

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 504.05:631.618

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2016-4(16-27)

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ НЕФТЕГАЗОВОГО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ  
В РОССИЙСКОЙ АРКТИКЕ

Д.С. Дроздов<sup>1-4</sup>, В.А. Дубровин<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия; [ds\\_drozdov@mail.ru](mailto:ds_drozdov@mail.ru)

<sup>2</sup>Российский государственный геолого-разведочный университет имени С. Орджоникидзе,  
117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, Россия

<sup>3</sup>Тюменский индустриальный университет, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия

<sup>4</sup>Тюменский государственный университет, 625003, Тюмень, ул. Ленина, 25, Россия

<sup>5</sup>ВНИИ гидрогеологии и инженерной геологии,  
142452, Московская обл., Ногинский р-н, пос. Зеленый, Россия; [dva946@yandex.ru](mailto:dva946@yandex.ru)

Многoletнемерзлые горные породы определяют суть проблем природопользования и экологии в Арктике и Субарктике. Техногенное вмешательство может инициировать новые проявления или многократно усилить имеющиеся геокриологические процессы, делая их разрушительными и даже катастрофическими. Активное продвижение нефтегазовой добычи на север и далее на шельф требует разработки системы обеспечения геоэкологической безопасности осваиваемых районов криолитозоны. Сеть государственных геокриологических полигонов, стационаров, а также площадок периодического посещения, где с различной степенью детальности отслеживаются природная динамика геосистем и их взаимодействие с инженерной деятельностью, позволит оптимизировать принятие управляющих решений, повышая ответственность недропользователей и государственных органов.

*Природные и техногенные изменения, процессы, экологическая безопасность, государственные геокриологические полигоны, Арктика*

ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF OIL AND GAS EXPLORATION AND DEVELOPMENT  
IN THE RUSSIAN ARCTIC

D.S. Drozdov<sup>1-4</sup>, V.A. Dubrovin<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Earth Cryosphere Institute, SB RAS, 625000, Tyumen, P/O box 1230, Russia; [ds\\_drozdov@mail.ru](mailto:ds_drozdov@mail.ru)

<sup>2</sup>Orjonikidze Russian State Geological Prospecting University, 117997, Moscow, Miklukho-Maklay str., 23, Russia

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

<sup>4</sup>Tyumen State University, 625003, Tyumen, Lenina str., 25, Russia

<sup>5</sup>All-Russia Scientific and Research Institute of Hydrogeology and Engineering Geology,  
142452, Moscow obl., Noginsk reg., Zelyony vil., Russia; [dva946@yandex.ru](mailto:dva946@yandex.ru)

Permanent frozen ground poses a core environmental issue for exploitation of natural resources in the Arctic and sub-Arctic. Different technogenic impacts are capable of triggering new manifestations of geocryological processes or essentially enhancing them up to hazardous or even catastrophic ones. The active advancement of oil and gas industry into the northern territories and further to the continental shelf requires the development of a system of ensuring the geo-ecological security of the permafrost regions. A specialized state geocryological observational network comprising polygons, stationaries and sites for periodic observations will provide monitoring of natural dynamics of the geosystems at various level of detail, as well as their interaction with engineering activities. This observational network will ultimately allow to optimize the process of executive decision-making, strengthening thereby responsibility of subsoil users and related state agencies.

*Natural and technogenic changes, permafrost zone, geocryological processes, environmental safety, state geocryological polygons, Arctic*

ВВЕДЕНИЕ

Арктика дает девятую часть национального продукта и обеспечивает почти четверть общего объема экспорта России. Здесь производится бо-

лее 90 % никеля, кобальта и платиновых металлов, добывается около 80 % газа и 60 % нефти [Павленко, 2013]. Это делает Арктику ключевым экономи-

ческим регионом Российской Федерации, хотя плотность населения и общее число трудоспособных граждан здесь крайне невелико. Территориально Российская Арктика и Субарктика приблизительно совмещаются с зоной вечной мерзлоты (или криолитозоной), несколько выходя за ее пределы на Европейском Севере. Специфика криолитозоны – наличие многолетнемерзлых горных пород (ММП) – определяет сущность проблем природопользования и экологии в Арктике.

Криолитозона, занимая примерно две трети территории России, характеризуется суровым климатом, недостатком современных транспортных коммуникаций, низкой плотностью населения, сильной зависимостью экологической обстановки от природных катаклизмов и техногенеза, наличием большого числа обширных заповедных и особо охраняемых территорий. При этом многолетняя мерзлота играет исключительную роль в формировании экологической обстановки Севера. Комплекс природных экзогенных процессов, усиленных глобальными флуктуациями климата, ведет к активной трансформации арктических и субарктических ландшафтов и преобразованиям на акватории. Суммарное геоэкологическое воздействие этих процессов в целом не благоприятно: деформируется поверхность [Khomutov, Leibman, 2014], разрушаются экосистемы [Москаленко, 2012], перерабатываются морские берега (рис. 1), и их отступление может достигать десятков метров в год [Васильев и др., 2001; Крицук и др., 2014; Lantuit et al., 2012].

Задачи освоения и хозяйствования делают проблему комплексного изучения и прогнозирования состояния криолитозоны одной из приоритетных, поскольку многие проблемы недропользования в криолитозоне определяются недостатками инженерно-геокриологической и гидрогеологической изученности [Павлов, Дубровин, 2000; Брюховецкий и др., 2014]. Неучет экологического ущерба и рисков (текущих и возможных) от глобальных изменений климата и техногенеза преумножает эти проблемы. Фактически темпы экономического освоения криолитозоны намного опережают геокриологические и геоэкологические исследования по обоснованию безопасного и рационального недропользования, а соответствующая стратегия регионального изучения и мониторинга криолитозоны до сих пор не разработана [Дубровин, Крицук, 2014]. В результате просчеты проектирования оказываются видны даже неспециалисту (рис. 2).

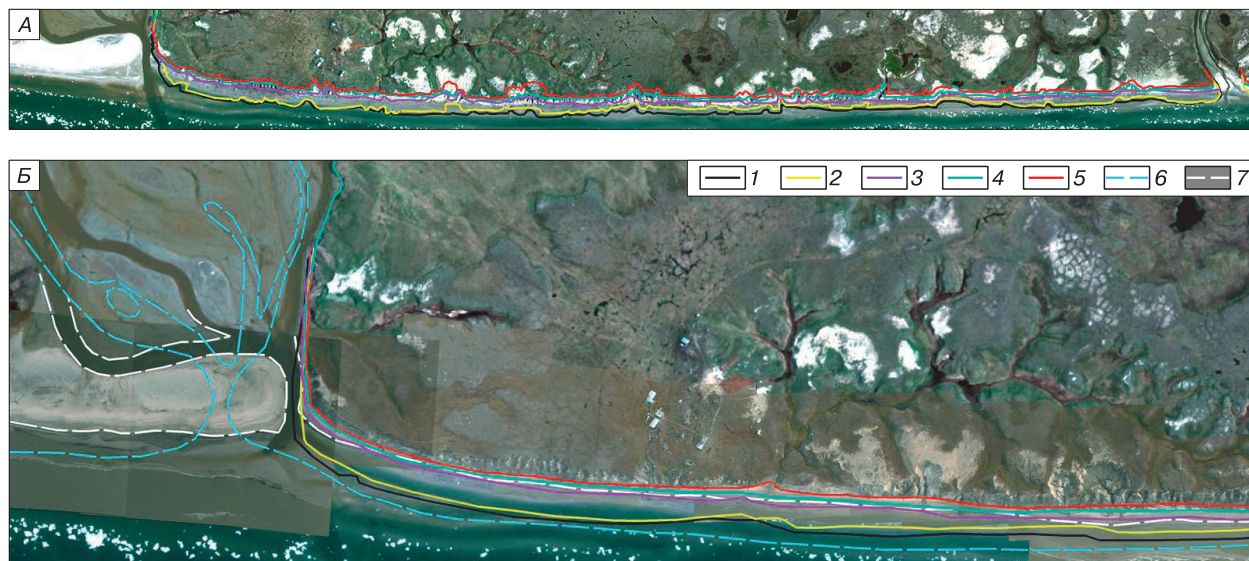
Несмотря на то что изменения, произошедшие за 40 лет освоения нефти и газа в Западной Сибири, не имеют аналогов в мировой практике, до сих пор не проведена комплексная геоэкологическая оценка произошедших в связи с этим природно-техногенных изменений, соответственно,

