровин<sup>12</sup>, М.Н. Железняк<sup>10</sup>, О.В. Жданеев<sup>13</sup>, А.А. Захаров<sup>14</sup>, Я.К. Леопольд<sup>15</sup>, М.Е. Кузнецов<sup>16</sup>, Г.В. Малкова<sup>1</sup>, А.Б. Осокин<sup>17</sup>, Н.А. Остарков<sup>18</sup>, Ф.М. Ривкин<sup>1</sup>, М.Р. Садуртдинов<sup>1</sup>, Д.О. Сергеев<sup>5</sup>, Р.Ю. Федоров<sup>1,2</sup>, К.Н. Фролов<sup>13</sup>, Е.В. Устинова<sup>1,3</sup>, А.Н. Шеин<sup>15</sup>**

<sup>1</sup> Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия; melnikov@ikz.ru, galina\_malk@mail.ru, mr\_sadurtdinov@mail.ru, nikolaj-berdnikov@yandex.ru, f-riikin@yandex.ru

<sup>2</sup> Тюменский государственный университет, Международный центр криологии и криософии, 625003, Тюмень, ул. Володарского, 6, Россия; r\_fedorov@mail.ru

<sup>3</sup> Тюменский индустриальный университет, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия; e.v.ustinova@mail.ru

<sup>4</sup> Отдел методологии междисциплинарных исследований криосферы ТюмНЦ СО РАН, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия

<sup>5</sup> Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, 101000, Москва, Уланский пер., 13, стр. 2, Россия; osipov@geoenv.ru, sergeevdo@mail.ru

<sup>6</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; brouchkov@geol.msu.ru

<sup>7</sup> Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова, 109428, Москва, Рязанский просп., 59, Россия; ADR-Alekseev@yandex.ru

<sup>8</sup> Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское ш., 26, Россия

<sup>9</sup> Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, 117997, Москва, Стремянный пер., 36, Россия; bad412@yandex.ru

<sup>10</sup> Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; fe1956@mail.ru, velikin2000@mail.ru

<sup>11</sup> Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, Россия; ds\_droz dov@mail.ru

<sup>12</sup> ФГБУ Гидропеспецеология, 123060, Москва, ул. Маршала Рыбалко, 4, Россия; dva946@yandex.ru

<sup>13</sup> ФГБУ "Российское энергетическое агентство", 129085, Москва, просп. Мира, 105, стр. 1, Россия; Frolov@rosenergo.gov.ru, Zhdaneev@rosenergo.gov.ru

<sup>14</sup> ПАО "Транснефть", 123112, Москва, Пресненская наб., 4, стр. 2, Россия; ZakharovAA@ak.transneft.ru

<sup>15</sup> ГАНУ ЯНАО "Научный центр изучения Арктики", 629008, Салехард, ул. Республики, 20, офис 203, Россия; kamnevuk@gmail.com, SheinAN@ipgg.sbras.ru

<sup>16</sup> ФАНУ Востокгосплан, 680000, Хабаровск, ул. Запарина, 67, Россия; m.kuznetsov@vostokgosplan.ru

<sup>17</sup> ООО "Газпром добыча Надым", 629730, Надым, ул. Пионерская, 14, Россия; osokinab@mail.ru

<sup>18</sup> Министерство Российской Федерации по развитию Дальнего Востока и Арктики, 119002, Москва, Большой Мозильцевский пер., 7, стр. 2, Россия; n.ostarkov@vostokgosplan.ru

За последние 30 лет отмечено существенное повышение температуры верхних горизонтов вечной (многолетней) мерзлоты: в среднем на 2.5 °С в Российской Федерации. С этим связаны деградиционные тенденции в мерзлоте, отрицательно сказывающиеся и на природных ландшафтах, и на инженерной инфраструктуре. Хозяйствующие субъекты пытаются защитить свои предприятия, вкладываясь в инженерные мероприятия и наблюдения за изменением параметров мерзлых оснований сооружений. Одно из лидирующих мест здесь занимает топливно-энергетический комплекс, на предприятиях которого начинает внедряться система автоматизированного геотехнического мониторинга многолетнемерзлых грунтов. В ближайшей перспективе (5–10 лет) система станет обязательной для каждого объекта, расположенного в зоне вечной мерзлоты. Но пока в разных регионах и организациях геотехнический мониторинг мерзлоты ведется по различным методикам, нередко в урезанном объеме, без учета природных тенденций и при отсутствии соответствующего анализа и прогнозирования. При этом практически всеми игнорируются фоновые изменения, происходящие независимо от хозяйственной деятельности. Это резко снижает

© В.П. Мельников, В.И. Осипов, А.В. Брушков, А.Г. Алексеев, С.В. Бадина, Н.М. Бердников, С.А. Великин, Д.С. Дроздов, В.А. Дубровин, М.Н. Железняк, О.В. Жданеев, А.А. Захаров, Я.К. Леопольд, М.Е. Кузнецов, Г.В. Малкова, А.Б. Осокин, Н.А. Остарков, Ф.М. Ривкин, М.Р. Садуртдинов, Д.О. Сергеев, Р.Ю. Федоров, К.Н. Фролов, Е.В. Устинова, А.Н. Шеин, 2022

эффективность мониторинга. Причина состоит, с одной стороны, в недостатках регламента наблюдений и обработки данных, а с другой – в том, что в Российской Федерации фоновый геокриологический мониторинг природных условий ведется в крайне недостаточном объеме. В результате возможность достоверного прогноза на средне- и долгосрочную перспективу изменения состояния многолетнемерзлых грунтов весьма ограничена. С точки зрения развития топливно-энергетического комплекса проблема усугубляется отсутствием обмена данными между отдельными его компаниями как в рамках регионов, так и на федеральном уровне.

Предложена схема организации федерального мониторинга мерзлоты на основе создания системы федеральных геокриологических полигонов, где сочетаются два вида мониторинга: фоновый природный государственный мониторинг и геотехнический мониторинг земле- и недропользователей (в первую очередь топливно-энергетического комплекса).

**Ключевые слова:** глобальное изменение климата, многолетняя мерзлота, топливно-энергетический комплекс, фоновый мониторинг, геотехнический мониторинг, геокриологический стационар, оттаивание с поверхности, ущерб, Арктика.

## DEVELOPMENT OF GEOCRYOLOGICAL MONITORING OF NATURAL AND TECHNICAL FACILITIES IN THE REGIONS OF THE RUSSIAN FEDERATION BASED ON GEOTECHNICAL MONITORING SYSTEMS OF FUEL AND ENERGY SECTOR

V.P. Melnikov<sup>1-4</sup>, V.I. Osipov<sup>5</sup>, A.V. Brouchkov<sup>6</sup>, A.G. Alekseev<sup>7,8</sup>, S.V. Badina<sup>6,9</sup>, N.M. Berdnikov<sup>1</sup>, S.A. Velikin<sup>10</sup>, D.S. Drozdov<sup>1,11</sup>, V.A. Dubrovin<sup>12</sup>, M.N. Zheleznyak<sup>10</sup>, O.V. Zhdaneev<sup>13</sup>, A.A. Zakharov<sup>14</sup>, Ya.K. Leopold<sup>15</sup>, M.E. Kuznetsov<sup>16</sup>, G.V. Malkova<sup>1</sup>, A.B. Osokin<sup>17</sup>, N.A. Ostarkov<sup>18</sup>, F.M. Rivkin<sup>1</sup>, M.R. Sadurtdinov<sup>1</sup>, D.O. Sergeev<sup>5</sup>, R.Yu. Fedorov<sup>1,2</sup>, K.N. Frolov<sup>13</sup>, E.V. Ustinova<sup>1,3</sup>, A.N. Shein<sup>15</sup>

<sup>1</sup> Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre SB RAS, Malygina str. 86, Tyumen, 625026, Russia; melnikov@ikz.ru

<sup>2</sup> Tyumen State University, Volodarskogo str. 6, Tyumen, 625003, Russia

<sup>3</sup> Tyumen Industrial University, Volodarskogo str. 38, Tyumen, 625000, Russia

<sup>4</sup> Cryosphere interdisciplinary research methodology department, Tyumen Scientific Centre SB RAS, Malygina str. 86, Tyumen, 625026, Russia

<sup>5</sup> Sergeev Geocology Institute, RAS, Ulanskiy per. 13, bldg. 2, Moscow, 101000, Russia; osipov@geoenv.ru

<sup>6</sup> Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991, Russia; brouchkov@geol.msu.ru

<sup>7</sup> Research Center of Construction, Ryazanskiy prosp. 59, Moscow, 109428, Russia; ADR-Alekseev@yandex.ru

<sup>8</sup> Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe sh. 26, Moscow, 129337, Russia

<sup>9</sup> Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanniy per. 36, Moscow, 117997, Russia; bad412@yandex.ru

<sup>10</sup> Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Merzlotnaya str. 36, Yakutsk, 677010, Russia; fe1956@mail.ru

<sup>11</sup> Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Miklukho-Maklaya str. 23, Moscow, 117997, Russia; ds\_drozdov@mail.ru

<sup>12</sup> Gidropetsgeologiya, Marshalla Rybalko str. 4, Moscow, 123060, Russia; dva946@yandex.ru

<sup>13</sup> Russian Energy agency, Prospect Mira 105, bldg 1, Moscow, 129085, Russia; Frolov@rosenergo.gov.ru

<sup>14</sup> Transneft, Presnenskaya nab. 4, bldg 2, Moscow, 123112, Russia; ZakharovAA@ak.transneft.ru

<sup>15</sup> Arctic Research Center, Respubliki str. 20, office 203, Salekhard, 629008, Russia; kamnevyyk@gmail.com

<sup>16</sup> FASI "Vostokgosplan", Zaparina str. 67, Khabarovsk, 680000, Russia; m.kuznetsov@vostokgosplan.ru

<sup>17</sup> Nadymgazprom, Pionerskaya str. 14, Nadym, 629730, Russia; osokinab@mail.ru

<sup>18</sup> Ministry of the Russian Federation for the Development of the Far East and the Arctic, Bolshoy Mogiltsevskiy per. 7, bldg 2, Moscow, 119002, Russia; n.ostarkov@vostokgosplan.ru

Over the past 30 years, there have been marked significant increase in the temperature of the upper horizons of permafrost: by an average of 2.5 °C in the Russian Federation. This is related to the degradation trends in permafrost, which negatively affect both natural landscapes and engineering infrastructure. Economic entities try to protect their enterprises by investing both in engineering measures and in monitoring of changes in frozen soils under structures. One of the leading places in this area is occupied by the fuel and energy complex. A system of automated geotechnical monitoring of permafrost soils is beginning to be implemented at its enterprises, and in the near future (5–10 years) this will become mandatory for every structure located in the permafrost zone. But so far, in different regions and organizations, geotechnical monitoring of permafrost is carried out according to different methods, often in a reduced volume without taking into account natural trends and in the absence of appropriate analysis and forecast. At the same time, background changes occurring independently of economic activity are ignored by almost everyone. This drastically reduces the effectiveness of monitoring. The reason, on the one hand, in the shortcomings of the regulations for observations and data processing, and on the other hand, in the fact that in the Russian Federation background geocryological monitoring of natural conditions is carried out in an extremely insufficient volume. As a result, the possibility of a medium-term and long-term forecast of changes in permafrost soils is extremely limited. For the fuel and energy complex, the problem is aggravated by the lack of data exchange between its individual companies both within the regions and at the federal level.

