

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 551.345:581.526(571.1)

**ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ МЕРЗЛЫХ ПОРОД
И СОСТОЯНИЯ ГЕОСИСТЕМ НА ТЕРРИТОРИИ УРЕНГОЙСКОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 35 ЛЕТ (1974–2008)**

Д.С. Дроздов, Н.Г. Украинцева, А.М. Царев, С.Н. Чекрыгина*

Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия, ds_drozdov@mail.ru

** ВСЕГИНГЕО, 142452, Московская обл., пос. Зеленый, Россия*

Представлены результаты многолетних режимных наблюдений за температурой многолетнемерзлых пород и состоянием геосистем на территории Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения. Наблюдения проводились на ключевых участках, оборудованных в 1974 г. в южной лесотундре и южной тундре. Подтверждено повсеместное проявление положительного температурного тренда за период с 1974 по 2008 г., однако повышение температуры многолетнемерзлых пород происходило неравномерно как во времени, так и в пространстве. В отдельных случаях выявлены циклы потепления–похолодания. В южной лесотундре нередко наблюдалось опускание кровли многолетней мерзлоты. С помощью геоинформационных технологий построены карты динамики мерзлоты на территории месторождения. Одним из ландшафтных индикаторов потепления климата послужило продвижение границы предтундровых редколесий на 30–40 км к северу.

Температура многолетнемерзлых пород, ландшафт, геосистема, геокриологический мониторинг, изменение климата

**CHANGE OF PERMAFROST TEMPERATURE FIELD AND GEOSYSTEM STATE
ON THE URENGOY OIL-GAS-FIELD TERRITORY DURING THE LAST 35 YEARS (1974–2008)**

D.S. Drozdov, N.G. Ukraintseva, A.M. Tsarev, S.N. Chekrygina*

Earth Cryosphere Institute, SB RAS, 625000, Tyumen, P/O box 1230, Russia, ds_drozdov@mail.ru

** VSEGINNGEO, 142452, Moscow region, Zelyonyi settlement, Russia*

The results of the long-term regime observations of the permafrost temperature and state of geosystem on the Urengoy oil-gas-field territory are presented. The observations were conducted at key-sites equipped in 1974 in the landscape sub-zones of the southern forest-tundra and southern tundra. The positive temperature trend during the period of 1974–2008 has been generally confirmed everywhere; however the temperature increase was uneven both in time and in space. The cycles of warming-cooling have been revealed. In southern forest-tundra, the descending of the permafrost table has been widely observed. The permafrost dynamic maps of the research territory have been created using the geo-information technologies. The 30–40 km advance of the boundary of the scattered trees to the north is one of the obvious landscape indicators of climate warming.

Permafrost temperature, landscape, geosystem, geocryological monitoring, climate change

ВВЕДЕНИЕ

За период с 1970-х гг. до настоящего времени на севере Западной Сибири идет заметное, хотя и постепенно затухающее, потепление климата [Васильев и др., 2008; Дроздов et al., 2008]. Положительный тренд отмечен во всех точках наблюдений как для температуры воздуха, так и для температуры многолетнемерзлых пород (ММП) на подошве деятельного слоя (на глубине 10 м и более) [Дроздов и др., 1996; Дроздов, Чекрыгина, 2005]. Вместе с мерзлыми толщами меняется и состояние ландшафтов.

Взаимодействие почвенно-растительного покрова и ММП различается в ландшафтах разных природных зон [Москаленко, 1999; Вечная мерзлота..., 2002]. В северной тайге и лесотундре, где растительный покров разнообразен и мозаичен и велики запасы надземной фитомассы, растительность оказывает существенное влияние на локальные особенности температуры, льдистости и распространения ММП (обуславливает чередование участков с пониженной кровлей ММП и поверхностным их залеганием). В соответствии с класси-

фикацией Ю.Л. Шура и М.Т. Йоргенсона [Shur, Jorgenson, 2007] это “экосистемно обусловленная мерзлота” (*ecosystem-driven permafrost*), характерная для районов с островным (несплошным) распространением ММП. В тундре формирование мерзлых толщ происходит в основном под воздействием климатических факторов, а роль почвенно-растительного покрова существенно снижается. На локальном уровне мерзлые толщи здесь могут быть названы “климатически обусловленными экосистемно модифицированными” [Shur, Jorgenson, 2007]. Запасы фитомассы и мощность органического горизонта почв влияют главным образом на темпы и глубину сезонного протаивания пород. Из-за межгодовой изменчивости глубины сезонного протаивания в кровле ММП может формироваться льдистый “переходный” слой [Shur, Jorgenson, 2007], что на территории Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) подтверждается многолетними мониторинговыми наблюдениями за состоянием и температурой ММП.

РАЙОНЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Инженерно-геокриологическое изучение Уренгойского НГКМ началось в 70-х гг. прошлого века. Основной фактический материал получен до начала освоения месторождения в ходе детальной инженерно-геокриологической съемки 1975–1976 гг. Проведены аэровизуальные и наземные ландшафтные описания, геофизические измерения, бурение и опробование инженерно-геокриологических скважин, составлена серия карт масштабов 1:100 000 и 1:25 000 и пр. Этот материал стал точкой отсчета, фоном для дальнейших исследований [Дроздов и др., 1995, 1996; Москаленко, 1999; Вечная мерзлота..., 2002; Дроздов, Чекрыгина, 2005].

Геокриологический мониторинг проводится на территории Уренгойского НГКМ с 1975 г. Специальные ключевые участки для его проведения были созданы на левобережье р. Пур по субмеридиональному трансекту г. Новый Уренгой – р. Нгарка-Есетаяха – р. Хадуттэ, пересекающему всю территорию Уренгойского НГКМ (рис. 1). Участки геокриологического мониторинга названы по установкам комплексной переработки газа (УКПГ), в окрестностях которых они находятся: в южной лесотундре – УКПГ-5, в северной лесотундре – УКПГ-11, в южной тундре – УКПГ-15. На каждом участке были оборудованы термометрические скважины глубиной 10–12 м, где ежегодно в конце теплого периода (август, сентябрь) с помощью термокос проводились замеры температуры ММП. Скважины расположены в пределах различных геосистем, доминирующих в ландшафтной структуре ключевых участков. Одновременно с термометрией скважин выполнялись повторные

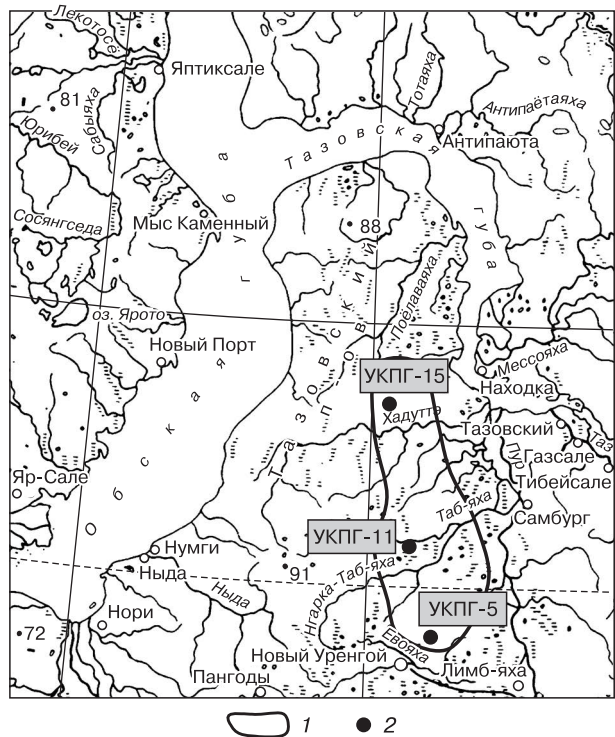


Рис. 1. Район исследований:

1 – контур Уренгойского месторождения; 2 – ключевые участки.

ландшафтные описания, геофизические и геодезические работы. Исследования проводились в южной тундре с 1974 г., в лесотундре – с 1975 г. В северной лесотундре (УКПГ-11) в конце 1990-х гг. наблюдения были прекращены. Непрерывный ряд наблюдений продолжается до настоящего времени только на двух участках геокриологического мониторинга – в южной лесотундре (УКПГ-5) и южной тундре (УКПГ-15).

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА КЛЮЧЕВЫХ УЧАСТКАХ

В южной лесотундре на участке геокриологического мониторинга УКПГ-5 профиль с термометрическими скважинами расположен на водораздельной поверхности IV озерно-аллювиальной равнины и пересекает долину малого ручья – притока р. Нгарка-Есетаяха. Ландшафтное описание участков бурения термометрических скважин приведено в табл. 1, а характер изменения температур воздуха и ММП во времени показан на рис. 2.