нет обоснованных прогнозов изменения криолитозоны на средне- и долгосрочную перспективу. В том числе отсутствуют прогнозы развития экзогенных и эндогенных геологических процессов, спровоцированных изъятием и закачкой гигантских объемов флюидов из недр. Вместе с тем этот фактор важен и с геоэкологической, и с технологической точек зрения: например, в Среднем Приобье за счет горизонтального сдвига массивов горных пород слому и смятию подверглось более 3.5 тыс. колонн нефтяных скважин. Применение систем искусственного поддержания пластового давления, в том числе с использованием химических реагентов, воздействует на водные системы криолитозоны, что вызывает попадание нефти и рассолов в водоносные горизонты и на поверхность земли. Технологическая закачка в пласты перегретых воды и пара приводит к изменению геотермических и геохимических полей [Дубровин, Крицук, 2014].

#### КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК БАЗА ДЛЯ МОНИТОРИНГА КРИОЛИТОЗОНЫ

Важнейшим признаком направленности развития экологической обстановки в северных регионах страны являются состояние и динамика природных и техногенных геосистем криолитозоны. Они определяются взаимодействием геологической среды с внешними по отношению к ней сферами Земли – атмосферой, гидросферой, биосферой, а также с техническими системами. Оценить пространственно-временные параметры этих взаимодействий можно с помощью системы картографических и информационных моделей, которые реализуются в виде электронных карт с соответствующими базами данных, в частности, карт районирования. Пространственная картографическая модель служит задачам представления и экстраполяции информации, а их достоверность зависит от обеспеченности фактическим материалом. Статистические критерии позволяют количественно оценить правомочность переноса данных с заданной достоверной вероятностью. Картографическая модель, включенная в систему мониторинга природной среды, предназначена для того, чтобы для любой точки территории с заданной точностью и надежностью давать информацию о фоновых и текущих природных и техногенных условиях, а также чтобы быть основой для прогноза изменений геокриологических параметров геосистем, а именно, для получения текущих и прогнозных геокриологических и геоэкологических параметров [Дроздов, 2004].

Хозяйствование в северных широтах предопределяет необходимость решения ряда задач геоэкологического характера, в целом оценивающих опасность и степень риска природопользования в



**Рис. 1. Динамика берега Карского моря в районе стационара Марре-Сале на междуречье Марреяха–Яварьяха за 44 года (1969–2013):**

А – бровка берега протяженностью 4,5 км; Б – подножие склона протяженностью 2 км (1 – 1969 г.; 2 – 1978 г.; 3 – 1999 г.; 4 – 2009 г.; 5 – 2013 г.); 6, 7 – береговая линия в 1969 и 2013 г. соответственно.



**Рис. 2. Формирование протяженного техногенного термокарстового озера в результате подтопления территории обваловкой подземного трубопровода (а).**

б – стойка измерительного блока системы технологического контроля газопровода (кабели обнажены из-за оседания обваловки). Фото службы ведомственного мониторинга.

арктических регионах. Прежде всего это касается оценки совместного влияния на геологическую среду и криолитозону двух мощнейших факторов: флуктуаций климата и техногенеза. Основной путь решения этих задач лежит через **создание системы мониторинга криолитозоны**, включа-

ющей как фоновые наблюдения, так и наблюдения на объектах техногенеза [Дубровин, 2003]. Конечной целью этих исследований является своевременное получение достоверной информации о происходящих изменениях на основе постоянно действующей геоэкологической модели региона –

концептуальной и картографической. Эта система должна интегрировать и обобщать информационные потоки мониторинговых наблюдений применительно к геологическим и геотехническим объектам.

Встает вопрос о пространственном охвате таких моделей, с одной стороны, и о детальности представляемой и актуализируемой при мониторинге информации – с другой. Очевидно, что достаточно точный, экономически оправданный для проектирования результат может быть получен только для ограниченной площади. Оценочные данные для территориального планирования можно собрать для площади территориально-производственного комплекса. Для перспективных оценок в масштабах страны или региона важны общие закономерности пространственно-временного распределения характеристик окружающей среды. Соответственно, следует говорить об иерархии картографических моделей, объектов и систем мониторинга природных сред вообще и криолитозоны в частности.

Это, в свою очередь, соответствует целям, задачам и возможностям разномасштабного картографирования осваиваемой территории криолитозоны и требует совершенствования принципов геоэкологической типизации и районирования [Дубровин, 2011]. При этом можно говорить о двух типах информационных потоков между разноуровневыми моделями: “снизу вверх” – более частная информация обобщается и пополняет картографическую модель высокого уровня; “сверху вниз” – на низкий уровень передаются сведения о принадлежности объектов к крупным геологическим, ландшафтным, прочим классификационным подразделениям, гидрометеорологические данные и т. д.

Таким образом, обеспечение экологической безопасности освоения и разработки недр криолитозоны Арктики требует пересмотра или решения ряда новых крупных научно-методических и организационно-технических задач, касающихся принципов комплексирования и взаимоувязки региональных (площадных) и стационарных (мониторинговых) методов исследования: размещения и структуры наблюдательных сетей; унификации наблюдений на основе применения современных автоматизированных и дистанционных технологий сбора данных; многофакторного моделирования процессов для определения степени риска освоения территории; разработки правовых основ для оценки геоэкологического ущерба для осваиваемых территорий и акваторий.

Отсутствие полноценных геоэкологических и гидрогеологических исследований и опережающих полупромышленных экспериментов в период предпроектной подготовки предопределяет низ-

кую эффективность самих проектных решений. Например, в основополагающем документе “Программа комплексного освоения месторождений углеводородного сырья Ямало-Ненецкого автономного округа и Севера Красноярского края” [О программе..., 2010] и в аналогичных руководящих документах полностью отсутствуют разделы гидрогеологического изучения территории [Дубровин, Крицук, 2014], что уже ведет к массе геоэкологических и экономических издержек.

В современных условиях, когда получение новой полевой съемочной геоэкологической информации происходит в очень ограниченном количестве, возрастает актуальность максимального использования всех ранее накопленных данных, что может быть обеспечено ведением баз геоэкологических данных и использованием ГИС-технологий [Дроздов и др., 2007].

