

ПРОБЛЕМЫ  
ЭКОЛОГИИ

АДАПТАЦИЯ – ВАЖНЕЙШАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОСВОЕНИЯ  
СУБАРКТИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ РОССИИ

© 2019 г. В.И. Осипов<sup>1\*</sup>, О.Е. Аксютин<sup>2\*\*</sup>, А.Г. Ишков<sup>2\*\*\*</sup>,  
В.А. Грачёв<sup>3\*\*\*\*</sup>, Д.О. Сергеев<sup>1\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>ПАО "Газпром", Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*E-mail: osipov@geoenv.ru; \*\*E-mail: gazprom@gazprom.ru;

\*\*\*E-mail: a.ishkov@adm.gazprom.ru; \*\*\*\*E-mail: vagrach@gmail.com;

\*\*\*\*\*E-mail: cryo2@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.04.2018 г.

Поступила после доработки 08.06.2018 г.

Принята к публикации 27.08.2018 г.

Потепление климата Земли требует приспособления хозяйственной деятельности человека к этим изменениям, особенно в районах распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ). В качестве эффективного механизма управления природопользованием, позволяющего сохранять природу и одновременно повышать сопротивляемость и устойчивость создаваемой инфраструктуры к климатическим изменениям, авторы статьи предлагают рассматривать адаптацию. Адаптационная модель хозяйственного освоения субарктических территорий предполагает выполнение ряда последовательных процедур на основе глубокого знания закономерностей развития криосферы, прогнозирования температурных изменений и состояния ММГ. В статье приводятся примеры применения адаптационных технологий при решении хозяйственных вопросов в субарктической зоне России.

*Ключевые слова:* криосфера, техногенез, многолетнемерзлые грунты, деградация многолетнемерзлых грунтов, опасные природные процессы, адаптация, адаптационная модель, прогнозирование, моделирование, мониторинг.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-587389156-63>

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ  
И ИХ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

**Глобальные климатические изменения.** На основе палеоклиматических реконструкций установлено, что в истории Земли наблюдался ряд мегациклов естественного изменения климата, обусловленных периодической сменой продолжительных по времени периодов относительно пониженных и повышенных температур. Каждый мегацикл включал в себя, в свою очередь, менее продолжительные

макро-, мезо- и микроциклы. Таким образом, можно говорить о разнопериодной цикличности изменения температуры на Земле, варьирующейся от десятков и даже сотен миллионов до нескольких сот лет. Представление о направленности этих процессов можно составить по температурным трендам, получаемым на основании усреднения температур кратковременных циклов. За 500 млн лет на Земле прошли четыре температурных мегацикла с минимумом температур в ордовике–силуре, каменноугольном периоде – перми, менее

ОСИПОВ Виктор Иванович – академик РАН, научный руководитель ИГЭ им. Е.М. Сергеева РАН. АКСЮТИН Олег Евгеньевич – член-корреспондент РАН, член правления и начальник департамента ПАО "Газпром". ИШКОВ Александр Гаврилович – доктор химических наук, заместитель начальника департамента, начальник управления ПАО "Газпром". ГРАЧЁВ Владимир Александрович – член-корреспондент РАН, президент Неправительственного экологического фонда им. В.И. Вернадского. СЕРГЕЕВ Дмитрий Олегович – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией ИГЭ РАН, эксперт РАН.

выраженной серии похолоданий в юрском и меловом периодах, палеогене, неогене и четвертичном периодах [1].