The scheme of the federal permafrost monitoring system is proposed based on the creation of a system of federal geocryological polygons, where 2 types of monitoring are combined: background natural environmental monitoring and geotechnical monitoring of land and subsoil users (primarily in the fuel and energy complex).

**Key words:** global change of climate, permafrost, fuel and energy complex, background monitoring, geotechnical monitoring, geocryological station, thaw, damage, Arctic.

## ВВЕДЕНИЕ

Территория регионов Российской Федерации с наличием многолетней мерзлоты обладает особой значимостью для экономики страны из-за широкой хозяйственной деятельности в первую очередь предприятий топливно-энергетического комплекса (ТЭК) России – ключевой отрасли экономики страны. Только на территории Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ), полностью входящей в криолитозону России, добывается свыше 90 % природного газа, 17 % нефти (см.

таблицу), прогнозируется увеличение объемов производства сжиженного природного газа (СПГ) до 100–120 млн т в год к 2035 г., с охватом до 20 % мирового рынка СПГ [Тихонов, 2020].

При этом экономическое развитие криолитозоны России находится под воздействием жестких природных процессов. С конца 1970-х – начала 1980-х гг. среднегодовая температура воздуха росла во всех регионах, индицируя климатические изменения, вызывающие преобразования ландшафтов, гидросферы и многолетнемерзлых грунтов

## Регионы Российской Федерации с наличием многолетнемерзлых грунтов

Регион РФ	Общая площадь, тыс. км <sup>2</sup>	Площадь ММГ в округе, тыс. км <sup>2</sup>	Доля ММГ от общей площади региона*, %	ВРП (2019 г.), млрд руб.	Добыча нефти (2020 г.), тыс. т	Добыча газа (2020 г.), млрд м <sup>3</sup>
<b>Северо-Западный ФО</b>		444* (254**)				
Архангельская область (без НАО)	113		27.6	559	–	–
Республика Коми	417		21.8	721	12 956	3.4
Мурманская область	145		50.2	617	–	–
Ненецкий автономный округ (НАО)	177		94.2	331	14 117	1.2
<b>Приволжский ФО</b>		2* (0.25**)				
Пермский край	160		1.1	1495	16 037	0.5
<b>Уральский ФО</b>		877* (462**)				
Свердловская область	194		1.0	2530	–	–
Тюменская область (без ХМАО и ЯНАО)	160		0.2	1256	11 248	0.3
Ханты-Мансийский автономный округ – Югра (ХМАО)	535		36.6	4563	210 755	32.1
Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО)***	769/684		99.2	3101	63 300	557
<b>Сибирский ФО</b>		2980* (1960**)				
Республика Алтай	93		82.9	59	–	–
Алтайский край	168		2.2	631	–	–
Иркутская область	775		87.9	1546	17 317	3.0
Кемеровская область	96		12.5	1110	–	–
Красноярский край	2367		84.6	2692	20 237	8.1
Республика Тыва	169		99.8	79	–	–
Республика Хакасия	62		57.8	256	–	–
<b>Дальневосточный ФО</b>		6227* (4936**)				
Амурская область	362		88.1	413	–	–
Республика Бурятия	351		88.9	286	–	–
Еврейская автономная область	36		10.7	57	–	–
Забайкальский край	432		99.7	365	–	–
Камчатский край	464		67.0	280	12	0.3
Магаданская область	462		99.1	213	–	–
Приморский край	165		2.2	1067	–	–
Республика Саха (Якутия)	3103		98.9	1110	16 172	8.0
Сахалинская область	87		4.2	1173	18 348	33.5
Хабаровский край	788		76.5	803	–	–
Чукотский автономный округ	738		96.8	95	–	0.1

Примечание. ФО – федеральный округ, ММГ – многолетнемерзлые грунты, ВРП – валовый региональный продукт.

\* Учитывается вся территория криолитозоны в округе.

\*\* Учитывается площадь собственно многолетнемерзлых с поверхности грунтов (площадь криолитозоны за вычетом таликов в пределах прерывистой и островной мерзлоты).

\*\*\* По официальным данным / по шейп-файлу OpenStreetMap.

(ММГ). В среднем для Арктики рост среднегодовой температуры воздуха составил примерно  $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$  за декаду в период 1960–1990 гг. и около  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  за декаду в период 1990–2020 гг. [Malkova et al., 2022]. Прогнозы по различным климатическим сценариям позволяют предположить, что динамика среднегодовых температур будет и дальше увеличиваться.

Рассматривая реакцию конкретных сооружений на повышение температуры мерзлых грунтов, необходимо учитывать, что снижение их несущей способности может вызвать деформации и разрушение объекта, если окажется достигнут или превышен проектный запас прочности. А ведь температура верхних горизонтов вечной мерзлоты за последние 30 лет выросла в Российской Федерации в среднем на  $0.3...1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  [Malkova et al., 2022]. Это существенно, хотя и несколько меньше фиксируемого повышения температуры воздуха. Температуры ММГ на освоенных газовой промышленностью низменностях Западной Сибири повысились сильнее – на  $2.0...4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  и даже больше. Кроме того, здесь существенен вклад техногенеза. За тот же период в лесотундровых ландшафтах Западной Сибири с прерывистым распространением мерзлоты в полосе шириной около 100 км кровля мерзлоты местами оторвалась от поверхности и опустилась до глубины 3–8 м, формируя надмерзлотный талик.

При этом современная геокриологическая изученность северных территорий в значительной мере не соответствует темпам освоения Арктики [Дубровин и др., 2019; Вопросы..., 2020], для многих регионов которой важным фактором стала потеря несущей способности грунтов оснований зданий и сооружений. Значительная часть имеющихся данных о состоянии вечной мерзлоты устарела и нуждается в обновлении. Возникающие риски потери несущей способности фундаментов и развитие опасных криогенных процессов определяют необходимость создания в стране государственной системы мониторинга криолитозоны.

Прогнозную информацию о состоянии ММГ может дать только сочетание надежного климатического прогноза с геокриологическим мониторингом и прогнозированием. Достичь этого можно лишь при наличии адекватной системы геокриологического мониторинга, которая должна включать два основных взаимоинтегрированных блока: фоновый мониторинг (контроль комплекса природных условий, определяющих состояние вечной мерзлоты) и геотехнический мониторинг (ГТМ) (контроль комплекса природных и техногенных факторов, влияющих на надежность инженерной инфраструктуры и связанную с ней геоэкологическую безопасность).

В России в настоящее время в той или иной форме существуют прототипы элементов обоих

блоков мониторинга, однако они в большинстве своем несовершенны и, главное, не объединены в систему с внутренними связями, обменом информацией и выходом на обоснованные организационные решения.

### **Фоновый геокриологический мониторинг в РФ**

Фоновые геокриологические наблюдения помимо научного интереса имеют огромный практический смысл – они являются базой для адекватной интерпретации геотехнического и объектного мониторинга, позволяя вычлнить природную составляющую в тех изменениях окружающей среды, которые наблюдаются при строительстве и эксплуатации сооружений, а также при других видах землепользования и хозяйствования.

Система фоновых геокриологических наблюдений (т. е. наблюдений на ненарушенных территориях) представлена в стране в различных министерствах и ведомствах ограниченным числом стационаров и площадок периодического посещения. Так, в системе Минприроды РФ действуют всего два объекта мониторинговых наблюдений – Воркутинский полигон и стационар Марре-Сале на Ямале. Ведутся также наблюдения за элементарными объектами “Байкальская природная территория”. Российская академия наук поддерживает приблизительно 20 площадок и 85 геокриологических скважин, в том числе современный стационар на о. Самойловский в дельте р. Лена. Ограниченная система мониторинга имеется у вузов. В Западной Сибири ПАО “Газпром”, имеющее на важных объектах инфраструктуры развитую сеть ГТМ, ведет необходимые с технологической точки зрения фоновые мерзлотные наблюдения.

Но этого явно недостаточно. Например, в США на Аляске, территория криолитозоны которой почти в 10 раз меньше российской, сегодня фоновых скважин уже больше, чем в РФ. В Канаде скважин примерно столько же, сколько у нас, при том что освоенность ее северных территорий, как и общая их площадь, намного меньше, чем в России. На Шпицбергене мониторингом занимается Норвежский научный институт, в США и Канаде соответствующие наблюдения выполняют геологические службы этих стран совместно с государственными университетами, в Китае – Институт холодных и аридных регионов Академии наук.

Для характеристики общих глобальных тенденций изменений теплового состояния ММГ и параметров деятельного слоя (сезонноталый и сезонномерзлый слой) получаемых данных в первом приближении достаточно (для масштаба  $1:5\ 000\ 000$  и мельче). Их обобщением занимаются национальные исследовательские организации,

этому посвящена деятельность международных проектов TSP (Thermal State of Permafrost – Тепловое состояние мерзлоты), CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring – Циркумполярный мониторинг деятельного слоя), GTN-P (Global Terrestrial Network on Permafrost – Всемирная наблюдательная сеть за мерзлотой). Ежегодно публикуется обновленная сводка-обобщение международной деятельности [Smith et al., 2021].