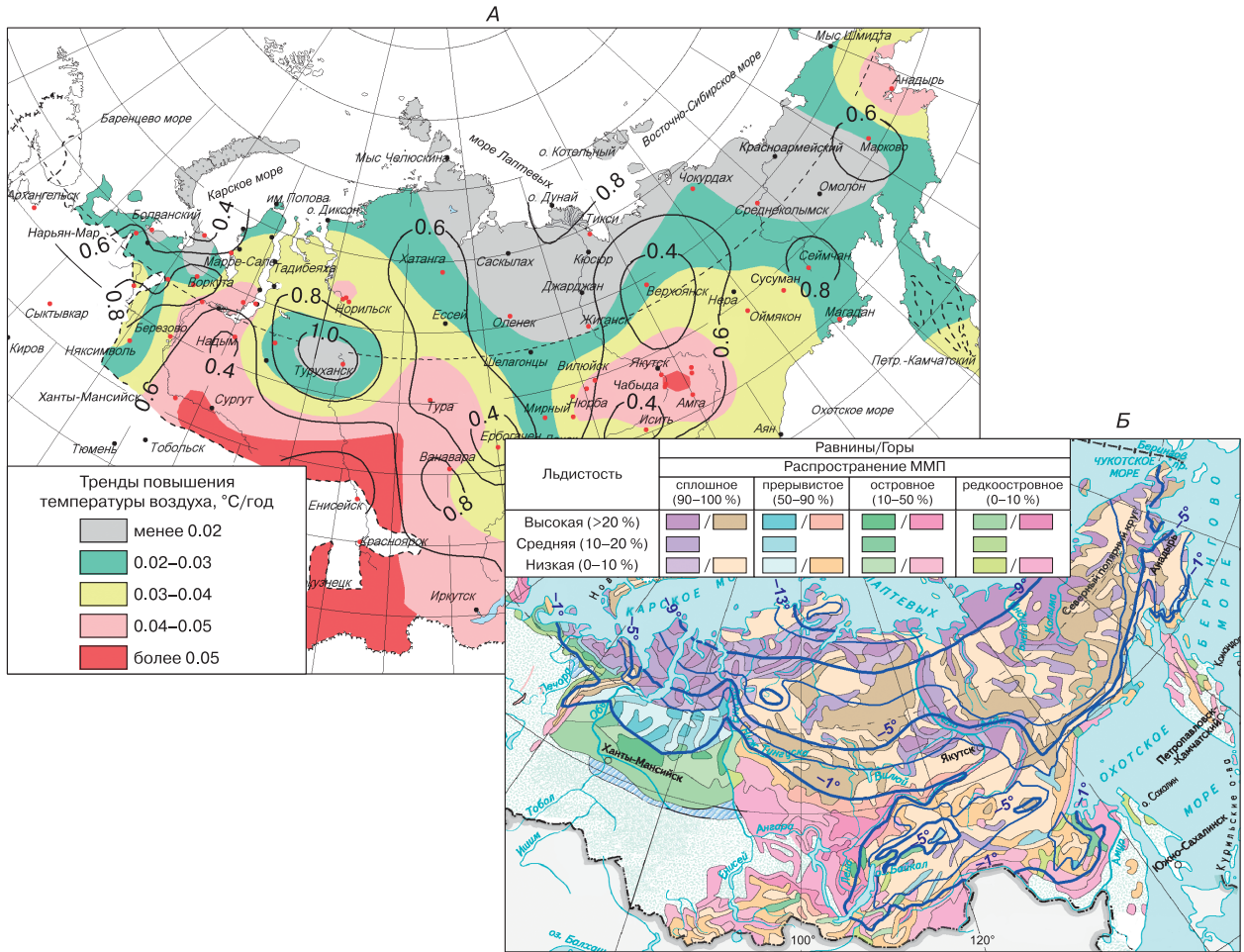
Ориентируясь на пространственный охват, можно говорить о базах геоэкологических данных, соответствующих ГИС, и картографических моделях глобального, регионального, локального и элементарного (пообъектного) уровней.

**Глобальные ГИС** – обзорные – соответствуют полушариям Земли, материкам или их крупным частям. Пример – тематические циркумполярные карты и карты СССР и России. Информационная составляющая содержится в легендах, экспликациях и сводных таблицах к этим картам (см. “Геоэкологическая карта СССР” [1991]).

**Региональные ГИС** ведутся для крупных природных регионов и единиц административного деления. Их основу составляют компьютерные карты районирования с сопутствующими базами данных, содержащими обобщенную ландшафтно-геологическую, геоэкологическую и геоэкологическую информацию, например, Атлас Тюменской области [1971], ГИС “Геоэкология Якутии” [Железняк, 2011], база данных по природоохранному районуам п-ова Ямал [Коростелев, Александров, 1997].

Следует отметить, что климатическими и метеоданными геоэкология обеспечена в удовлетворительном для построения функциональных и корреляционных зависимостей объеме только на глобальном и, частично, на региональном уровнях. Однако и такая детальность показывает, что связи климатических, метеорологических и геоэкологических параметров весьма неодинаковы в различных секторах Российской Арктики и областях криолитозоны (рис. 3). Тренды изменения температур воздуха и ММП по-разному соотносятся в разных регионах. Поэтому очевидно, что механическое перенесение опыта освоения из одного региона на другой – не допустимо.

**Локальные базы данных и ГИС** содержат первичную информацию для районов крупных хо-



**Рис. 3. Климатические тренды и изменения криолитозоны.**

А – чувствительность криолитозоны к климатическим изменениям [Малкова и др., 2011; Второй... доклад..., 2014]; изолинии – тренд отношения температуры грунтов к температуре воздуха; Б – схематическая карта криолитозоны РФ по состоянию на 2000 г., по Е.С. Мельникову, К.А. Кондратьевой и Г.Ф. Гравису [Melnikov, Drozdov, 2006]; изолинии – температура горных пород на глубине нулевых сезонных амплитуд.

зайственных объектов. Например, для территорий газовых месторождений, промышленных районов и прочее это описания точек наблюдения (скважин, измерительных постов и т. д.). Первичная картографическая информация представляется цифровыми картами фактического материала, картами геосистем и производными картами геологического, геоэкологического и иного содержания. Примером может служить ГИС Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения на Центральном Ямале, включающая комплект природоохранных карт, которая с 1999 г. используется при реализации 11 проектов освоения (рис. 4) [Дроздов и др., 2001; Дроздов, 2004].

**Элементарные (пообъектные) базы данных** содержат первичную информацию об изысканиях, режимных и стационарных наблюдениях, контрольных работах.

### ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОЛИГОНЫ И СТАЦИОНАРЫ

Рассмотренная иерархия представлена лишь в виде отдельных реализаций, и говорить о полном охвате ею криолитозоны или Арктики не приходится. Заснятость криолитозоны государственной инженерно-геологической (инженерно-геокриологической) съемкой составляет единицы процентов. Даже наиболее значимый для топливно-сырьевой базы России регион севера Западной Сибири охвачен лишь тематическими работами соответствующего масштаба. Но самое главное – нет общего решения по мониторингу природных и техногенных изменений в Арктике и криолитозоне в целом. В частности, не решен вопрос районирования, обеспечившего бы репрезентативность результатов мониторинга. Это вопросы, требую-

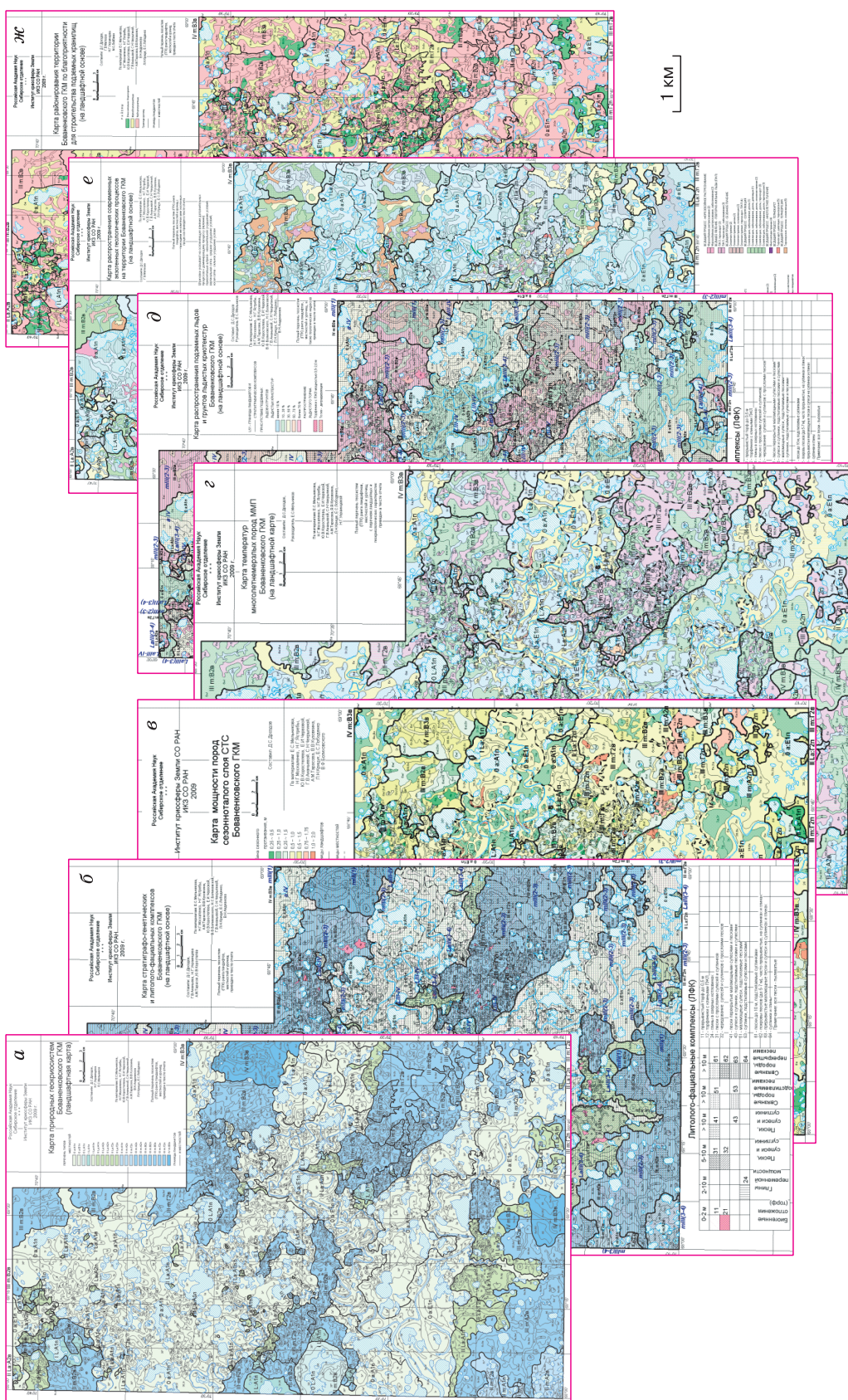
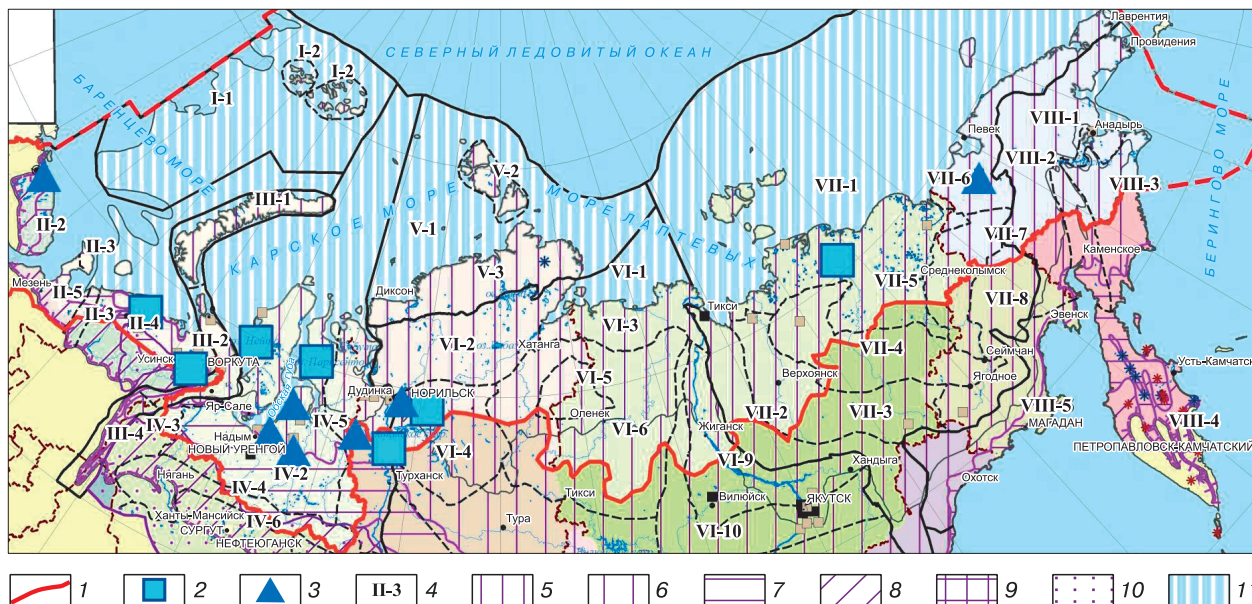


Рис. 4. Пример комплекта карт ГИС территории Бованенковского месторождения, Ямал [Дроздов и др., 2001]:

а – ландшафты; б – геологическое строение; в – сезонное протаивание; г – температура горных пород; д – содержание льда; е – экзогенные геологические процессы; ж – геоэкологическая благоприятность для строительства.



**Рис. 5. Районирование Арктической зоны (1) и северной части криолитозоны России с выделением геолого-структурных регионов и вынесением предполагаемых государственных геоэкологических (геоэкологических) полигонов (2) и стационаров фоновый мониторинга (3) [Дубровин, 2011].**

Административные единицы выделены цветом. 4 – номера регионов I и II порядков. Распространение и температура многолетнемерзлых пород: 5 – сплошное ( $t < -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); 6 – сплошное ( $t = -1...-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); 7 – прерывистое; 8 – островное; 9 – сплошное и прерывистое в горах; 10 – реликтовая мерзлота; 11 – субаквальная мерзлота.

щие как ландшафтно-геологического, так и организационного обоснования.

Организационной формой решения задачи районирования и мониторинга природных и техногенных изменений могла бы стать **специальная государственная программа “Криолитозона России”**, которую можно будет реализовать как структурную часть Федеральной целевой программы (ФЦП) по реализации “Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года” [Стратегия..., 2015]. Программа “Криолитозона России” должна определять концептуальный подход и стратегию комплексного регионального и мониторингового геоэкологического (гидрогеологического, инженерно-геологического, геоэкологического) изучения криолитозоны для территорий ближайшей и среднесрочной перспективы освоения месторождений полезных ископаемых. Программа также должна включать необходимые объемы и этапы проведения опережающих региональных и мониторинговых работ во вновь осваиваемых и недостаточно изученных регионах криолитозоны, включая шельф арктических морей.