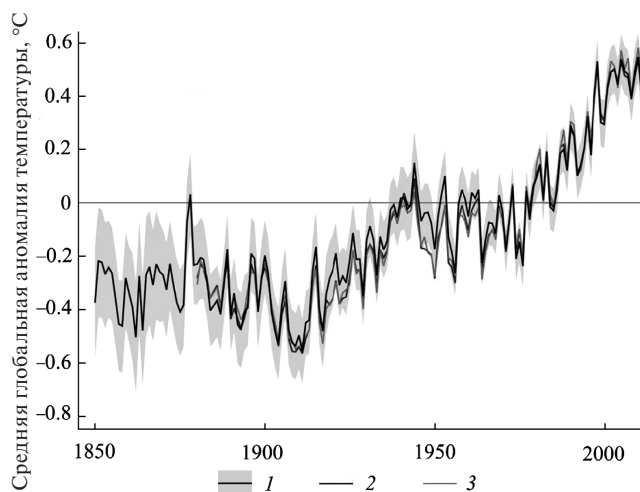
В четвертичное время (последние 1,8 млн лет) на общем фоне относительно невысоких температур отмечается несколько эпох похолодания (оледенения) с межледниковыми периодами потепления. Пределы Русской равнины охватывало не менее трёх оледенений – они сопровождалась установлением отрицательных температур, чередовавшихся с более высокими температурами в эпохи потепления. Последнее оледенение отступило более 10 тыс. лет назад и затем несколько тысячелетий происходило потепление с устойчивым трендом медленного повышения температуры (межледниковый этап). Во второй половине голоцена тренд изменился: после климатического оптимума (6 тыс. лет назад) началось медленное похолодание [2]. Детальные количественные палеоклиматические реконструкции последнего межледникового цикла позволили оценить не только амплитуды, но и скорости изменения температур: во второй половине голоцена она составила  $0,002^{\circ}\text{C}$  за 10 лет.

Особый интерес представляет изменение глобальной температуры на Земле в последние 150 лет (рис. 1). Данные метеорологических наблюдений свидетельствуют о том, что, начиная примерно с середины XIX в., температурный тренд на Земле претерпел изменение: вместо похолодания началось потепление, которое приняло в настоящее время глобальный характер. К 2015 г. средний подъём температуры в мире достиг  $1^{\circ}\text{C}$  по сравнению с доиндустриальным периодом, что привело к заметному

изменению климатической обстановки на Земле [3]. Современное потепление идёт в 10 раз быстрее, чем во время перехода от последнего оледенения к межледниковью 20–10 тыс. лет назад. Тренды реальных изменений температуры на территории России за последние 75 лет представлены на рисунке 2.

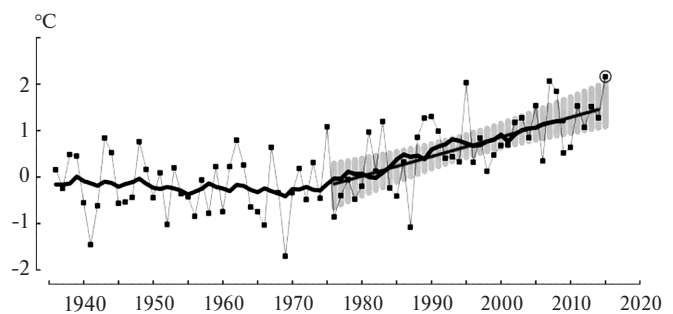
Возникает чрезвычайно важный вопрос: связано ли наблюдающееся потепление с естественными климатическими колебаниями продолжительностью до нескольких столетий, которые случались и раньше, или же основным фактором потепления оказываются воздействия на климатическую систему, обусловленные выбросом в атмосферу парниковых газов – двуокси углерода ( $\text{CO}_2$ ), метана ( $\text{CH}_4$ ) и диоксида азота ( $\text{NO}_2$ ), способствующих поглощению солнечной энергии в приземных слоях атмосферы и повышению её температуры? Анализ пузырьков воздуха из кернов льда, сохранивших состав древней атмосферы Антарктиды, показывает, что современная концентрация парниковых газов в атмосфере Земли намного выше, чем когда-либо за последние 10 тыс. лет [5]. Тем не менее единого мнения о причинах потепления до сих пор не существует. Часть исследователей считает, что это явление непосредственно связано с выбросами тепляющих газов, другие предпочитают относить его к микроциклу природного происхождения, не имеющего отношения к техногенезу.

В ряде публикаций у нас в стране и за рубежом приводятся результаты моделирования климатических изменений за последние 80–100 лет и их последствия [6]. Наибольший интерес представляют данные Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), издавшей четыре Оценочных доклада, а в 2014 г. подготовившей пятый. В нашей стране работы в области климатических изменений обобщаются Комитетом по гидрометеорологии и картографированию Российской



**Рис. 1.** Сравнение 12-месячных скользящих средних аномалий (относительно нормы 1961–1990 гг.) глобальной температуры приземного воздуха, рассчитанных по данным трёх независимых массивов наблюдений за 1850–2012 гг.