Однако этих данных совершенно недостаточно для адекватного описания всего многообразия особенностей теплового состояния многолетнемерзлых горных пород из-за исключительно сложного мозаичного строения северных ландшафтов, когда размер природно-территориальных комплексов (ПТК) измеряется первыми километрами, часто сотнями метров, а их геокриологические условия сильно различаются.

То есть задачи регионального и локального уровня на настоящий момент не обеспечены фоновой геокриологической информацией.

Теоретической основой геосистемного подхода является представление о том, что геосистемы образуют пространственную иерархию, где таксоны каждого уровня могут быть типизированы по комплексу внутренних свойств и внешних признаков, видимых как на местности, так и по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [Ландшафты..., 1983; Дроздов, 2004; Попова, 2012]. Следует отметить, что свойствами геосистем могут быть не только сами их природные характеристики, но и типовые реакции геосистем на те или иные виды техногенеза.

На основе натурного и дистанционного опробования возможно описание природного состояния таксонов, а на основе данных о типовых реакциях геосистем возможен феноменологический и временной геотехнический прогноз техногенеза. Последним этапом является временной геокриологический прогноз, учитывающий трансформацию природных условий. В нашем случае это мониторинг природных условий: 1) метеорологический мониторинг, уже более 100 лет достаточно эффективно осуществляемый гидрометеослужбой России, и 2) геокриологический мониторинг, зачатки которого, как указано выше, едва теплятся в РАН, вузах и организациях Роснедра.

Хозяйствующими субъектами фоновый мониторинг природных условий проводится очень ограниченно, что можно продемонстрировать на примере территории Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения. Здесь по ландшафтному признаку выделяется 52 типа урочищ (минимальных по размеру геосистем), информация о которых обеспечивает планирование развития инфраструктуры. Нередко два типа урочища образуют своеобразные устойчивые ПТК. Этих комплексов почти на порядок больше, чем урочищ –

359. Каждый из типов урочищ или их комплексов может встретиться на различных морских и речных террасах в разных природных подпровинциях и местностях региона. В результате количество самостоятельных типов ландшафтных единиц возрастает до 2500. В идеале для каждого из них должны быть данные о температуре и свойствах грунтов. Но в реальности по состоянию на август–сентябрь 2021 г. на месторождении осталось всего 14 наблюдательных скважин фонового мониторинга глубиной 10 м, достигающих глубины нулевых годовых амплитуд температурных колебаний.

Очевидно, что речь не должна идти о бурении 2500 наблюдательных геокриологических скважин, нужен научно обоснованный минимум точек наблюдения и обоснованное распределение этого минимума по специально выбираемым полигонам, стационарам и площадкам в криолитозоне. В состав этого комплекса, помимо упомянутых 10-метровых скважин, должны входить 30-метровые скважины для уверенной фиксации реакции мерзлоты на 11-летний солнечный цикл и 100-метровые скважины для учета влияния многовековых колебаний. Выбор площадок определяется, с одной стороны, необходимостью охватить разнообразие природных условий, а с другой – очередностью освоения территорий и регионов (рис. 1).

Намеченная правительством программа создания 140 новых наблюдательных геокриологических скважин на метеостанциях Росгидромета [ТАСС..., 2021] проблему не решит, так как мерзлотные обстановки метеоплощадок не являются репрезентативными для геокриологических условий регионов. Более того, решение разместить геокриологические скважины на метеостанциях следует считать глубоко ошибочным: оно приведет не только к получению неверной информации, но и закроет путь для выполнения работ по фоновому мониторингу для других ведомств, поскольку ответственность за это направление работ возложена на Росгидромет. Необходимость срочного пересмотра Программы Росгидромета отмечена в соответствующем Заключении РАН [2021].

В итоге сложилась ситуация, при которой из-за недостаточного внимания и финансирования геокриологических мониторинговых работ научных институтов и профильных государственных ведомств в Арктике существенно снижается эффективность фоновых мониторинговых геокриологических исследований, в которых некогда СССР был на передовых позициях, а ныне Россия отстает от других заинтересованных стран. А без надежных фоновых наблюдений за температурой пород, таликами, криогенными процессами, режимом подземных вод, состоянием растительных покровов, глубиной сезонного оттаивания грунтов, гидрометеорологическими параметрами в значительной степени обесценивается объектный

**ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ (ДЗЗ)**

- Экзогенные процессы и снежный покров**  
Периодичность съемки: 4 раза в год  
Разрешение: 5–6 м/пиксель
- Тепловая инфракрасная съемка**
- Интерферометрия поверхности объектов кап. строительства объектов ТЭК**  
Периодичность съемки: 2 раза в год
- Спектрональные съемки**  
Периодичность: 4 раза в год по сезонам  
Разрешение: 5–6 м/пиксель

**ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ СТАЦИОНАР**

**ХАРАКТЕРИСТИКИ**

- Площадь: 30 км<sup>2</sup>
- Количество: минимум один на полигон
- Наблюдательные термометрические скважины**  
Воздушно-сухие скважины, наполненные песком
- Внешняя колонна – 146 мм
- Внутренняя колонна с термокозой: d = 57 мм
- Измерения 4–6 раз в сутки
- Измерение температуры с мин. точностью 0,1 °С
- 100 % отбор керна 108–112 мм во всех скважинах
- Почвенные покровы и влажность сезонноталого слоя**

**Гидрологическая скважина до подмерзлотного водного горизонта**

- 1 скв. H > 250 м
- Измерение t, °С и P, Па

**Тепловые потоки**

**Снежный покров**

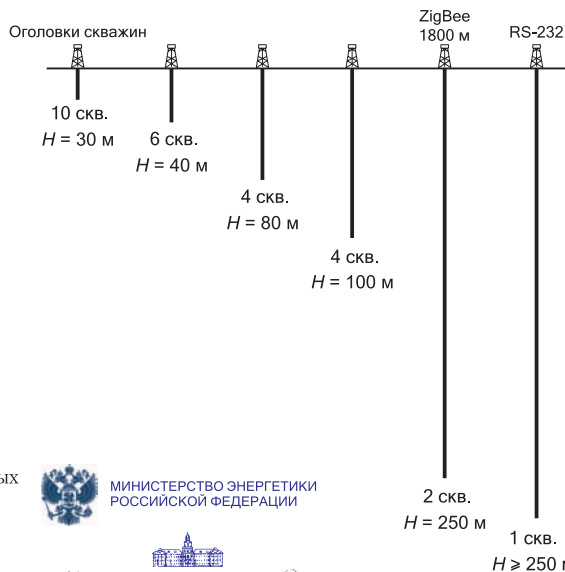
**Гидрогеологический режим**

**Гидрологический режим**

**Экзогенные мерзлотно-геологические процессы**

- БПЛА и малая авиация: аэрофотосъемка

**Геофизические исследования**



**ФОНОВЫЙ МОНИТОРИНГ**

- Термометрия: скважины глубиной от 30 м
- Мониторинг сезонноталого слоя
- Геофизические исследования



**Рис. 1. Перспективные элементы системы мониторинга многолетнемерзлых грунтов в топливно-энергетическом комплексе.**

геотехнический мониторинг, достаточно широко внедряемый компаниями ТЭК, а также другими земле- и недропользователями.

**Геотехнический мониторинг в РФ**

Под геотехническим мониторингом природно-технических систем (ПТС) или геотехнических систем обычно понимают комплекс мер по контролю, прогнозированию и управлению их состоянием для обеспечения эксплуатационной надежности и экологической безопасности [СП 22.13330.2016, 2016]. ПТС включают две основные подсистемы: первая связана преимущественно с природной составляющей, вторая связана преимущественно с искусственной составляющей. Эти подсистемы взаимодействуют друг с другом и пересекаются как в пространстве признаков, так и в геометрическом пространстве [Бондарик, 1981, 1993]. Они оказывают влияние друг на друга, в результате чего функционирование технического объекта зависит от природных условий и их динамики, и, наоборот, условием сохранения окружающей среды является проектное функцио-

нирование объекта. Геотехнический мониторинг должен отслеживать течение и результаты этого взаимодействия для их оценки и принятия текущих решений по оптимальному управлению техническими системами с обеспечением экологической безопасности и сохранения природы.

В арктических регионах на предприятиях нефтегазовой отрасли и угольных компаний, на тепло- и гидроэнергетических станциях, в крупных городах и поселках проводится геотехнический мониторинг, в состав которого входят наблюдения за температурой пород, уровнем грунтовых вод и деформациями на инженерных объектах. К сожалению, недостатком этого мониторинга является почти полное отсутствие в его составе наблюдений за фоновой обстановкой в ближайших окрестностях. Имеющаяся в стране разреженная сеть фоновой мониторинга характеризует региональные тренды, она не способна обеспечить необходимую детальность текущей, а тем более прогнозной геокриологической информации для конкретных предприятий и муниципалитетов.

Кроме того, неурегулированность организационно-технических вопросов обмена данными ГТМ предприятий разной подчиненности и форм собственности ограничивает распространение даже имеющихся данных, которые могли бы быть полезными для обеспечения текущей жизнедеятельности, для нового строительства, научных исследований, а также для других недропользователей.

Использование только относительно доступных данных о среднегодовой температуре воздуха не позволит предсказать изменения в ММГ, так как для прогноза требуется еще целый набор текущих и мониторинговых сведений о параметрах мерзлых пород, деятельном слое, о геометрии поверхности [Геокриология..., 2020]. В свою очередь, получение этих сведений требует выполнения комплекса наблюдений: дистанционного зондирования Земли, геофизических исследований, системы геотехнического контроля (включая наблюдения и измерения в скважинах).

Регулярно получаемые данные от ДЗЗ позволяют оценить изменения на поверхности с учетом кратко- и долгосрочных климатических колебаний. В качестве примера для геотехнического мониторинга магистральных нефтегазопроводов возможно применение следующих методов ДЗЗ.

- Точечная радиолокационная интерферометрия – мониторинг положения трубопровода за счет спутниковой радиолокационной съемки и угловых отражателей из алюминия или углепластика. При этом существующее оборудование может обеспечивать измерение деформаций и подвижек с погрешностью 2–5 мм.