В основу разрабатываемой во ВСЕГИНГЕО новой концепции мониторинга криолитозоны [Павлов, Дубровин, 2000; Дубровин, 2003, 2011; Крицук и др., 2014] положены приоритеты про-

ведения полного комплекса опережающих региональных и мониторинговых работ в рамках создания системы **государственных геоэкологических (геоэкологических) полигонов**, представляющих крупные территории перспективного освоения (рис. 5). Концепция составляется так, чтобы полностью вписываться в функционирующей с 2001 г. Государственный мониторинг состояния недр (ГМСН) в качестве геоэкологического блока. ГМСН включает подотделы фоновый и объектного мониторингов. Фоновый мониторинг осуществляют организации Минприроды России, объектный – недропользователи в рамках лицензионных соглашений [Дубровин, 2011].

Целью создания полигонов является научное и информационное обеспечение органов управления различных уровней и субъектов недропользования сведениями о состоянии и прогнозах изменения окружающей среды в арктических и субарктических регионах криолитозоны под воздействием природных и техногенных факторов и создание системы геоэкологической безопасности осваиваемых регионов Арктики.

**Государственный геоэкологический (геоэкологический) полигон** (как наиболее крупная единица наблюдения в рамках ГМСН) территориально вписывается в ландшафтные провинции или подпровинции. Это части территорий основных региональных структур I–II порядка (гидро-

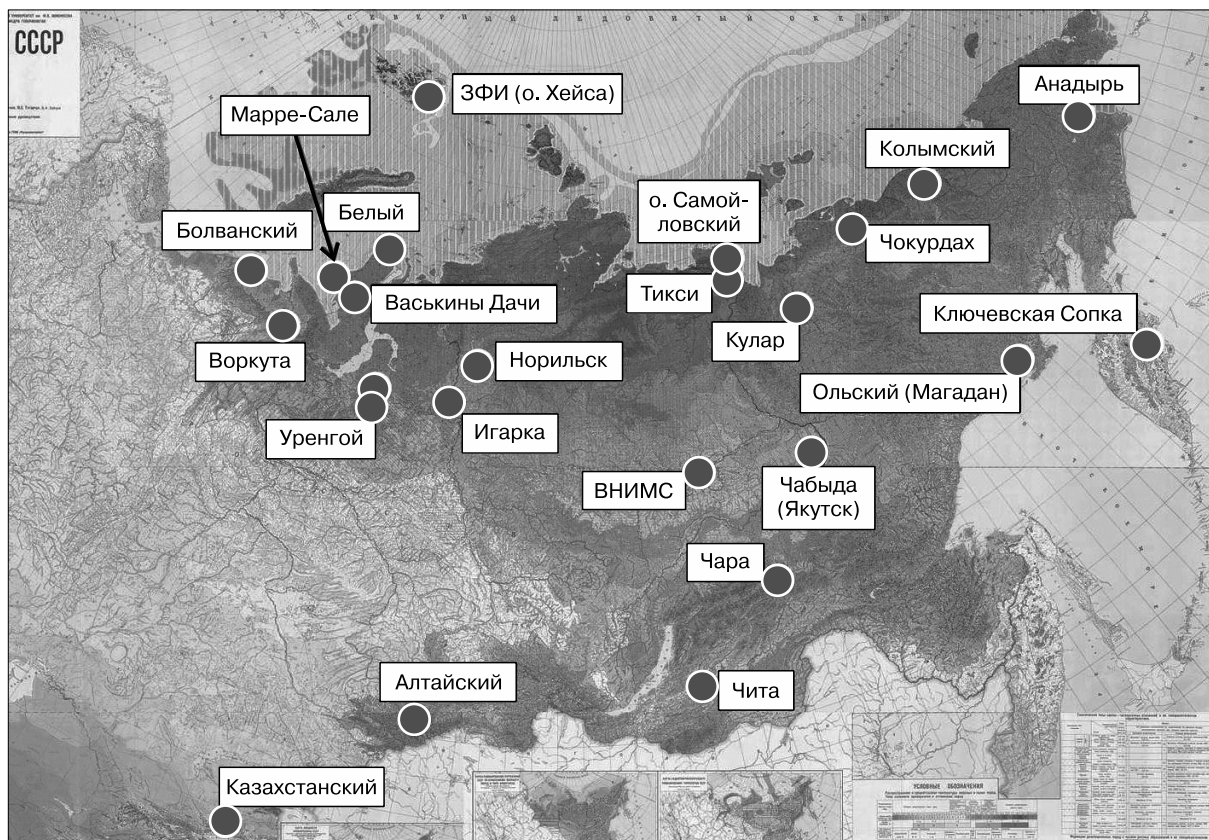


Рис. 6. Действующие геокриологические стационары и площадки периодического обследования (в качестве подложки – [Геокриологическая карта..., 1991]).

геологического бассейна или его части, геокриологической подзоны или ее части; горно-складчатой области и т. п.), расположенные в одной природно-климатической подзоне (реже – в двух подзонах) и характеризующиеся единством геологического строения, сходством геокриологических условий и общим режимом криогенных процессов. Всего в Арктике и Субарктике таких территорий (ландшафтных подпровинций) выделяется порядка 40, активно осваиваются 8–12, ближайшие перспективы освоения есть еще примерно у 10.

В пределах полигона ГМСН осуществляется комплекс специализированных мониторинговых наблюдений за основными составляющими природной обстановки в ненарушенных условиях и в условиях техногенеза для выявления качественных тенденций и количественных изменений региональных параметров геологической среды: гидрогеологических, гидрогеодинамических, инженерно-геологических и геокриологических. Площадь полигонов составляет десятки тысяч квадратных километров (1–2 листа карты масштаба 1:500 000).

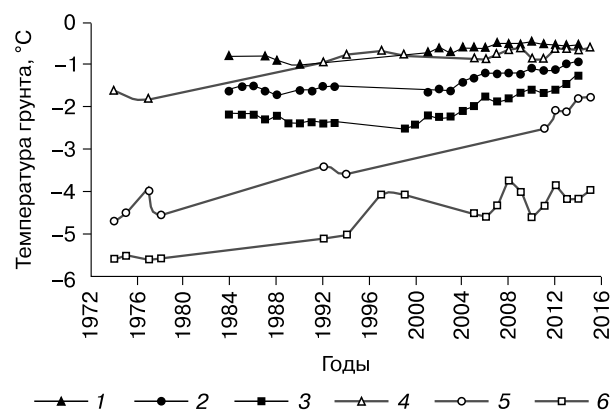
Полигоны ГМСН должны представлять собой высшую форму в иерархии мониторинговой сети и, по сути, стать объектами обобщения данных о режиме геокриологических и гидрогеологических условий на **региональном уровне**. Источник информации – данные, полученные на расположенных в пределах полигона **стационарах фоновом мониторинга** и на других объектах наблюдений. Будучи приурочены к крупным объектам освоения или хозяйствования они закладываются так, чтобы быть для них репрезентативными и отвечать задачам **локального уровня** генерализации информации. При наличии ландшафтно-геологических критериев экстраполяции материалов опробования они эту функцию выполняют. Сама же площадь стационаров невелика и обеспечивает **элементарный уровень** генерализации данных. Однако в настоящее время из действовавших в 1980-е гг. около 25 геокриологических стационаров и 45 режимных площадок периодического обследования, принадлежащих различным ведомствам, продолжают работу только 15 (рис. 6), что абсолютно недостаточно.