1 – Met Office Hadley/CRU; 2 – NOAA NCDC; 3 – NASA GISS. По материалам [4]



**Рис. 2.** Динамика среднегодовой температуры воздуха на территории России по данным Росгидромета

Скорость потепления равна  $0,45^{\circ}\text{C}/100$  лет, доверительный интервал равен 43%; осреднение по календарному году; тонкая серая линия соответствует ходу среднегодовых температур, жирная чёрная линия соответствует осреднению “скользящим окном”, серая прямая линия показывает тренд изменения температур за выбранный отрезок времени

Федерации, им выпущено два аналитических доклада (ряд данных из докладов МГЭИК и Росгидромета будет приведён ниже).

Для установления причин происходящих изменений МГЭИК был проведён эксперимент с использованием физико-математической модели общей циркуляции атмосферы и океана [7]. Моделирование выполнено для двух сценариев: постоянной концентрации парниковых газов, отвечающей уровню доиндустриальной эпохи, и для заданных концентраций этих газов в соответствии с данными мониторинга (рис. 3). Максимальный рост приземных температур отмечается в средних и субполярных широтах Северного полушария над континентами, где скорость температурных изменений может достигать 1,7–2,0°C за 100 лет.

Важный вывод следует из четвёртого оценочного доклада: антропогенное влияние на климат проявляется на всех обитаемых континентах не только в температуре воздуха, но и в характеристиках циркуляции атмосферы, приводя к увеличению повторяемости катастрофических природных явлений [7]. Из доклада МГЭИК можно сделать вывод, что в ближайшие два десятилетия, независимо от сценария выбросов парниковых газов, глобальное потепление продолжится со скоростью около 0,2°C за десятилетие. Если даже эти выбросы не будут прирастать, то в течение 20 лет следует ожидать повышения температуры на 0,1°C за 10 лет.

**Последствия климатических изменений в субарктической зоне России.** Изменение климата представляет наибольшую опасность для состояния субарктического региона нашей планеты. В Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

проведена модельная оценка деградации многолетней мерзлоты при глобальных климатических изменениях с учётом антропогенного воздействия [6]. Согласно расчётам, общая площадь приповерхностных многолетнемёрзлых грунтов суши Северного полушария в XXI в. может уменьшиться с 20 млн км<sup>2</sup> до 5,3–12,8 млн км<sup>2</sup> в зависимости от сценария антропогенного воздействия (рис. 4).

Сокращение площади криолитозоны вызвано оттаиванием приповерхностных мёрзлых грунтов в северных регионах России, Западной Сибири и Северной Америки. При реализации самого жёсткого сценария, учитывающего фактор антропогенного влияния, деградацией могут быть затронуты и некоторые районы Восточной Сибири. В тех регионах, где многолетняя мерзлота сохраняется, увеличивается глубина сезонного оттаивания. Так, в Восточной Сибири она возрастает от 2,0–2,5 м (при среднем сценарии антропогенного воздействия) до 2,5–3,0 м при жёстком сценарии.

Не менее интенсивен процесс сокращения массы ледников Арктики. В связи с этим следует ожидать повышения уровня мирового океана на 0,19–0,58 м. Изучение состояния оледенения архипелагов российской Арктики позволяет предполагать, что в текущем столетии дефицит баланса массы ледников будет возрастать. Особенно высоких удельных потерь массы следует ожидать на ледниках Земли Франца-Иосифа и Новой Земли.