- Высокоточная фотограмметрия – мониторинг смещения земной поверхности за счет применения беспилотных летательных аппаратов, несущих следующее основное оборудование: стабилизированную видеокамеру и тепловизор, фотокамеру, геодезический приемник глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС-приемник). Использование этого метода позволяет обнаруживать пучение, карстовые, оползневые и эрозионные процессы, а также подтвердить данные со спутников. Чувствительность метода порядка 5 см.

- Площадная радиолокационная интерферометрия – мониторинг геометрии земной поверхности и глобальных геодинимических процессов посредством космической радиолокационной съемки.

- Мониторинг изменения ситуации на поверхности с помощью зарубежных орбитальных систем (COSMO-SkyMed, Ikonos, QuickBird, WorldView, GeoEye-1) и российских систем (два космических аппарата “Арктика-М”, первый из которых выведен на орбиту 28 февраля 2021 г.; перспективная система ДЗЗ “Смотр”, включающая радиолокационные спутники “СМОТР-Р”, оптические аппара-

ты “СМОТР-В” и инфракрасные – сегмент группировки спутников “СМОТР-И”).

Развитая служба сервисных геофизических услуг в нефтегазовой отрасли делает актуальным для России широкое использование геофизических методов получения данных о распространении и мощности ММГ, о содержании льда и мощности сезонноталого слоя. Методы электрического, электромагнитного, радиолокационного каротажа, сейсмические исследования позволяют получить подробные данные о залегании ММГ, льдистости и влажности грунтов, температурном градиенте в толще ММГ. Геофизические данные по ММГ должны верифицироваться прямыми наблюдениями (измерениями) в скважинах.

На основе собранных данных дистанционного зондирования Земли и геофизических данных возможно провести принципиальное моделирование распространения ММГ в том или ином регионе, в последующем регулярно обновляя модель согласно новым данным ДЗЗ, скважинных датчиков, периодической (или мониторинговой) геофизики.

Локальные методы исследования включают прежде всего скважинные данные:

- термометрические измерения – постоянно на ежедневной основе;
- гидрогеологические наблюдения – периодически;
- гидрологические наблюдения – периодически;
- нивелирование грунтовых реперов и деформационных марок на местности по периметру промышленных объектов ТЭК и непосредственно на самих объектах;
- в снежный сезон проведение не реже 3 раз в год снегомерной съемки.

Для промышленных и гражданских зданий и сооружений требуется разработка систем контроля и расчета напряженно-деформированного состояния, учитывающих отклонение их геометрии от расчетной.

Система геотехнического контроля рассматривается как составная часть производственного эксплуатационного контроля зданий и сооружений и составная часть системы промышленной безопасности. Система геотехнического контроля подразумевает создание специализированных подразделений, служб геотехнического мониторинга, являющихся центрами ответственности за данное направление работы.

Геотехнический контроль на всех стадиях существования объектов, с момента начала их проектирования и выполнения инженерных изысканий, включая стадию строительства и эксплуатации, решает следующие задачи.

1. Постоянный инструментальный контроль динамики геокриологических условий в основа-

ниях инженерных объектов и пространственного положения несущих конструкций, оборудования и трубопроводов и их соответствия проектным и нормативным требованиям.

2. Мониторинг динамики опасных экзогенных мерзлотно-геологических процессов в зоне потенциального воздействия на инженерные сооружения.

3. Комплексный геотехнический прогноз динамики геокриологических условий и устойчивости оснований и фундаментов, в том числе с использованием нестационарных численных методов теплотехнического и термомеханического моделирования.

4. Контроль напряженно-деформированного состояния конструкций зданий, сооружений, оборудования и трубопроводов с использованием инструментальных и расчетных методов.

5. Контроль процесса проектирования оснований и фундаментов объектов, включая объемы и качество инженерных изысканий, выбор площадок для строительства, принятие принципиальных строительных решений.

6. Разработка и реализация технических мероприятий по предотвращению развития недопустимых деформаций зданий и сооружений, стабилизации оснований и фундаментов.

7. Совершенствование нормативной и методической базы в области проектирования и строительства на многолетнемерзлых грунтах.

#### **Геотехнический мониторинг на объектах ПАО “Газпром”**

Впервые на объектах Газпрома системные режимные геотехнические наблюдения начаты на месторождении Медвежье (первенце газовой промышленности на севере Западной Сибири) в середине–конце 1980-х гг. В то время на месторождении стали развиваться масштабные деформации оснований и фундаментов газопромысловых объектов, обусловленные сложными мерзлотно-геологическими условиями, ошибками проектирования и некачественным строительством. В конечном счете это выливалось в многочисленные отказы работы оборудования. Для разрешения ситуации в конце 1980-х гг. в составе ПО “Надым-газпром” было создано специализированное подразделение – лаборатория надежности фундаментов, в функциональные обязанности которой входила организация и проведение режимных наблюдений за динамикой геокриологических условий площадок газовых промыслов и за устойчивостью оснований и фундаментов. Деятельность лаборатории стала прообразом геотехнического мониторинга.

По мере ввода в эксплуатацию новых месторождений и развития соответствующей газотранспортной сети на севере Западной Сибири, т. е.

с увеличением количества объектов, подверженных мерзлотным деформациям, технология геотехнического мониторинга стала внедряться повсеместно – на Уренгойском, Ямбургском и Заполярном месторождениях, на объектах Трансгаза. К настоящему времени, с вводом в действие корпоративных стандартов ПАО “Газпром”, система геотехнического мониторинга стала обязательным элементом при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов газовой промышленности [СТО Газпром 2-3.1-072-2006, 2006].

Кроме корпоративных норм, ведение геотехнического мониторинга определяется требованиями федерального законодательства (федеральных законов “О промышленной безопасности” № 116-ФЗ и “Технический регламент о безопасности зданий и сооружений” № 384-ФЗ, сводов правил, регламентирующих строительство и эксплуатацию инженерных объектов в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов).

В дочерних компаниях ПАО “Газпром” геотехнический мониторинг ведется на всех стадиях существования объектов, с момента начала проектирования и выполнения инженерных изысканий, на стадиях строительства и эксплуатации.

В соответствии с нормативными требованиями и сложившейся практикой проектировщик в проектной и рабочей документации на строительство газопромысловых объектов обязан привести обоснованные данные о допустимом температурном режиме ММГ в основаниях инженерных сооружений на момент передачи нагрузки на фундаменты и на период эксплуатации. В составе проектной и рабочей документации предусматривается система геотехнического мониторинга, представляющая собой системно расположенные термо- и пьезометрические наблюдательные скважины, глубинные геодезические реперы и деформационные марки в объеме, позволяющем получать геотехническую информацию, достаточную для диагностирования текущего состояния объектов и прогнозирования динамики геотехнических условий.

С целью сокращения объема трудозатрат на проведение геотехнического мониторинга в последние годы активно внедряются системы регистрации геотехнических параметров (температуры ММГ, пространственного положения конструкций) с использованием приборов с автоматизированной системой опроса датчиков (логгеров) и передачей результатов измерений на центральные пункты сбора по радиоканалу или проводным системам связи. Внедрены датчики, регистрирующие напряжения в строительных конструкциях, инклинометры для регистрации кренов. Создается специализированное программное обеспечение, позволяющее автоматизировать процессы обработки результатов измерений и в



итоге создавать интерактивную локальную геоинформационную систему комплексного (фонового и геотехнического) мониторинга [Rivkin et al., 2010].

Производственная практика свидетельствует о том, что на объектах с реализованной системой геотехнического мониторинга аварии, недопустимые деформации, отказы оборудования, происходящие по причине развития деформаций, обусловленных мерзлотно-геологическими процессами, практически исключаются. Выполнение режимных наблюдений позволяет выявлять тенденции к формированию нештатных состояний геотехнических систем до достижения ими недопустимых состояний, своевременно разрабатывать управляющие технические решения, включая их в планы текущих, капитальных ремонтов и реконструкции.

#### **Геотехнический мониторинг на объектах ПАО “Транснефть”**

С целью систематического наблюдения, измерения и контроля параметров объектов магистральных нефтепроводов, расположенных в АЗРФ, в ПАО “Транснефть” с 2011 г. разработана и реализована система геотехнического мониторинга. Мониторингу подлежат магистральные нефтепроводы общей протяженностью более 7049 км, 45 площадочных объектов и 248 резервуаров.

Мониторинг выполняется на основании результатов полевых обследований, воздушных и наземных лазерных сканирований, внутритрубной диагностики и включает контроль состояния оснований фундаментов, многолетнемерзлых грунтов, геологических процессов, геометрии и напряженно-деформированного состояния нефтепроводов [Макарычева и др., 2019]. Порядок и объем работ определен в соответствии с проектной документацией, отраслевыми нормативными и руководящими документами ПАО “Транснефть” и утвержденной программой мониторинга, учитывающих требования Государственных норм и правил, распространяющихся на основания и фундаменты зданий и сооружений на ММГ [СП 25.13330.2020; СП 497.1325800.2020; СП 305.1325800.2017].

В соответствии с утвержденной программой мониторинга предусматривается контроль положения нефтепроводов по 7229 устройствам определения высоты 2 раза в год, положения 20 047 опор нефтепроводов 2 раза в год, положения 653 узлов запорной арматуры и 118 камер средств очистки и диагностики 2 раза в год, положения 75 796 опор воздушных линии электропередач 1 раз в год, температуры грунта по 5348 термометрическим скважинам ежемесячно, работоспособности 103 907 термостабилизаторов грунта в

зимний период, 654 участков (102 км) с экзогенными геологическими процессами, а также контроль положения 248 резервуаров 2 раза в год, положения 3542 зданий и сооружений нефтеперекачивающих станций (НПС) 2 раза в год, положения нефтепроводов НПС по 1657 устройствам определения высоты 2 раза в год, температуры грунта на НПС по 1284 термометрическим скважинам ежемесячно, работоспособности 41 604 термостабилизаторов грунта на НПС в зимний период, уровня подземных вод по 32 гидрогеологическим скважинам 4 раза в год. Вложения в мониторинг ежегодно увеличиваются: «Транснефть» в 2021 г. направила 615 млн рублей на мониторинг производственных объектов в зоне вечной мерзлоты, следует из презентации компании... В 2022 г. “Транснефть” планирует увеличение совокупного финансирования этого направления до 30 %» [ПАО “Транснефть” ..., 2022].