## МОНИТОРИНГ ЕСТЕСТВЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ

Мониторинг естественных изменений концентрируется преимущественно на стационарах и площадках периодического обследования, а его результаты экстраполируются и интерполируются в пределах полигонов на ландшафтной (геосистемной) основе и на базе дистанционных методов.

Несмотря на малое число, стационары и площадки позволяют сравнить особенности широтной и секторальной изменчивости геоэкологических условий, а также оценить закономерности их временной изменчивости за последние десятилетия. Так, стационары Болванский (Европейский Север) и Уренгой (север Западной Сибири), располагаясь в южной тундре, имеют сходные геологические, геоморфологические и ландшафтные условия. Из климатических факторов, влияющих на формирование температурного режима горных пород, на обоих стационарах сходны среднелетние температуры воздуха и условия снегонакопления. Поэтому глубина сезонного протаивания, контролируемая прежде всего среднелетними температурами воздуха, оказывается сходной для обоих регионов. В последние 10–12 лет в южной тундре глубина сезонного протаивания увеличивалась на дренированных участках. Если же рассматривать более длительный период (~40 лет), тенденция увеличения глубины сезонного протаивания подтверждается слабо.

В то же время среднегодовая температура воздуха на севере Западной Сибири за счет более суровых зимних условий оказывается ниже почти на 4 °С, чем на Европейском Севере. Соответственно, значительно ниже температуры мерзлых грунтов



**Рис. 7.** Повышение температуры ММП в разных ландшафтных условиях равнинной южной тундры на Европейском Севере (1–3) [Малкова и др., 2015] и в Западной Сибири (4–6) [Drozdov et al., 2015]:

1, 4 – аazonальные аномально теплые условия; 2, 5 – типичная тундра на пологом склоне; 3, 6 – дренированная тундра на вершине холма.

[Дроздов и др., 2012]. Низкие среднегодовые и среднелетние температуры воздуха в Западной Сибири определяют достаточно суровые геоэкологические условия в тундровых ландшафтах с температурами ММП  $-4...-5$  °С (рис. 7), тогда как на Европейском Севере они попадают в интервал  $-1...-2$  °С. Отличия хорошо заметны на фоне общего повышения температуры многолетнемерзлых пород за последние 40 лет. Исключением являются аazonально-теплые ландшафтные условия, контролируемые мощным снегонакоплением (см. рис. 7).

Интересно, что для указанных регионов различаются градиенты климатических и геоэкологических трендов. Так, в последние 30 лет тренд климатического потепления составляет  $0.06...0.07$  °С/год. При этом на Европейском Севере тренды температуры горных пород в естественных ландшафтных условиях в 2–7 раз меньше трендов температуры воздуха, а в Западной Сибири – лишь в 1.5–2.5 раза. Кроме того, в Западной Сибири к концу 1990-х гг. приурочен некий тепловой максимум, характеризующийся появлением и последующим исчезновением древесной растительности на южно-тундровых ландшафтах.

Закономерно и прогнозируемо в реакции криолитозоны на потепление климата то, что наибольшие темпы повышения среднегодовой температуры ММП характерны для низкотемпературных ландшафтов, а наименьшие – для высокотемпературных. Последние также отличаются опусканием кровли мерзлоты и образованием надмерзлотных таликов [Дроздов и др., 2010, 2012]. Однако реальные темпы и соотношения этих изменений могут быть оценены только по результатам мониторинга, обеспечивающего контроль и верификацию типовых прогнозных теплофизических моделей, а также базирующимся на них геоэкологическим прогнозам.

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОГЕНЕЗА

К природным изменениям, вызывающим повышение температуры горных пород, добавляются разнообразные техногенные нарушения покровов и грунтов и отепляющее воздействие инженерных объектов. Непосредственное взаимодействие сооружений с грунтами отслеживается технологическим мониторингом, но он охватывает ограниченный объем геологической среды. Для обобщенной характеристики техногенеза инструментальные наблюдения дополняются описаниями многообразия протекающих процессов и масштабов соответствующих изменений.

Например, в пределах Уренгойского месторождения (Западная Сибирь) в непосредственной близости от сооружений температура пород повышается на  $1...2$  °С и более относительно фона, достигая положительных значений на лесных участ-

ках и приближаясь к 0...–2 °С в тундрах и торфяниках. Заметное повышение температуры пород отмечается в карьерах, у обваловок газопровода, в приграничных частях отсыпок на кустах газодобывающих скважин, т. е. там, где существуют благоприятные условия для снегонакопления. Мало отличаются от фоновых температуры ММП в пределах отсыпок дорог и площадок на кустах эксплуатационных скважин. На насыпях, проложенных через болота и ровные тундровые участки, температура практически равна фоновой.

На инженерных объектах и вблизи них отмечено существенное увеличение глубины сезонного протаивания, а также возникновение техногенных чаш протаивания. Так, в пределах карьеров, вдоль дорог, зимников и трубопроводов, на насыпях протаивание достигает 3–4 м, а под зданиями газовых промыслов в южной лесотундре сформировались чаши протаивания мощностью до 8–9 м [Дроздов, Чекрыгина, 1998].

Повторными наблюдениями установлено, что в результате хозяйственной деятельности на территории Уренгойского месторождения произошла активизация ряда инженерно-геологических процессов: дефляции, эрозии и термоэрозии, термокарста, заболачивания и подтопления. Основные причины активизации – нарушение естественных покровов, изменение рельефа, нарушение стока поверхностных и грунтовых вод.

Наибольшее развитие на территории Уренгойского месторождения получила техногенная дефляция: большинство современных песчаных раздувов приурочено к карьерам, дорогам и кустам скважин. Их размеры 0.1–6 км.

Следующими по интенсивности оказываются техногенное заболачивание и подтопление. Дорожные насыпи и обваловки трубопроводов перехватывают поверхностный и грунтовый сток даже в незначительных, морфологически практически не выраженных понижениях, приводя к образованию болот и узких вытянутых озер. В свою очередь, все земляные сооружения подвергаются сильной эрозии и требуют регулярных восстановительных работ. Нарушение условий теплообмена при снятии почвенно-растительного покрова активизирует термокарст. Очагами активизации являются вездеходные колеи, зимники, фундаменты опор ЛЭП, траншеи и т. д.

Резкая интенсификация эрозии связана с прокладкой дорог, зимников, трубопроводов, а также с отработкой карьеров. Проявляется она преимущественно в возникновении и быстром росте молодых оврагов в приобводочных частях террас и в боргах долин малых рек за счет сосредоточения поверхностного стока. Если поверхностный сток концентрируется в пределах полигональных торфяников, то эрозионный процесс дополняется термоэрозией по полигонально-жильным льдам.

В этом случае процесс активизируется даже при малых уклонах поверхности, в том числе вдали от базиса эрозии [Дроздов, Чекрыгина, 1998].

В условиях высокольдистых отложений Ямала техногенная активизация термокарста и термоэрозии приобретает катастрофический характер.