Переход грунтов из мёрзлого в талое состояние приводит к деформациям земной поверхности и возрастанию риска опасных природных явлений на значительных территориях Западной и Восточной Сибири. Важнейший дестабилизирующий

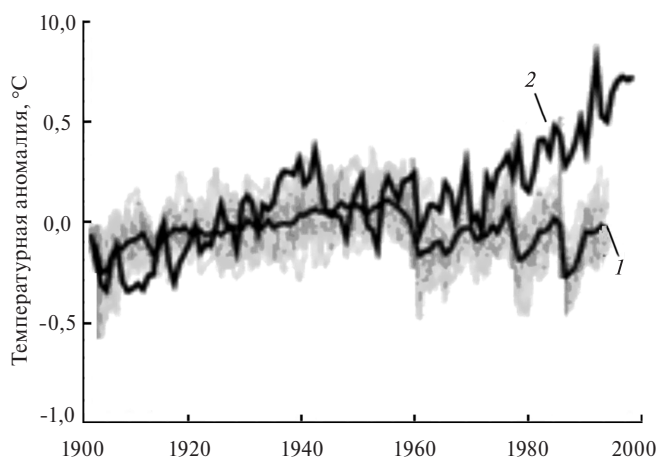


Рис. 3. Результаты моделирования изменения наземной температуры на Земле

1 — с учётом только природных воздействий (при постоянном содержании обогревающих газов, равном доиндустриальному уровню), 2 — с учётом изменения концентрации обогревающих газов в соответствии с данными мониторинга. Область, выделенная серым, соответствует годовым осцилляциям значений температур

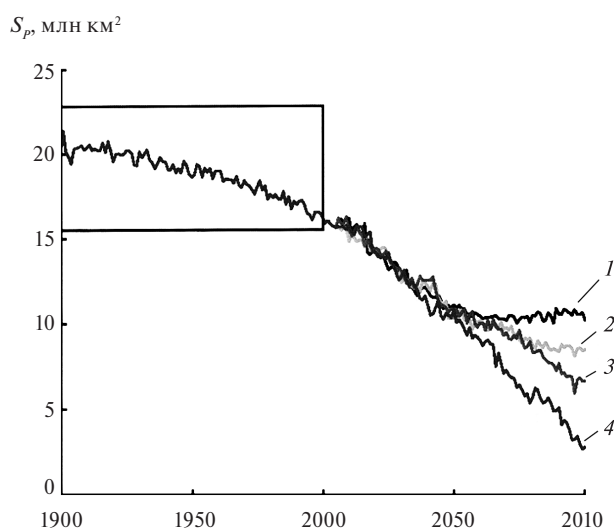


Рис. 4. Изменение площади распространения многолетнемёрзлых грунтов на Земле в XX–XXI столетиях при мягком (1), среднем (2, 3) и жёстком (4) сценариях антропогенного воздействия

фактор в регионе — оттаивание пород на участках распространения льдистых отложений, повторно жильных льдов, пластовых залежей льда. Развитие этого процесса в континентальной части Арктики вызывает активизацию термокарста, термоэрозии, солифлюкции, сезонного пучения, площадного опускания земной поверхности. Поражённость термокарстом северных районов Западной Сибири исключительно велика (рис. 5).

Особенно существенных изменений следует ожидать на территориях с большим запасом льда в толще пород (рис. 6). К таким относится полуостров Ямал с располагающимся здесь крупнейшим Бованенковским газоконденсатным месторождением, где были вскрыты пластовые льды максимальной мощностью до 28,5 м. Площадь отдельных ледяных грунтовых массивов достигает 10 км<sup>2</sup>, а объём — более 4 млн м<sup>3</sup>.

На севере Западной Сибири обнаружены геокриологические кратеры пневматического или газовзрывного механизма формирования [8]. Впервые пристальное внимание к этому явлению было привлечено в 2014 г. с обнаружением в юго-западной части полуострова Ямал, а точнее, в 30 км южнее Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения, глубокого кратера, в нижней своей части заполненного водой и по форме напоминающего взрывную воронку (рис. 7) с внешним диаметром 60 м, внутренним — 40 м и глубиной около 50 м. Окружает её бруствер из грунта, выброшенного на расстояние до 120 м. Общий вид воронки свидетельствует о том, что она образовалась в результате мощного выброса газа из неглубокой подземной залежи, сформировавшейся в пространстве вытаявания погребённого льда (пластового, жильного или ядра булгуньяха — гидролокколита). Скопившийся в полости газ мог быть сингенетическим, биохимического происхождения, или катагенетическим, мигрировавшим из более глубоких горизонтов по глубинным разломам. Не исключается его образование в результате диссоциации (распада) газогидратов при изменении термобарических условий. Благодаря проведённым в дальнейшем исследованиям снимков из космоса в тундре Ямала и Гыдана, на других северных территориях России, включая дно больших карстовых озёр, удалось обнаружить значительное количество подобных кратеров. Предполагается, что образование всех их связано с выбросами газа [9].