Результаты выполненных работ вносятся в созданную ООО “НИИ Транснефть” геоинформационную систему, которая имеет встроенные программно-аналитические модули, объединяющие данные проектной, исполнительной документации, результаты обследований и измерений и позволяет выполнять комплексный анализ мониторинга, его планирование и контроль исполнения. Данная работа осуществляется аналитическим центром на базе Центра мониторинга и геоинформационных систем объектов трубопроводного транспорта ООО “НИИ Транснефть”. Далее, с использованием разработанных ПАО “Транснефть” расчетных методик оценки температуры стенки, изменения положения магистрального нефтепровода, его напряженно-деформированного состояния и изменения величины радиусов изгиба трубных секций, выполняется моделирование и прогнозирование изменений параметров объектов магистрального нефтепровода в окружающей его среде. По результатам моделирования формируются и реализуются компенсирующие мероприятия по обеспечению безопасной и надежной эксплуатации объектов магистральных нефтепроводов на проектных режимах.

Дополнительно, в местах пересечения магистральных нефтепроводов с тектоническими разломами и оползнеопасными участками, для контроля внешних воздействий в режиме реального времени внедрены системы непрерывного автоматизированного мониторинга и так называемые интеллектуальные вставки. Для контроля уровня сейсмического влияния на объекты магистральных нефтепроводов внедрена система контроля сейсмических воздействий, также работающая в режиме реального времени. В целом же для автоматизации контроля положения трубопроводов, несущих конструкций и оборудования на объек-

тах ПАО “Транснефть” на сегодняшний день разрабатываются автоматизированные геодезические сети на базе оборудования глобальных навигационных спутниковых систем отечественного производства.

### **Геотехнический мониторинг на гидротехнических объектах**

Геотехнический мониторинг на гидротехнических объектах проводится согласно Федеральному закону от 21.07.1997 г. № 117-ФЗ “О безопасности гидротехнических сооружений”. Элементы геотехнического мониторинга реализуются и при строительстве, и при эксплуатации сооружений. Но требование выделить геотехнический мониторинг в отдельных раздел проекта отсутствует. Проектом гидротехнического сооружения (ГТС) предусматривается мониторинг безопасности ГТС, который составляется ее собственником и(или) эксплуатирующей организацией при подготовке стандартов эксплуатации и технического обслуживания ГТС, а также декларации безопасности, т. е. основных документов, содержащих сведения о соответствии гидротехнического сооружения критериям безопасности.

В декларации безопасности должны быть отражены состав и объем натуральных наблюдений и общего контроля безопасности ГТС. В том числе перечень контролируемых показателей – критериев безопасной эксплуатации, а также состав и расположение контрольно-измерительной аппаратуры, схема ведения мониторинга, функции службы организации мониторинга безопасности ГТС и т. д. То обстоятельство, что декларация безопасности составляется именно собственником ГТС, по мнению многих специалистов, снижает для надзорных органов эффективность контроля безопасной эксплуатации ГТС, состояние которых в последние годы начинает вызывать опасения.

Кроме того, ситуация с контролем состояния гидротехнических сооружений, особенно гидроэнергетических, обостряется физическим старением сооружений. Это приводит к тому, что большинство уникальных пионерных ГТС на мерзлоте за более чем 50-летний срок эксплуатации все чаще приходит в аварийное состояние из-за недостаточного знания законов функционирования природно-технических систем в криолитозоне.

По имеющимся данным [Малик, 2005], около 48 % аварийных ситуаций на ГТС зафиксировано именно в области распространения ММГ. Причиной таких изменений является недостаток криогенных процессов, возникающих вследствие температурного воздействия водохранилищ не только непосредственно в теле грунтовых сооружений, но и в самых ответственных зонах (места береговых примыканий, зона контакта основание–плотина и другие контактные зоны).

В криолитозоне мониторинг состояния ГТС и прилегающих к гидроузлам территорий должен проводиться с учетом влияния криогенных и посткриогенных процессов, как доминирующих факторов устойчивости всего ПТК. Недочет этого приводит к крупным авариям, финансовым и экологическим проблемам. На всех северных ГЭС, где в последние десятилетия произошли аварии (Колымская, 1988 г., Курейская, 1992 г., прорыв перемычки строящейся Светлинской ГЭС, 2001 г., Саяно-Шушенская, 2009 г., Бурейская, 2019 г.), отсутствовал геокриологический мониторинг оснований.

Уровень безопасности контролируемых Ростехнадзором гидротехнических сооружений оценивается следующим образом: нормальный уровень безопасности имеют 20 % ГТС; 37 % имеют пониженный уровень безопасности; 31 % неудовлетворительный уровень; 12 % опасный уровень безопасности и не подлежат эксплуатации [Годовой отчет..., 2019].

Требуется создание современного Единого стандарта геотехнического мониторинга ГТС в криолитозоне, включающего стандарт систем наблюдения и контроля для зон активного взаимодействия основных сооружений гидроузлов и их водохранилищ с природным комплексом при прямом учете данных геокриологического мониторинга с использованием широкого комплекса геофизических методов.

### **Городская система мониторинга ММГ**

Опытная система мониторинга ММГ в г. Салехарде является одним из перспективных примеров для применения в основных населенных пунктах Арктики, служащих центрами традиционного хозяйствования, производственными базами освоения природных ресурсов регионов. В Ямало-Ненецком АО для безопасной эксплуатации зданий и сооружений в зоне многолетних мерзлых грунтов Научным центром изучения Арктики с 2018 г. разрабатывается методика автоматизированного температурного мониторинга [Громадский и др., 2019; Камнев, 2021], которая заключается в устройстве термометрических скважин в вентилируемом подполье на глубину не менее фактической длины свай под данным жилым сооружением (10 м и более). Температурные датчики устанавливаются на термокосе до глубины 5 м с шагом 0.5 м, далее – с шагом 1 м. Результаты замеров температуры автоматически собираются на сервере и дублируются на специально разработанный веб-ресурс для анализа, визуализации и экспорта данных по температуре грунтов.

Для апробации методики системами автоматической регистрации температуры “САМ-мерзлота” в 2018–2021 гг. оборудовано 8 зданий в г. Салехарде и 1 здание в г. Новый Уренгой –

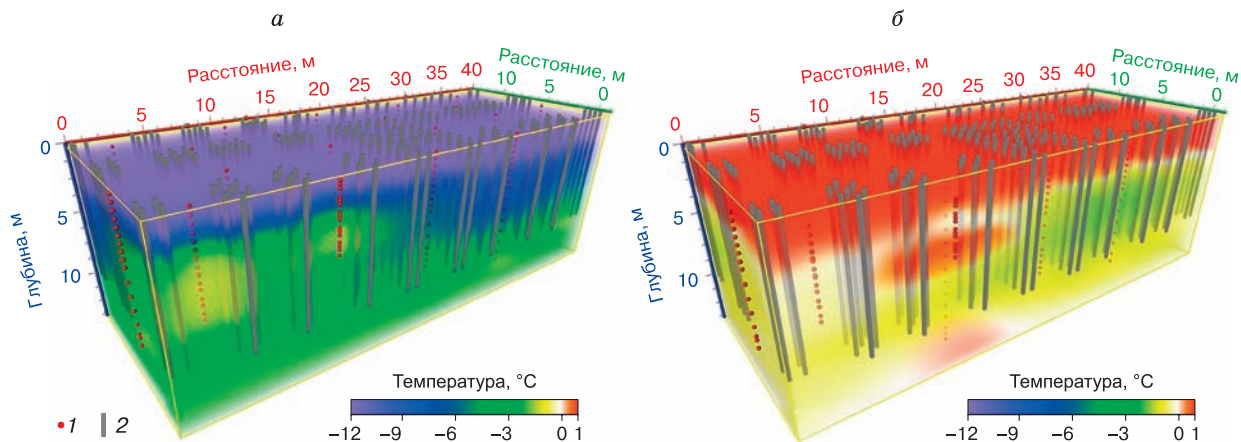


Рис. 2. Трехмерная интерполяция средненедельной температуры грунтов, измеренной в основании фундамента жилого дома в г. Салехарде (ул. Зои Космодемьянской, 68).

а – 22–28 февраля 2021 г.; б – 23–29 августа 2021 г.; 1 – температурные датчики; 2 – сваи.

26 комплектов “САМ-мерзлота”, более 100 термометрических скважин. Мониторинг выявил под одним из зданий локальную талую зону (рис. 2), сформированную, вероятно, инфильтрующимися утечками из коммуникаций.

Дальнейший температурный мониторинг Салехарда позволит получить данные, которые будут использованы для расчета нестационарного температурного поля с последующим пересчетом (с учетом геокриологического строения) в прогнозную несущую способность фундаментов контролируемых сооружений на несколько лет вперед.

#### Федеральная система мониторинга в ТЭК

Для прогнозирования состояния вечной мерзлоты и обеспечения мероприятий по предотвращению ущерба необходима система государственного мониторинга, объединяющая сети наблюдений и аналитические центры министерств, ведомств, региональных органов власти и хозяйственных предприятий, в лице федерального оператора.