Технологический мониторинг, выполняемый эксплуатирующими организациями, формирует колоссальный объем информации о процессах, деформациях поверхности и сооружений, об изменении температуры, состояния и свойств грунтовых оснований. На базе этих данных принимаются текущие инженерные решения на низшем, элементарном уровне. Однако эта информация мало используется для общего анализа ситуации, инвентаризации ошибок и просчетов, выработки новых научно-технических решений. Кроме того, технологический мониторинг касается почти исключительно инженерных объектов и не охватывает техногенные изменения, происходящие на некотором удалении от хозяйственных объектов. Поэтому данные технологического мониторинга следует рассматривать как мощный ресурс для информационного обеспечения работы государственных геокриологических полигонов в части техногенеза, что требует создания прямых каналов обмена данными между хозяйствующими субъектами (в том числе недропользователями) и системой Государственного мониторинга состояния недр.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на дефицит финансирования мониторинговых исследований в криолитозоне, данные наблюдений, полученные на геокриологических стационарах (даже не всегда регулярные) и на площадках периодического обследования, дают очень важную информацию для оценки деградационных изменений мерзлоты в связи с климатическими флуктуациями и техногенезом. Работы в этом направлении необходимо продолжить. Создание системы мониторинга криолитозоны позволит на научной основе унифицировать подходы к хозяйствованию в криолитозоне, усовершенствовать методы получения, обработки, обобщения и интерпретации информации на основе принятия некоторой единой концепции, привязанной к системе картографических моделей от глобального и регионального до локального и элементарного (пообъектного) уровня.

Основой наблюдений за криолитозонной частью ГМСН является система мониторинга криолитозоны, базирующаяся на сети государственных геокриологических полигонов, каждый из которых представлен сетью стационаров и площадок периодического обследования.

Для регионального уровня геокриологических исследований предполагается ограничивать дорогостоящие в криолитозоне работы картогра-

фированием соответствующего полигона (полигонов) в масштабе 1:500 000 на основе уже имеющихся фондовых материалов с корректировкой по данным дешифрирования аэро- и космфотоматериалов разных лет и по данным режимных наблюдений на геокриологических стационарах.

Следующий масштаб геокриологического изучения и картографирования на территории государственных геокриологических (геоэкологических) полигонов соответствует локальному уровню генерализации информации. Он должен отвечать съемке масштаба 1:100 000. Изучение выполняется методом ключевых участков, а некоторая часть геокриологических скважин при проведении съемок должна быть оборудована для мониторинговых наблюдений.

Территории стационаров следует рассматривать как объекты мониторинга элементарного уровня. Они должны быть ориентированы на срок работы не менее 25–35 лет, чтобы установить тренд и, по возможности, периодическую составляющую изменчивости геокриологических и гидрогеологических условий. Изучаемыми объектами геокриологического стационара являются буровые скважины и наблюдательные (за криогенными процессами) площадки. Крупномасштабные карты геокриологического районирования (1:25 000...1:10 000) могут в числе прочего обосновывать теплофизическую и геоэкологическую модели территории стационара. Методика составления подобных карт разработана во ВСЕГИНГЕО и многократно апробирована для разных регионов криолитозоны [Методическое руководство..., 1978; Ландшафты..., 1983; Крицук, Дубровин, 2003; Крицук и др., 2014].

В качестве базовой автономной измерительной системы для мониторинговых наблюдений целесообразно использовать универсальный автономный измерительный комплекс ЛРС, прошедший многолетние испытания на геокриологических стационарах Ямала и Гыдана и объектах производственно-экологического мониторинга газовой промышленности различных регионов. В настоящее время он широко и эффективно используется в разных районах криолитозоны и за ее пределами [Дубровин, Крицук, 2011].

Таким образом, важным условием рационального освоения криолитозоны следует признать воссоздание на новой основе иерархии картографических моделей [Методическое руководство..., 1978; Дроздов, 2004] и системы мониторинговых наблюдений за основными ее параметрами на специальных стационарах и полигонах на территории Арктики и Субарктики. Всего таких комплексных объектов наблюдения (полигонов) на перспективу до 2020 г. необходимо не более 8–12. Во ВСЕГИНГЕО составлена «Карта геокриологического районирования криолитозоны России для выбора объ-

ектов мониторинга и обоснования наблюдательных сетей» (масштаба 1:8 000 000) [Дубровин и др., 2011].

Разработка и реализация системы геоэкологического обеспечения осваиваемых районов арктической и субарктической криолитозоны, основанная на принципах создания государственных геокриологических полигонов как особо охраняемых территорий, способна коренным образом изменить экологическую ситуацию в Арктике и Субарктике и реально повысить ответственность недропользователей и роль государства и субъектов Федерации в процессе укрепления экологической безопасности на объектах недропользования в сложных условиях криолитозоны. Применение единых технических средств наблюдений и создание объединенного регламента фонового и объектного ГМСН в рамках структуры геокриологических полигонов обеспечит повышение информативности и экономической эффективности мониторинговых данных, упростит контроль за выполнением условий лицензионных соглашений, минимизируя в итоге опасность возникновения кризисных геоэкологических ситуаций и катастроф при разведке и освоении месторождений полезных ископаемых в криолитозоне [Дубровин, Крицук, 2014; Дроздов, Дубровин, 2015].

*Работа выполнена при поддержке грантов Президента РФ (НШ-5582.2012.5), РФФИ-РГО (проект № 13-05-41509 РГО), РФФИ (проекты № 13-05-00811, 13-05-00854, 13-08-91001-АНФ-а, 14-05-00956, 15-55-71004/15, 16-05-00249), РФФИ (грант № 16-17-00102), международных программ TSP, LCLUC, CALM, GTN-P, SWIPA, GCW, администрации ЯНАО, предприятий ГазпромДобыча-Надым, ГазпромДобычаУренгой, Нортгаз.*

## Литература

- Атлас Тюменской области. М.: Тюмень, ГУГК, 1971, 171 с.
- Брюховецкий О.С., Дроздов Д.С., Лаухин С.А., Яшин В.П. О доле недропользования в накопленном экологическом ущербе Арктической зоны Российской Федерации // Изв. вузов. Сер. Геология и разведка, 2014, № 6, с. 59–63.
- Васильев А.А., Покровский С.И., Шур Ю.Л. Динамика берегов Карского моря // Криосфера Земли, 2001, т. V, № 1, с. 44–52.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М., Росгидромет, 2014, 1008 с.
- Геокриологическая карта СССР масштаба 1:2 500 000 / Под ред. Э.Д. Ершова. М., 1991, 16 л.
- Дроздов Д.С. Информационно-картографическое моделирование природно-техногенных сред в геокриологии: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Тюмень, 2004, 49 с.
- Дроздов Д.С., Дубровин В.А. Проблемы недропользования и экологии в Российской Арктике // Науч. вестн. Ямало-Ненецкого авт. округа. Салехард, Науч. центр изучения Арктики, 2015, вып. № 2 (87) с. 32–38.