Случаи взрывной дегазации криосферы встречаются не только на суше, но и на арктическом шельфе, где имеется субмаринный слой вечной мерзлоты. Об этом свидетельствуют глубокие кратеры, встречающиеся на морском дне шельфовых зон. Взрывные выбросы метана представляют большую опасность для буровых скважин, подводных трубопроводов и судов.

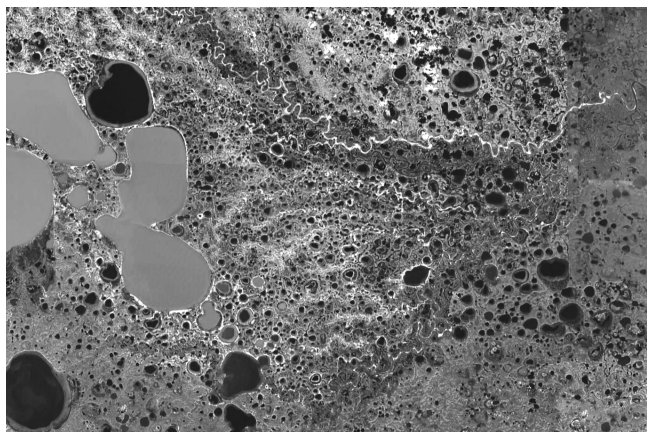


Рис. 5. Поражённость термокарстом одного из районов Ямала (вид из космоса)

Тёмные и светлые округлые пятна соответствуют термокарстовым озёрам



Рис. 6. Залежи льда в мёрзлой толще пород

Фотография М.Г. Григорьева



Рис. 7. Ямальская воронка [8]

## ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

### Адаптация как технология природопользования.

Очевидно, что изменение климата будет иметь не только отрицательные, но и положительные последствия, к числу которых относится улучшение условий для освоения арктического шельфа, сокращение отопительного сезона и экономия энергии, смещение к северу зоны рискованного земледелия и т. д. В связи с этим особую важность приобретает проблема адаптации всей хозяйственной деятельности и социальных мероприятий к ожидаемым изменениям климата. Главное — не забывать важный принцип, присутствующий в Климатической программе Российской Федерации: "Потери приходят к нам сами, а использование выгод требует от нас усилий" [10].

Природа обладает исключительно мощными и разнообразными механизмами самоорганизации, влияя на которые человек не может. Надо навсегда отказаться от когда-то провозглашённого лозунга "Нам не нужно ждать милостей от природы, взять их — наша задача". Призыв одолеть природу любыми средствами бессмыслен и способен привести не к развитию, а к гибели общества, ибо победить природу нельзя. Действительно, как бороться с изменением климата или развитием опасных природных процессов, таких, например, как землетрясения? Можно только изучать факторы, влияющие на эти явления, и с учётом их закономерностей пытаться регулировать природопользование и техногенную деятельность человека, с тем чтобы приспособиться к неизбежному.

Адаптационный принцип природопользования заключается в том, что человек в своей техногенной деятельности стремится не преобразовывать природные условия, а действовать в согласии с природными процессами [11]. Следуя таким путём, он добивается повышения природной безопасности, а также улучшения условий проживания на планете, избегая деградации окружающей среды. Адаптация предполагает не отказ от природных ресурсов, а рациональное их использование, при котором не превышает экологическая ёмкость биосферы.

В условиях быстро развивающихся климатических изменений необходима упреждающая, заблаговременная адаптация, основной целью которой должно быть повышение сопротивляемости и устойчивости общества к негативным процессам в окружающей среде. Игнорирование адаптационных мероприятий вызовет увеличение уже в ближайшем будущем чрезвычайных ситуаций, приводящих к значительным экономическим затратам и возрастанию риска гибели людей.