За период наблюдений (с 1975 по 2008 г.) произошли существенные изменения среднегодовой температуры воздуха и температуры ММП на глубине нулевых сезонных амплитуд (около 10 м), неравномерные как во времени, так и в простран-

Таблица 1. **Ландшафтная характеристика участков бурения термометрических скважин в южной лесотундре (район УКПГ-5)**

Индексы		Описание геосистем	$t_{\text{ср.год}}, ^\circ\text{C}$		$\Delta t_{\text{ср.год}}, ^\circ\text{C}$
скважин	геосистем		1975	2008	
5-01	1б	Пологонаклонный придолинный участок с пятнами-медальонами (до 10 % площади), лиственничное редколесье ($H = 6-8$ м, СК = 0,2-0,4) кустарничково ($H = 15-30$ см, СПП = 40 %) кладониевое с редким подростом лиственницы.	-0,8	-0,04	0,76
5-05	2г	Покатый террасированный склон долины ручья, густой ерник ($H = 1,2-1,3$ м, СПП = 90 %) политрихово-травяный ($H_{\text{тр}} = 20-40$ см, СПП = 60 %) с участием голубики.	-1,2	-0,1	1,1
5-06	6б	Прибровочная наклонная дренированная поверхность с западинно-бугристым рельефом. Бугры размером 25×30 м травяно-кустарничково-лишайниковые. Ложбины-западины (глубиной 1,0-1,5 м, шириной 5-7 м), бугорковатые (высота бугорков 30-40 см, покрытие поверхности 30 %), осоково-кустарничково-лишайниковые с незадернованными пятнами, зарастающими травой. Скважина находится в ложбине.	-3,5	-1,1	2,4
5-07	5б	Бугор пучения (высота 3-4 м, диаметр 50 м) с крутыми взбугренными ерниковыми склонами и западинно-бугристым (8×10 м) микрорельефом на вершине. Вершина кустарничково-лишайниковая с песчаными раздувами диаметром 3-5 м (с высыпками мелкого щебня кварца) на буграх и ерничково-лишайниковая в западинах. Единично – подрост березы ($H = 1,5-2,0$ м). Скважина находится на бугре, на краю раздува (песок с пятнами кладонии).	-3,6	-1,0	2,6
5-09	4б	Краевая часть заболоченного межхолмового понижения с кустарничково-сфагновыми буграми (высота бугров 0,6-0,8 м, диаметр 1,2 м) и кочковатыми багульниково-травяными ($H = 20-30$ см, СПП = 40-60 %) лишайниково (40 %) моховыми (60 %) западинами. Скважина находится в западине.	-3,0	-0,8	2,2
5-10	4б	Широкое заболоченное межхолмовое понижение с полигонально-валиковым болотом в центральной части. Центр полигона мохово-травяный, местами обводненный; валики багульниково-мохово-лишайниковые. Скважина находится на торфяном валике.	-2,6	-1,2	1,4

Примечание к табл. 1, 2. H – высота растительного яруса, СК – сомкнутость крон деревьев, СПП – степень проективного покрытия напочвенного покрова.