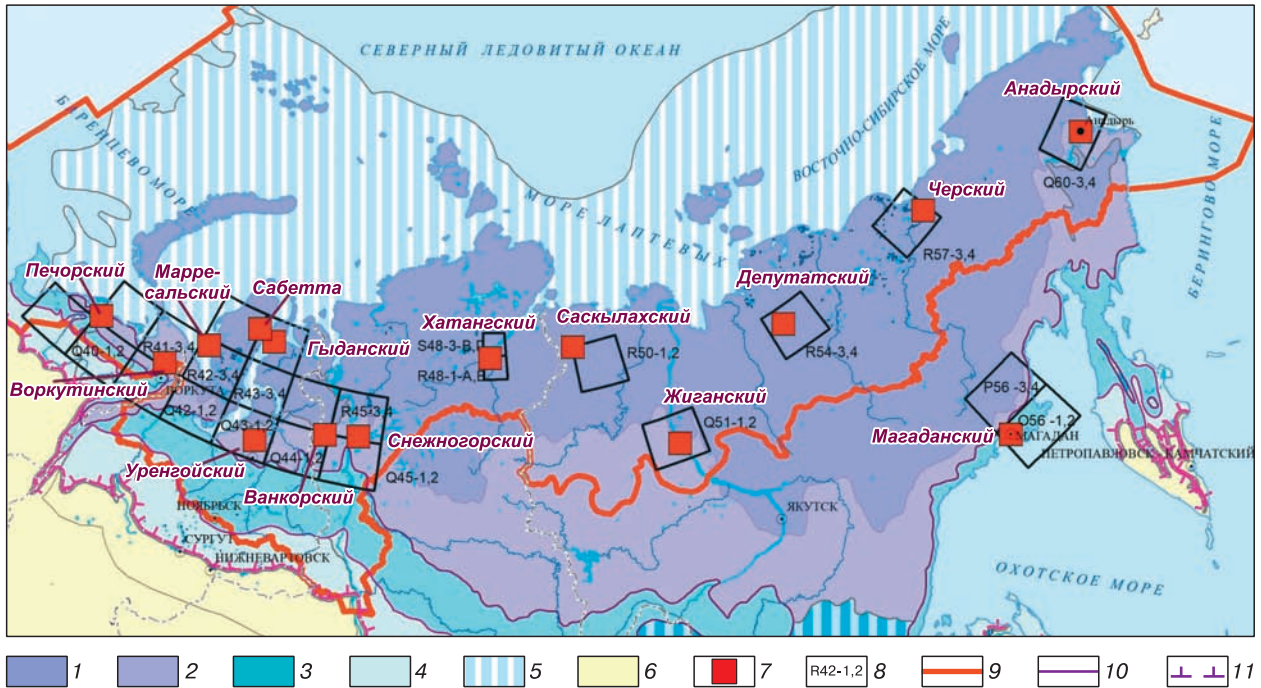
Первоначальной основой системы мог бы стать массив геокриологических данных, системно собираемых государственными и частными компаниями ТЭК, базовыми для экономики регионов АЗРФ, крупными недропользователями в лице ПАО “НК Роснефть”, ПАО “Газпром”, ПАО “НОВА-ТЭК” и других, которые проводят собственные работы по мониторингу вечной мерзлоты [Крюков, 2020]. Важна разработка единой методики и требований к наблюдательной сети фонового мониторинга и ГТМ, определение перечня контролируемых параметров, состава выходной информации и регламента работы, профессиональное обоснование создания и размещения стационаров и иных пунктов получения данных.

Новый подход заключается в поэтапном создании системы государственных геокриологических полигонов как высшего звена мониторинга вечной мерзлоты на уровне страны, объединяющего фоновые геокриологические стационары и объекты геотехнического мониторинга недропользования, промышленных сооружений, транспортных систем, муниципальных образований и поселений [Дроздов, Дубровин, 2016; Мельников и др., 2021].

Для системного мониторинга и прогнозирования изменения ММГ на всей территории страны, в соответствии с текущим сосредоточением инфраструктуры компаний ТЭК и планируемых проектов, предполагается создание 15 геокриологических полигонов и стационаров (рис. 3). Мерзлотные станции предположительно будут расположены в Архангельске (Сыктывкаре), Воркуте, Салехарде, Норильске, Якутске, Магадане (Анадыре).

Предлагаемая к реализации система мониторинга в ТЭК должна включать региональные наблюдательные сети полигонов, стационаров, мерзлотных станций и аналитические центры, данные систем ГТМ предприятий ТЭК и проектно-технологических предприятий по реконструкции и восстановлению зданий и сооружений в регионах. Система сможет обеспечивать мерзлотный прогноз для государственных и частных хозяйствующих субъектов в регионах, правительства РФ, субъектов федерации и муниципальных образований.

Для получения практических производственных результатов от использования собираемых на разрозненных объектах ТЭК данных следует объ-



**Рис. 3. Макет размещения геокриологических полигонов государственного мониторинга вечной мерзлоты на геокриологической карте РФ.**

Геокриологические зоны: 1 – сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП) (среднегодовая температура пород ниже  $-5^{\circ}\text{C}$ ); 2 – сплошного распространения ММП ( $-1...-5^{\circ}\text{C}$ ); 3 – прерывистого и массивно-островного распространения ММП; 4 – островного распространения ММП; 5 – криолитозона на шельфе морей; 6 – зона талых пород. Мониторинговая сеть: 7 – геокриологические полигоны и их названия; 8 – границы листов карт масштаба 1:500 000, выбранные для обоснования объектов мониторинга. Границы: 9 – Арктической зоны РФ; 10 – геокриологических зон; 11 – распространения ММП.

единить системы мониторинга отдельных предприятий ТЭК в одну программно-аналитическую систему [Zhdaneev et al., 2021] с возможностью прогнозирования изменений температуры и сплошности ММП, параметров деятельного слоя за период от одной недели до нескольких лет в границах субъектов РФ.

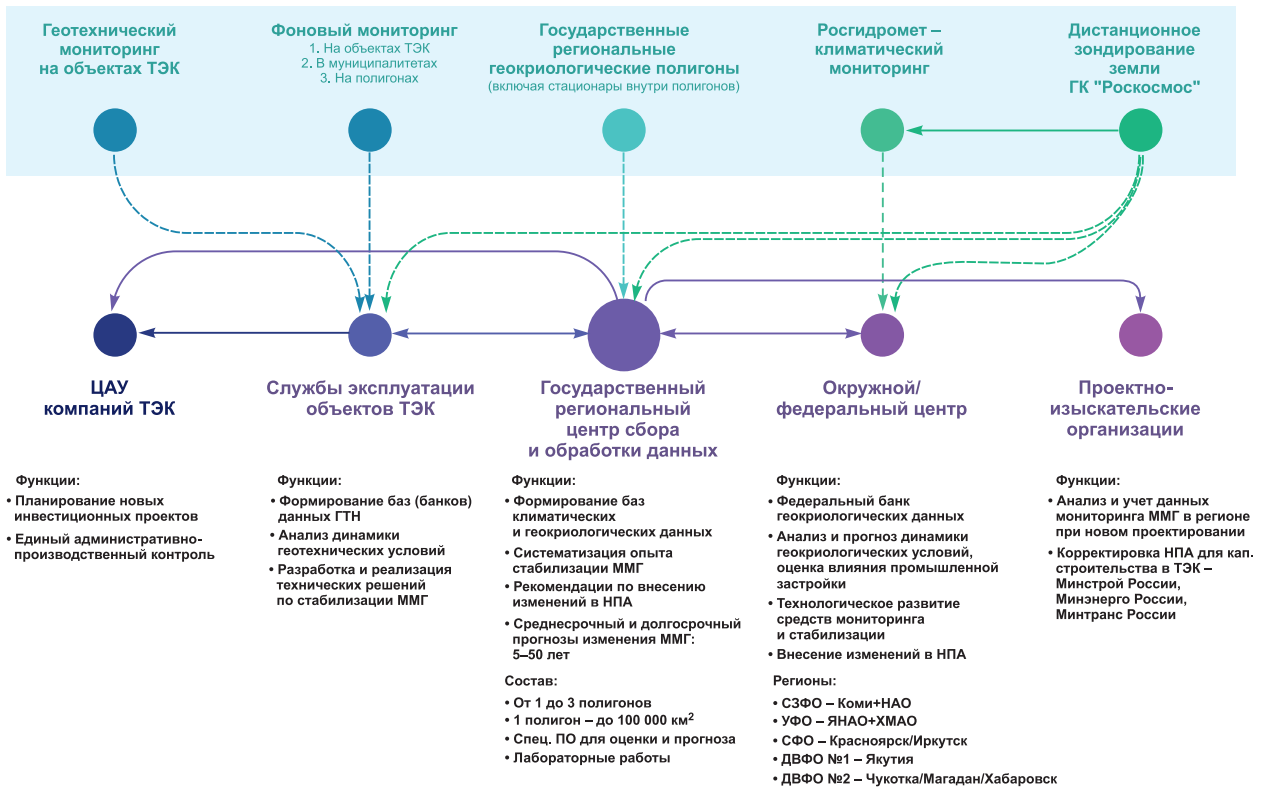
Система мониторинга ТЭК должна послужить основой для планируемой принципиальной системы мониторинга ММП в масштабах всей страны (рис. 4). Согласно оценкам, на развертывание системы мониторинга в масштабах страны требуется около 10–12 млрд руб., а на ежегодное обеспечение ее функционирования – порядка 5 млрд руб.

При оценке затрат на создание и содержание инфраструктуры и наблюдательной сети скважин стационаров и полигонов было сделано разделение их на две группы: 1) Европейская и Западно-Сибирская; 2) Восточно-Сибирская и Дальневосточная. Это обусловлено тем, что эти макро-регионы значительно различаются по строению и мощности мерзлых толщ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С 1970-х гг. российская криолитозона испытывает устойчивое воздействие восходящей ветви глобальных флуктуаций климата. Предприятия ТЭК, одного из крупнейших хозяйствующих субъектов в АЗРФ, подвергаются влиянию изменяющейся мерзлоты, что требует учета не только текущих, но и прогнозных ее характеристик. Однако в настоящее время выполнить достоверный прогноз изменения состояния ММП, необходимый для обеспечения бесперебойной работы существующей инфраструктуры ТЭК и разработки новых инвестиционных проектов в криолитозоне России, на период трех-четырёх лет не представляется возможным из-за отсутствия взаимосвязанных системных данных комплексного фонового и геотехнического мониторинга криолитозоны.

Фоновый мониторинг в природных условиях в Российской Федерации проводится отдельными учреждениями Минприроды РФ, РАН и Минобрнауки РФ на ограниченном количестве наблюдательных площадок. Длина рядов наблюдений до-



**Рис. 4. Система мониторинга многолетнемерзлых грунтов на объектах топливно-энергетического комплекса как составная часть общего мониторинга криолитозоны.**

ТЭК – топливно-энергетический комплекс; ЦАУ – центральный аппарат управления; ГТН – геолого-технический надзор; НПА – нормативно-правовые акты; ПО – программное обеспечение; ГК – государственная корпорация; СЗФО – Северо-Западный федеральный округ; УФО – Уральский федеральный округ; СФО – Сибирский федеральный округ; ДВФО – Дальневосточный федеральный округ; НАО – Ненецкий автономный округ; ЯНАО – Ямало-Ненецкий автономный округ; ХМАО – Ханты-Мансийский автономный округ.