**Адаптационная модель хозяйственного освоения субарктических территорий.** Разработка адаптационных технологий природопользования при рассмо-

трени её в качестве междисциплинарной научной проблемы требует глубокого познания климатических изменений как мультифакторного процесса, оценки его экологических и экономических последствий, а ещё — опоры на научные достижения базовых природоведческих и управленческих дисциплин. Применительно к субарктическим регионам стоит задача количественной оценки и прогнозирования динамики климата на ближнюю (30–100 лет) и более отдалённую перспективу. На основе этих данных ведётся расчёт состояния и свойств пород криолитозоны, от которых зависит безопасность и долговечность объектов техносферы. Из-за высокой неравномерности климатических изменений, а также зависимости распределения температурного поля от ряда природно-региональных факторов, модели адаптационного природопользования также несут региональный характер и основываются на частных сценариях. В них учитываются не только температурные тренды, но и конкретные данные, касающиеся природных условий изучаемых территорий, характера техногенеза и степени фактической деградации окружающей среды. В методическом отношении разработка модели адаптационного природопользования субарктических территорий России включает последовательные этапы. К их числу относятся:

- оценка температурного тренда на изучаемой территории;
- прогноз температурных изменений применительно к реферируемому отрезку времени с учётом всех возможных факторов, влияющих на температурное поле;
- прогноз изменения состояния криолитосферы и развития опасных природных процессов, их привязка к конкретной площади (составление карты уязвимости изучаемой территории);
- выбор на основе карты уязвимости наиболее благоприятных площадок для хозяйственного освоения с учётом экологической безопасности и экономических затрат;
- разработка рекомендаций по мониторингу окружающей среды и инженерной защите проектируемых или существующих объектов техносферы.

Все эти этапы тесно взаимосвязаны, каждый последующий базируется на данных, получаемых на предыдущих стадиях исследований.

На первом этапе, предполагающем оценку тренда температурных изменений, анализируются и обобщаются ранее полученные данные мониторинговых наблюдений за климатом. Обобщённые результаты содержат исходную информацию о направлении, скорости и амплитуде температурных изменений, их достоверности. Если представляется возможным, анализируются особенности температурной динамики применительно к различным элементам рельефа, степени обводнённости и залесённости, преимущественного направления ветров и т. д.

Разумеется, точность получаемых статистических данных ограничена, она зависит от их массива, сезонности и продолжительности наблюдений, размещения точек наблюдений по территории.

На основе этих данных и имеющейся информации о закономерностях вариаций температуры в других регионах Земли, близких по природным условиям к изучаемым, прогнозируются температурные изменения в районе исследований. Важно, чтобы прогноз учитывал влияние локальных природных факторов на распространение температурного поля и отражал связанные с этим возможные вариации температуры. При расчёте поля используются специальные программные средства и трендовые данные, выявленные на предыдущем этапе исследований.

В ходе третьего этапа прогнозируются изменения состояния пород криолитозоны и развитие криогенных природных опасностей. Оцениваются: состояние толщи пород (мёрзлое, талое или смешанное), глубина залегания границы многолетней мерзлоты, глубина сезонного промерзания (оттаивания), развитие опасных процессов, таких как термокарст, криогенные сплывы, солифлюкция и др. На основании этих исследований составляется прогнозная карта уязвимости криосферы для оцениваемого интервала времени. Карта – важнейший документ адаптационной модели, именно она позволяет определить наиболее благоприятные территории (площадки) для хозяйственного освоения с учётом прежде всего экологической безопасности и экономики освоения. Для ранее построенных объектов инфраструктуры с помощью карты уязвимости определяется необходимость заблаговременной инженерной защиты сооружений.

Заключительный раздел модели включает рекомендации по организации комплексного гидрометеорологического и геотехнического (геокриологического) мониторинга природной среды и рассмотрение методов инженерной защиты объектов.

### ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ АДАПТАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

К сожалению, действующие в настоящее время стандарты и нормативы не предусматривают использования адаптационного подхода при проектировании, который должен включать учёт динамики мерзлотно-геологических условий участков застройки в процессе жизненного цикла. Существуют, по крайней мере, два класса ошибок, связанных с отсутствием адаптации хозяйственной деятельности к меняющимся условиям. Ошибки первого из них вызваны недостатком данных о возможных изменениях геокриологических условий через 10–50 лет после строительства сооружения. Яр-



Рис. 8. Конденсаторные блоки систем температурной стабилизации ММГ, применённых на Бованенковском месторождении [12]

кий пример – проблемы эксплуатации ряда зданий в г. Надыме Ямало-Ненецкого автономного округа, где кровля многолетнемёрзлых пород залегает глубже 15 м. Формально изыскатели и проектировщики не нарушили нормативов, обосновывая решения о строительстве зданий на талом основании. Однако по прошествии 10–15 лет после ввода зданий в строй прогрессирующее потепление климата и продолжающееся тепловое воздействие зданий на грунты повлекли за собой ускорение оттаивания заглублённой кровли мерзлоты. Это привело к деформациям конструкций и финансовым убыткам.

Другой класс ошибок связан с неправильным назначением режимов эксплуатации сооружения и/или параметров технологического режима. Например, степень охлаждения газа на выходе компрессорной станции должна соответствовать условию квазистабильного периодически меняющегося температурного поля грунтов на участках подземной прокладки трубопровода. Однако аномальная температура воздуха в летнее время часто приводит к несоответствию проектных и реальных показателей эксплуатации и, как следствие, к развитию негативных процессов в полосе землеотвода транспортных сооружений.

Динамику климата и вызванные ею изменения температурного режима грунтов криолитозоны важно учитывать при проектировании оснований и фундаментов промышленных и гражданских объектов, чтобы избежать их разрушения. Для этого необходимо знать тренд этих изменений за какое-то время (чем больше временной интервал, тем лучше), выбрать технологию, позволяющую стабилизировать температуру грунтов основания, и режим её поддержания. Такой адаптационный подход, позволяющий резервировать надёжность оснований и фундаментов строительных объектов с поправкой на многолетнее потепление, был применён на севере Западной Сибири на одном из участков

Бованенковского месторождения газа [12]. В результате многолетних исследований полуострова Ямал, где оно находится, было установлено, что за период с 1960-х годов по 2008 г. среднегодовые фоновые температуры многолетнемёрзлых грунтов (ММГ) повысились в среднем от 2,0°С в долинах крупных рек, до 4,0°С в пределах водораздельных пространств и достигают в настоящее время –4,0° ... –6,0°С на водоразделах и –2,0° ... –5,0°С в долинах рек.

С целью изучения характера изменения температуры мёрзлых толщ пород в пределах Бованенковского месторождения пробурено 88 скважин глубиной от 150 до 550 м, в которых был проведён термокартаж. Анализ показывает: на глубине 50–60 м происходит изменение температурного градиента, свидетельствующее о том, что современный уровень теплообмена на поверхности не соответствует ранее существовавшим температурным условиям. Изменение на обратное направления температурного градиента с приближением к поверхности подтверждает факт "разогрева" верхней части разреза ММГ. Прогнозные расчёты, выполненные Институтом геоэкологии РАН им. Е.М. Сергеева, показали, что тенденция повышения среднегодовой температуры ММГ в районе исследований в дальнейшем сохранится и к 2050 г. фоновая температура ММГ достигнет –2... –3°С.

Опираясь на полученные данные динамики изменения температуры ММГ, специалисты ООО "Газпром добыча Надым" приняли решение о купировании рисков, связанных с потерей несущей способности грунтов оснований. С этой целью ими использовано современное теплообменное оборудование – парожидкостные термостабилизаторы для создания вентилируемых подполий важных инженерных сооружений (рис. 8). С помощью такого оборудования удалось создать массивы мёрзлых грунтов под фундаментами со среднегодовыми температурами от –6,0° до –8,0°С, что позволяет исключить негативное воздействие на тепловой режим оснований как глобальных климатических, так и локальных техногенных факторов и тем самым обеспечить надёжность оснований и фундаментов объектов в сложных мерзлотно-геологических условиях.