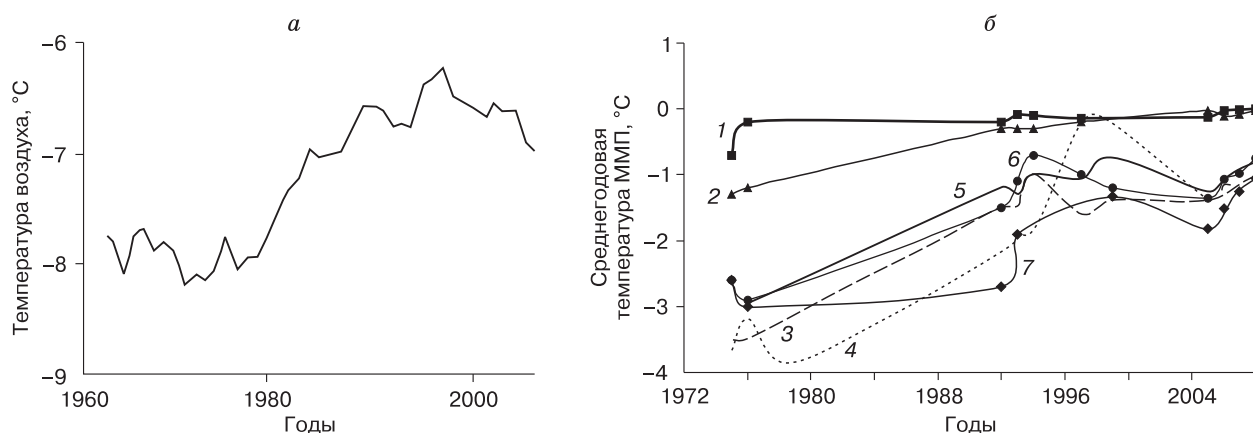


Рис. 2. Изменения среднегодовой температуры воздуха (скользящие средние по 10 годам) по данным метеостанции Уренгой (а) и температуры ММП на глубине 10 м (б) на участке УКПГ-5 (южная лесотундра).

1 – дренированное лиственничное редколесье (скв. 5-01); 2 – густой ерник высотой 1,3 м (скв. 5-05); 3 – дренированная тундра на склоне (скв. 5-06); 4 – бугор пучения (скв. 5-07); 5 – мелкобугристый край болота, бугорок (скв. 5-09); 6 – мелкобугристый край болота, мочажина (скв. 5-09а); 7 – центральная часть болота, торф.

стве. С начала 1970-х до конца 1990-х гг. наблюдалось резкое повышение среднегодовой температуры воздуха – почти на 2°C (с $-8,2$ до $-6,3^{\circ}\text{C}$). Затем температура снижалась вплоть до настоящего времени и достигла -7°C (рис. 2, а) [Вечная мерзлота..., 2002; Васильев и др., 2008]. Температура ММП в целом повторяет климатический тренд, однако заметно сглаживает его. Значительной инерцией к климатическим изменениям обладают залесенные участки (1б) и кустарники в долинах ручьев (2г) (см. табл. 1, рис. 2, б).

Наиболее чутко реагируют на колебания температуры воздуха (потепление–охлаждение) мерзлые породы торфяных и минеральных бугров пучения, болот и тундр, где в середине 1990-х гг. температура ММП достигла максимума, а затем началось похолодание. Период 2005–2008 гг. характеризовался существенным увеличением температуры ММП, которая вновь приблизилась к максимуму температур 1990-х гг. [Дроздов и др., 2008]. Генеральный тренд среднегодовой температуры ММП направлен в сторону повышения.

Диапазон увеличения температуры ММП за 34 года составляет от $0,8$ до $2,6^{\circ}\text{C}$, что связано прежде всего с теплоизолирующей ролью растительного покрова и дренированностью геосистем.

Максимальное повышение температуры ММП (на $2,6^{\circ}\text{C}$) характерно для геосистемы минерального бугра пучения с песчаными раздувами (5б, скв. 5-07) (см. табл. 1). Вершина бугра, где находится скважина, занята песчаным раздувом, что практически сводит на нет роль растительного покрова. Единичный подрост березы, возникший на вершине бугра значительно позже начала температурных наблюдений, пока не задерживает поступление тепла в верхние горизонты ММП. Судя по аномально высокому потоку тепла в толщу мерзлых пород (см. рис. 2, а), а также примерному возрасту березы, время появления подроста соответствует середине 90-х гг. XX в.

Лишь немного уступают бугру пучения по диапазону изменения температуры ММП ($+2,4^{\circ}\text{C}$) геосистемы дренированных песчаных травяно-кустарничково-лишайниковых тундр с западинно-бугристым микрорельефом (6б, скв. 5-06) (см. табл. 1). Преимущественно лишайниковый покров почти не препятствует проникновению солнечной радиации в мерзлую толщу в теплые сезоны года. В пределах геосистем торфяников и комплексных болот (4б, скв. 5-10) ММП прогреваются значительно слабее (на $1,5^{\circ}\text{C}$ за 34 года) за счет теплоизолирующей роли торфа, мощность которого варьирует от $0,5$ до $2-3$ м.

Несмотря на существенное потепление, температура ММП всех указанных геосистем (минерального бугра пучения, лишайниковых тундр, болот и торфяников), которая раньше составляла $-2,5...-3,5^{\circ}\text{C}$, осталась стабильно отрицательной –

около -1°C при относительно устойчивом положении кровли ММП на нижней границе сезонно-талого слоя (СТС) на глубине около $1-2$ м.