стигает 50 лет, но общий охват наблюдениями многообразия природных условий российской криолитозоны явно недостаточен.

Геотехнический мониторинг, включающий температурные измерения, проводится предприятиями ТЭК и другими региональными производственными организациями и муниципалитетами по различным методикам, зачастую в неполном объеме и без учета природных тенденций, анализа получаемых данных и прогноза возможных последствий, а также при отсутствии межведомственной системы обмена данными.

Возможность достоверного прогноза изменения состояния ММГ на среднесрочную (15–50 лет) и долгосрочную (свыше 50 лет) перспективу ограничена отсутствием обмена данными по фоновому и геотехническому мониторингу, а также внутри ТЭК между его компаниями в пределах регионов и на федеральном уровне. Это происходит на фоне крайней недостаточности данных фонового мониторинга криолитозоны во всех регионах активной экономической деятельности.

Важной частью адаптации к климатическим изменениям в перспективе должна стать система государственного межведомственного мониторинга состояния криолитозоны, включающая как анализ фоновых и геотехнических наблюдений, так и разработку на их основе прогнозов и технических решений по инженерной защите и природоохранному мероприятиям для принятия управленческих решений [Дубровин и др., 2019]. Соответствующая "Концепция изучения и мониторинга вечной мерзлоты в связи с освоением Арктической зоны Российской Федерации" разработана и получила одобрение в научных советах ведущих вузов и академических институтов страны [Мельников и др., 2018, 2021]. Система должна создаваться поэтапно и обеспечивать потребности хозяйствования и рационального природопользования, прежде всего решения задач предотвращения экологических аварий и принятия инвестиционных решений по развитию и реконструкции в криолитозоне объектов ТЭК, а также инфраструктуры других субъектов хозяйствования и муниципалитетов.

С учетом масштабов АЗРФ и новых климатических вызовов реорганизация существующих ведомственных систем мониторинга криолитозоны требует **создания новой структуры управления и системы финансирования этих работ**. Такой структурой могло бы стать “Федеральное агентство по вечной мерзлоте” (или “Комитет...”, как было в тридцатые годы) при Правительстве РФ, с полномочиями, обеспечивающими создание в Арктике межведомственной системы мониторинга с интеграцией в нее сетей различных ведомств и предприятий, и соответствующими законодательными правами. Важнейшей составляющей этой концепции является создание **Федерального (межведомственного) аналитического центра и не менее шести региональных филиалов в крупных городах Заполярья**. Это необходимо для сбора, анализа, разработки прогнозов и технических решений по обеспечению устойчивости промышленной и гражданской инфраструктуры на унифицированной методической и приборно-аналитической основе. Такие центры могут быть созданы на базе действующих профильных учреждений, имеющих соответствующие кадры, научную и производственную базу. Однако необходимо их усиление высококвалифицированными специалистами-геокриологами и соответствующим материально-техническим обеспечением.

На этапе подготовки реализации программы мониторинга необходима разработка нормативно-методических документов (ГОСТов, требований, рекомендаций, инструкций и пр.), без которых нельзя представить научно обоснованную унификацию построения наблюдательной сети, обработку мониторинговой информации и построение государственных геокриологических прогнозов.

Учитывая междисциплинарность и сложность задач мониторинга и прогнозирования изменений ММГ, поиска оптимальных инженерных решений по стабилизации мерзлоты, целесообразно создание межведомственной рабочей группы при Правительстве РФ с привлечением представителей профильных министерств, компаний ТЭК, профильных институтов РАН, учреждений Минобрнауки, представителей северных администраций для широкого обсуждения вопроса создания пилотного регионального проекта системы государственного межведомственного мониторинга вечной мерзлоты [Дубровин и др., 2019].

Пилотный проект предлагается реализовать в виде региональной системы мониторинга многолетнемерзлых грунтов на объектах ТЭК на базе отдельных субъектов Российской Федерации, где ММГ занимают значительную часть площади и где проблемы изменения климата, деградации вечной мерзлоты и обеспечения устойчивости зданий и инженерных сооружений являются наиболее актуальными. Пилотными регионами могут высту-

пить Ямало-Ненецкий автономный округ, Ненецкий автономный округ, Красноярский край, Республика Саха (Якутия) и другие регионы.

Система государственного мониторинга вечной мерзлоты при надлежащем ее исполнении может существенно снизить, а в ряде случаев полностью исключить технические, экономические и экологические риски освоения арктических территорий РФ. Но не следует забывать, что точность оценки состояния ММГ и необходимость долгосрочных прогнозов изменения среды и климата во многом зависят от фундаментальных исследований всей криосферы Земли.

## Литература

- Бондарик Г.К.** Общая теория инженерной (физической) геологии. М., Недра, 1981, 256 с.
- Бондарик Г.К.** Социально-экологические проблемы и инженерная геология // Геозология, 1993, № 4, с. 27–31.
- Вопросы** технической политики отраслей ТЭК Российской Федерации / Под ред. О.В. Жданеева. М., Наука, 2020, 304 с.
- Геокриология:** Характеристики и использование вечной мерзлоты / Под ред. А.В. Брушкова. М.; Берлин, Direct-MEDIA, 2020, 437 с.
- Годовой отчет** о деятельности федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2019 году / О.В. Жданеев [Электрон. ресурс]. – [https://www.gosnadzor.ru/public/annual\\_reports/Годовой%20отчет%20о%20деятельности%20Ростехнадзора%20в%202019%20году.pdf](https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/Годовой%20отчет%20о%20деятельности%20Ростехнадзора%20в%202019%20году.pdf) (дата обращения: 29.05.2022).
- Громадский А.Н., Арефьев С.В., Волков Н.Г. и др.** Дистанционный контроль за температурным режимом вечномерзлых грунтов под зданиями г. Салехарда // Науч. вестн. ЯНАО, 2019, № 3, с. 17–21. – <https://doi.org/10.26110/ARCTIC.2019.104.3.003>
- Дроздов Д.С.** Информационно-картографическое моделирование природно-техногенных сред в геокриологии: Дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Тюмень, 2004, 409 с.
- Дроздов Д.С., Дубровин В.А.** Геоэкологические проблемы нефтегазового недропользования в российской Арктике // Криосфера Земли, 2016, т. XX, № 4, с. 16–27.
- Дроздов Д.С., Малкова Г.В., Романовский В.Е. и др.** Цифровые карты криолитозоны и оценка современных изменений в криолитозоне // Актуальные проблемы геокриологии: Сб. докл. расшир. заседания Науч. совета по криологии Земли РАН (Москва, 15–16 мая 2018 г.). М., Унив. книга, 2018, т. 1, с. 295–301.
- Дубровин В.А., Брушков А.В., Дроздов Д.С., Железняк М.Н.** Изученность, современное состояние, перспективы и проблемы освоения криолитозоны Арктики // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление, 2019, т. 166, № 3, с. 55–64.
- Заключение РАН:** Проект Федерального закона “О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части создания государственной системы мониторинга многолетнемерзлых грунтов” / Вице-президент РАН В.Н. Пармон (23.07.2021). Новосибирск, СО РАН, 2021, 2 с.
- Крюков В.А.** О взаимосвязи и взаимодействии экономической, промышленной и научно-технологической политики // Управление наукой: теория и практика, 2020, т. 2, № 2, с. 15–46.

**Ландшафты** криолитозоны Западной-Сибирской газоносной провинции // Под ред. Е.С. Мельникова. Новосибирск, Наука, 1983, 165 с.

**Макарычева Е.М., Ибрагимов Э.Р., Кузнецов Т.И., Шуршина К.Ю.** Применение воздушного лазерного сканирования для геотехнического мониторинга объектов магистрального трубопровода // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов, 2019, № 9 (1), с. 21–31.

**Малик Л.К.** Факторы риска повреждения гидротехнических сооружений. Проблемы безопасности. М., Наука, 2005, 354 с.

**Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В. и др.** Адаптация инфраструктуры Арктики и Субарктики к изменениям температуры мерзлых грунтов // Криосфера Земли, 2021, т. XXV, № 6, с. 3–15.

**Мельников В.П., Трофимов В.Т., Орлов В.П. и др.** Разработка и принятие доктрины изучения “вечной мерзлоты” – необходимый элемент стратегии развития АЗРФ // Регион. энергетика и энергосбережение, 2018, № 1, с. 40–41.

**ПАО “Транснефть”.** Некоторые сообщения первого вице-президента ПАО “Транснефть” М.С. Гришанина в ходе телеконференции с инвесторами и аналитиками 18.02.2022 [Электрон. ресурс]. – <https://www.transneft.ru/news/view/id/38511/> (дата обращения: 19.07.2022).

**Попова А.А.** Геоинформационное картографическое моделирование инженерно-геокриологических условий севера Тимано-Печорской нефтегазовой провинции по верхнему горизонту криолитозоны: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Тюмень, 2012, 139 с.

**СП 22.13330.2016.** Основания зданий и сооружений. М., Минстрой, 2016, 225 с.

**СП 305.1325800.2017.** Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве. М., Стандартинформ, 2017.

**СП 25.13330.2020.** Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М., Минстрой, 2020.

**СП 497.1325800.2020.** Основания и фундаменты зданий и сооружений на вечномерзлых грунтах. М., Минстрой, 2020, 30 с.

**СТО Газпром 2-3.1-072-2006.** Регламент на проведение геотехнического мониторинга объектов газового комплекса в криолитозоне. М., ООО “ТюменьНИИГипрогаз”, 2006, 61 с.

**ТАСС.** Первую станцию сети госмониторинга вечной мерзлоты в России создадут на острове Хейса, 01.07.2021 [Электрон. ресурс]. – <https://tass.ru/obschestvo/11802477> (дата обращения: 29.05.2022).

**Тихонов С.** Сможет ли Россия нарастить производство СПГ // Российская газета: экономика, 8 января, 2020. – URL: <https://rg.ru/2020/01/08/smozhet-li-rossiya-narastit-proizvodstvo-spg.html>

**Kamnev Y.K., Filimonov M.Y., Shein A.N., Vaganova N.A.** Automated monitoring the temperature under buildings with pile foundations in Salekhard (preliminary results) // Geography, Environment, Sustainability, 2021, vol. 14, No. 4, p. 75–82.