- Дроздов Д.С., Коростелев Ю.В., Ананьева (Малкова) Г.В.** Эколого-геокриологическое районирование территории Бованенковского месторождения по особенностям природных условий // *Материалы Второй конф. геокриологов России*. М., МГУ, 2001, т. 4, с. 84–91.
- Дроздов Д.С., Коростелев Ю.В., Малкова Г.В., Мельников Е.С., Соромотин А.В., Украинцева Е.А., Чекрыгина С.Н.** Опережающее инженерно-геокриологическое и геоэкологическое картографирование районов перспективных экономических проектов // *Тр. Междунар. конф. “Криогенные ресурсы полярных регионов”* (Салехард, июнь 2007 г.). Пушино, 2007, т. II, с. 264–267.
- Дроздов Д.С., Малкова Г.В., Украинцева Н.Г., Коростелев Ю.В.** Мониторинг геокриологических условий южнотундровых ландшафтов Европейского Севера и Западной Сибири // *Десятая Междунар. конф. по мерзлотоведению (TICOP) “Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире”*. Тюмень, Печатник, 2012, т. 3, с. 159–164.
- Дроздов Д.С., Украинцева Н.Г., Царев А.М., Чекрыгина С.Н.** Изменения температурного поля мерзлых пород и состояния геосистем на территории Уренгойского месторождения за последние 35 лет (1974–2008) // *Криосфера Земли*, 2010, т. XIV, № 1, с. 22–31.
- Дроздов Д.С., Чекрыгина С.Н.** Изменение инженерно-геокриологических условий территории Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения под влиянием техногенеза // *Геоэкологическое картографирование*. М., Геоинформмарк, 1998, ч. III, с. 92–94.
- Дубровин В.А.** Система геоэкологического обеспечения недропользования осваиваемых арктических регионов криолитозоны // *Разведка и охрана недр*, 2003, № 7, с. 15–20.
- Дубровин В.А.** Геокриологические исследования в системе недропользования. Проблемы, задачи, пути решения // *Разведка и охрана недр*, 2011, № 9, с. 36–42.
- Дубровин В.А., Крицук Л.Н.** Оценка динамики температурного режима мерзлых пород района Марре-Сале по данным мониторинговых наблюдений // *Материалы Четвертой конф. геокриологов России*. М., МГУ, 2011, т. 2, с. 236–243.
- Дубровин В.А., Крицук Л.Н.** Проблемы геокриологических исследований в осваиваемых районах Арктики и Субарктики // *Разведка и охрана недр*, 2014, № 8, с. 28–31.
- Дубровин В.А., Крицук Л.Н., Ястреба Н.В.** Карта геокриологического районирования криолитозоны России для выбора объектов мониторинга и обоснования наблюдательных сетей // *Разведка и охрана недр*, 2011, № 9, с. 52–57.
- Железняк М.Н.** Геокриологическая база данных Сибирской платформы // *Материалы Всерос. конф. “Рельеф и экзогенные процессы гор”*. Иркутск, Изд-во ИГ СО РАН, 2011, с. 100–103.
- Коростелев Ю.В., Александров А.А.** Атрибутивная база геокриологических данных по природоохранному району полуострова Ямал // *Материалы конф. “Проблемы криологии Земли: фундаментальные и прикладные исследования”*. Пушино, Пушинский НЦ РАН, 1997, с. 288–289.
- Крицук Л.Н., Дубровин В.А.** Карты геокриологического районирования как основа геоэкологической оценки осваиваемой территории криолитозоны // *Разведка и охрана недр*, 2003, № 7, с. 15–20.
- Крицук Л.Н., Дубровин В.А., Ястреба Н.В.** Результаты комплексного изучения динамики береговой зоны Карского моря в районе метеостанции Марре-Сале с использованием ГИС-технологий // *Криосфера Земли*, 2014, т. XVIII, № 4, с. 59–69.
- Ландшафты** криолитозоны Западно-Сибирской газоносной провинции / Под ред. Е.С. Мельникова. Новосибирск, Наука, 1983, 165 с.
- Малкова Г.В., Павлов А.В., Скачков Ю.Б.** Оценка устойчивости мерзлых толщ при современных изменениях климата // *Криосфера Земли*, 2011, т. XV, № 4, с. 33–37.
- Малкова Г.В., Садуртдинов М.Р., Скворцов А.Г., Царев А.М.** Мониторинг криогенных геосистем в Ненецком автономном округе, их современное состояние и тенденции изменения, Ямал // *Тр. Междунар. конф. “Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы”*. Тюмень, Эпоха, 2015, с. 217–221.
- Методическое** руководство по инженерно-геологической съемке масштаба 1:200 000 (1:100 000–1:500 000) / Под ред. Е.С. Мельникова. М., Недра, 1978, 391 с.
- Москаленко Н.Г.** Изменения криогенных ландшафтов северной тайги Западной Сибири в условиях меняющегося климата и техногенеза // *Криосфера Земли*, 2012, т. XVI, № 2, с. 38–42.
- О программе** комплексного освоения месторождений углеводородного сырья Ямало-Ненецкого автономного округа и севера Красноярского края / М-во энергетики Российской Федерации: Приказ от 10 сент. 2010 г. № 441. URL: <http://docs.cntnd.ru/document/902270225>.
- Павленко В.И.** Арктическая зона Российской Федерации в системе обеспечения национальных интересов страны // *Арктика: экология и экономика*, 2013, № 4 (12), с. 16–25.
- Павлов А.В., Дубровин В.А.** Экологическая опасность недропользования в районах вечной мерзлоты // *Разведка и охрана недр*, 2000, № 5, с. 18–20.
- Стратегия** развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года [Электронный ресурс]. URL: [https://mines.gov-murman.ru/files/Strategy\\_azrf.pdf](https://mines.gov-murman.ru/files/Strategy_azrf.pdf) (дата обращения: 20.08.2015).
- Drozhdov D., Rumyantseva Ya., Malkova G., Romanovsky V., Abramov A., Konstantinov P., Sergeev D., Shiklomanov N., Kholodov A., Ponomareva O., Streletskiy D.** Monitoring of permafrost in Russia. Russian Database and the International GTN-P Project // *Intern. Conf. GeoQuébec 2015* (Sept. 20–23, 2015). Québec, 2015. URL: [https://drive.google.com/folderview?id=0ByauiPDit-FqY1Vj3lIR0t0QzQ&usp=drive\\_web&tid=0ByauiPDit-FqUXExaXpPN0ZaU00](https://drive.google.com/folderview?id=0ByauiPDit-FqY1Vj3lIR0t0QzQ&usp=drive_web&tid=0ByauiPDit-FqUXExaXpPN0ZaU00) (abstr. 617).
- Khomutov A., Leibman M.** Assessment of landslide hazards in a typical tundra of Central Yamal // *Landslides in Cold Regions in the Context of Climate Change, Environmental Science and Engineering* / W. Shan et al. (eds). Switzerland, Springer Intern. Publ., 2014, p. 271–290, doi: 10.1007/978-3-319-00867-7\_11.
- Melnikov V.P., Drozdov D.S.** Distribution of permafrost in Russia // *Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide: International approaches to reduce anthropogenic greenhouse gas emissions* / S. Lombardi, L.K. Altunina, S.E. Beaubien (eds); N.Y. etc., Kluwer Acad. Publ., NATO Sci. Ser. IV: Earth and Environmental Sci., 2006, vol. 65, p. 69–80.
- Lantuit H., Overduin P.P., Wetterich S., Hubberten H.W., Brown J., Couture N., Aré F., Atkinson D., Cherkashov G., Drozdov D., Donald Forbes L., Solomon S., Graves-Gaylord A., Grigoriev M., Sedenko S., Jordan J., Jorgenson T., Ødegård R.S., Ogorodov S., Streletskaya I. et al.** The Arctic Coastal Dynamics Database: A New Classification Scheme and Statistics on Arctic Permafrost Coastlines // *Estuaries and Coasts*, 2012, vol. 35, No. 2, p. 383–400.

Поступила в редакцию  
28 августа 2016 г.