Таким образом, можно говорить об эффективности адаптационных подходов к решению проблем хозяйственной деятельности в криолитозоне. Для развития этого направления необходимо проводить экспериментальные работы в более широком масштабе, обобщать отечественный и зарубежный опыт, оценивать все возможные процедуры адаптации. Объединение научных и управленческих знаний и опыта будет способствовать эффективному и экологически безопасному освоению арктических и субарктических территорий России.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Основы геоэкологии. Ч. 3. Региональная и историческая геоэкология мира / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ, 1998.
2. Хотинский Н.А., Алешинская З.В., Шарбатян А.А. и др. Новая схема периодизации ландшафтно-климатических изменений в голоцене // Известия АН СССР. Сер. географическая. 1991. № 3. С. 30–42.
3. Гулёв С. К., Катцов В. М., Соломина О. Н. Глобальное потепление продолжается // Вестник РАН. 2008. № 1. С. 20–27.
4. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Техническое резюме. М.: Росгидромет, 2014.
5. Котляков В. М. История климата Земли по данным глубокого бурения в Антарктиде // Природа. 2012. № 5. С. 3–9.
6. Мохов И. И., Елисеев А. В. Моделирование глобальных климатических изменений в XX–XXIII веках при сценариях антропогенных воздействий RCP // Доклады АН. 2012. № 6. С. 732–736.
7. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team. R.K. Pachauri, A. Reisinger (Eds.). Geneva, Switzerland: IPCC, 2007.
8. Богоявленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра // Бурение и нефть. 2014. № 9. С. 13–18.
9. Богоявленский В. И. Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений нефти и газа в Арктике и в Мировом океане // Ноосфера. 2016. № 1. С. 48–67.
10. Катцов В. М. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата: возможные выгоды и ущербы для России, макроэкономические последствия / Доклад на Круглом столе "Проблемы глобального климата – значимость для России", НИЦ "Планета", Москва, 24 мая 2017 г.: <[www.meteor.ru/upload/iblock/666/Kattsov\\_Clim\\_week\\_2017.ppt](http://www.meteor.ru/upload/iblock/666/Kattsov_Clim_week_2017.ppt)>; ссылка проверена 28 сентября 2018 г.
11. Осипов В. И. Адаптационный принцип природопользования // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. 2017. № 5. С. 3–12.
12. Меньшиков С. Н., Мельников И. В., Осокин А. Б. и др. Резервирование надёжности оснований и фундаментов объектов газового комплекса в криолитозоне в условиях изменения климата и локальных техногенных воздействий // Газовая промышленность. 2017. Спецвыпуск № 1. С. 124–129.

## ADAPTATION AS THE PRINCIPAL TECHNOLOGY FOR THE DEVELOPMENT OF SUBARCTIC TERRITORIES OF RUSSIA

© 2019 V.I. Osipov<sup>1\*</sup>, O.E. Akxyutin<sup>2\*\*</sup>, A.G. Ishkov<sup>2\*\*\*</sup>,  
V.A. Grachev<sup>3\*\*\*\*</sup>, D.O. Sergeev<sup>1\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>*Sergeev Institute of Geoecology, RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Gazprom, St. Petersburg, Russia*

<sup>3</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

<sup>\*</sup>*E-mail: osipov@geoenv.ru; \*\*E-mail: gazprom@gazprom.ru;*

<sup>\*\*\*</sup>*E-mail: a.ishkov@adm.gazprom.ru; \*\*\*\*E-mail: vagrach@gmail.com;*

<sup>\*\*\*\*\*</sup>*E-mail: cryo2@yandex.ru*

Received: 18.04.2018

Revised version received: 08.06.2018

Accepted: 27.08.2018

Warming of the Earth's climate necessitates the adaptation of human economic activities to these changes, especially in regions of permafrost soil (PS). This study proposes adaptation as an effective mechanism for environmental management, enabling the preservation of nature and concurrently increasing the resistance and immunity of the infrastructure to climate change. The adaptive model of the economic development of subarctic territories encompasses the implementation of a series of sequential measures based on the comprehensive knowledge of the laws of the cryosphere development, estimating temperature variations, and the state of the PS. This study provides examples of the use of adaptation technologies in unraveling economic issues in the subarctic zone of Russia.

*Keywords:* cryosphere; technogenesis; permafrost soil; degradation of permafrost soil; dangerous natural processes; adaptation; adaptation model; forecasting; modeling; monitoring.