**Malkova G., Drozdov D., Vasiliev A. et al.** Spatial and temporal variability of permafrost in the western part of the Russian Arctic // Energies, 2022, vol. 15, No. 7, p. 2311.

**Rivkin F.M., Kuznetsova I.L., Ivanova N.V. et al.** Multi-purpose engineering geological cartographic for information support for engineering surveys, designing, and monitoring // Proc. of the 11th Congress of the IAEG (Auckland, New Zealand, 5–10 Sept., 2010). Auckland, CRC Press, 2010, p. 2415–2419.

**Smith S.L., Romanovsky V.E., Isaksen K. et al.** Permafrost. In State of the Climate in 2020 // Bull. Amer. Meteor. Soc., 2021, No. 102 (8), p. S293–S297.

**Zhdaneev O., Frolov K., Petrakov Y.** Predictive systems for the well drilling operations // Cyber-Physical Systems: Design and Application for Industry 4.0. N.Y., Springer, 2021, vol. 342, p. 347–368.

## References

Bondarik G.K. Obshchaya teoriya inzhenernoj (fizicheskoy) geologii [General theory of engineering (physical) geology]. Moscow, Nedra, 1981, 256 p. (in Russian).

Bondarik G.K. Socio-environmental issues and engineering geology. Geoecologia [Geoecology], 1993, No. 4, p. 27–31 (in Russian).

Voprosy tekhnicheskoy politiki otraslej TEK Rossijskoj Federacii [Issues of technical policy of the fuel and energy sector of the Russian Federation]. O.V. Zhdaneev (Ed.). Moscow, Nauka, 2020, 304 p. – <https://doi.org/10.7868/9785020408241>

Geokriologiya: Kharakteristiki i ispolzovanie vechmoi merzloty [Geocryology: Features and using of permafrost]. A.V. Broushkov (Ed.) Moscow; Berlin, DirectMEDIA, 2020, 437 p.

Godovoj otchet o deyatelnosti federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru v 2019 godu [Annual Report on the Activities of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision in 2019]. O.V. Zhdaneev. – URL: [https://www.gosnadzor.ru/public/annual\\_reports/Годовой%20отчет%20о%20деятельности%20Ростехнадзора%20в%202019%20году.pdf](https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/Годовой%20отчет%20о%20деятельности%20Ростехнадзора%20в%202019%20году.pdf) (last visited: 29.05.2022).

Gromadskij A.N., Aref'ev S.V., Volkov N.G. et al. Remote monitoring of temperature conditions of permafrost soils under Salekhard buildings. Nauchnyj vestnik YANAO [Scientific Bulletin of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug], 2019, No. 3, p. 17–21. – <https://doi.org/10.26110/ARCTIC.2019.104.3.003>

Drozdov D.S. Informacionno-kartograficheskoe modelirovanie prirodno-tekhnogennykh sred v geokriologii [Information and cartographic modeling of natural and man-made environments in geocryology]: Dissertation for the degree of Doctor of Geology. Tyumen, 2004, 409 p. (in Russian).

Drozdov D.S., Dubrovin V.A. Environmental problems of oil and gas exploration and development in the Russian Arctic. Earth's Cryosphere, 2016, vol. XX, No. 4, p. 14–25.

Drozdov D.S., Malkova G.V., Romanovskii V.E. et al. Digital maps of the cryolithozone and assessment of modern changes in the cryolithozone. In: Actual Problems of Geocryology (Moscow, May 15–16, 2018). Moscow, Universitetskaja kniga, 2018, vol. 1, p. 295–301 (in Russian).

Dubrovin V.A., Brushkov A.B., Drozdov D.S., Zheleznyak M.N. Knowledge, current state, prospects and problems of development of the Arctic cryolithozone. Mineralnye resursy Rossii [Mineral resources of Russia. Economics and Management], 2019, vol. 166, No. 3, p. 55–64 (in Russian).

Conclusion of RAS: Draft of the Federal Law “On Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation Regarding the Establishment of a State System for Permafrost Monitoring”. Vice President of RAS V.N. Parmon (23.07.2021). Novosibirsk, SB RAS, 2021, 2 p. (in Russian).

Kryukov V.A. On the interconnection and interaction of economic, industrial and scientific and technological policies. Upravlenie naukoj: teoriya i praktika [Science Management: Theory and Practice], 2020, No. 2, p. 15–46. – <https://doi.org/10.19181/smtp.2020.2.2.1>

Landschafty kriolitozony Zapadnoj-Sibirskoj gazonosnoj provincii [Landscapes of the cryolithozone of the Western Siberian gas-bearing province]. E.S. Melnikov (Ed.). Novosibirsk, Nauka, 1983, 165 p. (in Russian).

- Makarycheva E.M., Ibragimov E.R., Kuznecov T.I., Shurshina K.Yu. Application of aerial laser scanning for geotechnical monitoring of trunk pipeline facilities. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov* [Science and Technologies of Oil and Petroleum Products Pipeline Transport], 2019, No. 9, p. 21–31. – <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2019-9-1-21-31>
- Malik L.K. Faktory riska povrezhdeniya gidrotekhnicheskikh sooruzhenij. Problemy bezopasnosti [Risk factors for damage to hydraulic structures. Security concerns]. Moscow, Nauka, 2005, 354 p. (in Russian).
- Melnikov V.P., Osipov V.I., Brushkov A.V. et al. Adaptation of Arctic and Subarctic infrastructure to changes in the temperature of frozen soils. *Earth's Cryosphere*, 2021, vol. XXV, No. 6, p. 3–15.
- Melnikov V.P., Trofimov V.T., Orlov V.P. et al. The development and adaptation of the doctrine of studying “permafrost” is a necessary element of the development strategy of the AZRF. *Regional'naya energetika i energosberezhenie* [Regional Energy and Energy Conservation], 2018, No. 1, p. 40–41 (in Russian).
- PAO “Transneft”. Nekotorye soobshhenija pervogo vitse-prezidenta PAO “Transneft” M.S. Grishanina v khode telekonferencii s investormi i analitikami 18.02.2022 [Some messages of the First Vice-President of PJSC “Transneft” M.S. Grishanin during a teleconference with investors and analysts on 18.02.2022] (last visited: 19.07.2022). – <https://www.transneft.ru/news/view/id/38511/>
- Popova A.A. Geoinformatsionnoe kartograficheskoe modelirovanie inzhenerno-geokriologicheskikh uslovij severa Timano-Pechyorskoy neftegazovoj provintsii po verhnemu gorizontu kriolitozony [Geoinformation cartographic modeling of engineering and geocryological conditions in the north of the Timan-Pechersk oil and gas province along the upper horizon of the cryolithic zone]. Dissertation for the degree of candidate of geology. Tyumen, 2012, 139 p. (in Russian). – <https://rosrid.ru/dissertation/detail/ekOdZnRWzxbi6TwyGJmrUBL8>
- SP [Set of rules] 305.1325800.2017. Buildings and structures. The rules of geotechnical monitoring under construction. Moscow, Standartinform, 2017. – <https://www.minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/a03/SP-497.pdf>
- SP [Set of rules] 22.13330.2016. Soil bases of buildings and structures. Moscow, Minstroj, 2016, 225 p. – <https://docs.cntd.ru/document/456054206>
- SP [Set of rules] 25.13330.2020. Soil bases and foundations on permafrost soils. Moscow, Minstroj, 2020. – <http://sniprf.ru/sp25-13330-2020>
- SP [Set of rules] 497.1325800.2020. Soil bases and foundations of buildings and structures on permafrost soils. Moscow, Minstroj, 2020, 30 p. – <http://sniprf.ru/sp25-13330-2020>
- STO [Organization Standard] Gazprom 2-3.1-072-2006. Regulations for geotechnical monitoring of gas complex facilities in cryolithic zone. Moscow, TyumenNIIgiprogas, 2006, 61 p. – <https://samara-tr.gazprom.ru/d/textpage/8e/142/sto-gazprom-2-3.5-046-2006.pdf>
- TASS. Pervuyu stanciyu seti gosmonitoringa vechnoj merzloty v Rossii sozdadut na ostrove Hejsa [TASS. The first station of the permafrost state monitoring network in Russia will be created on Hayes Island]. – URL: <https://tass.ru/obschestvo/11802477> (last visited: 29.05.2022).
- Tikhonov S. Will Russia be able to increase LNG production. *Rossiyskaya gazeta: ekonomika* [Rossiyskaya gazeta: Economics, 08.01.2020]. – <https://rg.ru/2020/01/08/smozhet-li-rossiya-narastit-proizvodstvo-spg.html>
- Kamnev Y.K., Filimonov M.Y., Shein A.N., Vaganova N.A. Automated Monitoring The Temperature Under Buildings With Pile Foundations in Salekhard (Preliminary Results). *Geography, Environment, Sustainability*, 2021, vol. 14, No. 4, p. 75–82. – <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2021-021>
- Malkova G., Drozdov D., Vasiliev A. et al. Spatial and temporal variability of permafrost in the western part of the Russian Arctic. *Energies*, 2022, vol. 15, No. 7, p. 2311. – <https://doi.org/10.3390/en15072311>
- Rivkin F.M., Kuznetsova I.L., Ivanova N.V. et al. Multi-purpose engineering geological cartographic for information support for engineering surveys, designing, and monitoring. In: Proc. of the 11th Congress of the IAEG (Auckland New Zealand, 5–10 Sept., 2010). Auckland, CRC Press, 2010, p. 2415–2419.
- Smith S.L., Romanovsky V.E., Isaksen K. et al. Permafrost. In *State of the Climate in 2020*. Bull. Amer. Meteor. Soc., 2021, No. 102 (8), p. S293–S297. – <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0086.1>
- Zhdaneev O., Frolov K., Petrakov Y. Predictive systems for the well drilling operations. *Cyber-Physical Systems: Design and Application for Industry 4.0*. N.Y., Springer, 2021, vol. 342, p. 347–368. – [https://doi.org/10.1007/978-3-030-66081-9\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-030-66081-9_28)

*Поступила в редакцию 11 апреля 2022 г.,  
после доработки – 7 июля 2022 г.,  
принята к публикации 19 июля 2022 г.*