Иная картина наблюдается в геосистемах придолинных редколесий (1б, скв. 5-01) и закустаренных логов и долин ручьев (2г, скв. 5-05). Лиственничные редколесья и высокоствольные кустарники (ерники, ивняки) затрудняют проникновение солнечной радиации в глубь мерзлых пород в теплый период года. Даже отепляющее влияние мощного снежного покрова, накапливающегося зимой в кустарнике и под кронами деревьев, не может противодействовать теплоизолирующей роли древесной и кустарниковой растительности. В результате за период наблюдений (1975–2008 гг.) температурный тренд ММП составил лишь $+1,1^{\circ}\text{C}$ в кустарниках (2г) и $+0,76^{\circ}\text{C}$ на залесенных участках (1б) (см. табл. 1). Исходная температура ММП в этих геосистемах была около -1°C . В результате многолетнего потепления она приблизилась к 0°C , что сделало мерзлые породы в пределах кустарников и лиственничных редколесий самыми уязвимыми в южной лесотундре. И если в долинных ерниках кровля ММП по-прежнему на большей части площади залегает у поверхности (сразу под СТС), то в лиственничных редколесьях кровля ММП опущена на глубину около 8 м, что установлено с помощью температурных замеров (рис. 3).

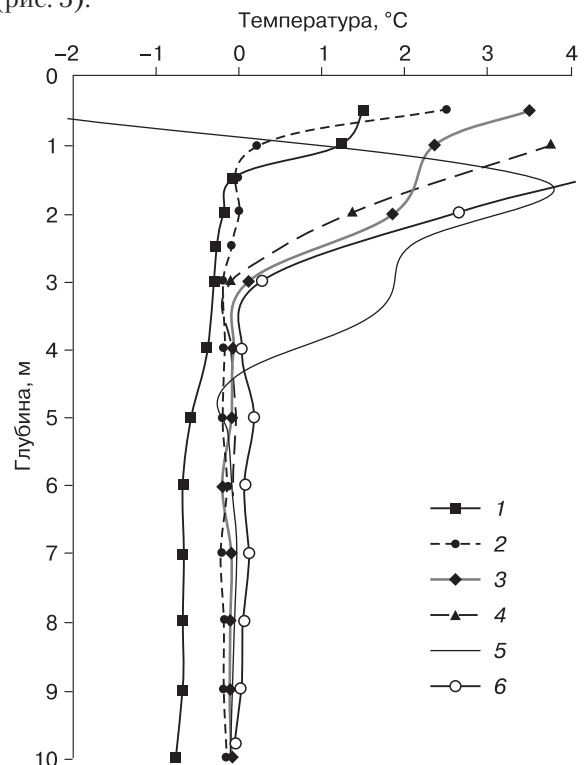


Рис. 3. Температура пород в скважине 5-01 в разные годы:

1 – 1975; 2 – 1992; 3 – 1994; 4 – 1997; 5 – 2005; 6 – 2008.

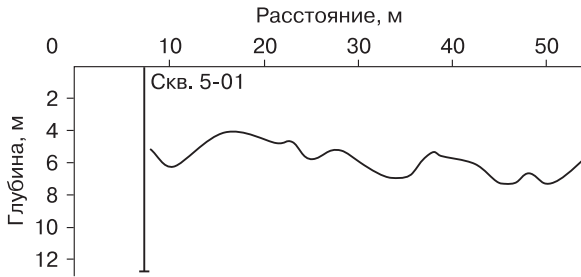


Рис. 4. Положение опущенной кровли ММП на профиле-трансекте в лиственничном редколесье вблизи температурной скважины 5-01 (по данным микросейсмического профилирования).

Данные скважинной термометрии подтверждаются микросейсмическими геофизическими работами на профиле-трансекте в лиственничном редколесье вблизи температурной скважины 5-01 (рис. 4). Верхняя граница ММП здесь располагается на глубине 3–7 м. Даже в относительно однородных ландшафтных условиях разница в положении кровли ММП составляет 4 м.

Таким образом, в различных геосистемах южной лесотундры происходит *выравнивание среднегодовой температуры ММП*. Низкотемпературные ММП прогреваются гораздо быстрее, чем породы

с изначально высокой среднегодовой температурой. В результате в пределах южно-лесотундровой IV озерно-аллювиальной равнины температура ММП в 1975 г. варьировала от –0,8 до –3,6 °С, в 2008 г. – от 0 до –1 °С.

В северной лесотундре на участке геокриологического мониторинга УКПГ-11 по всем скважинам в различных геосистемах за период 1975–1995 гг. также произошло потепление ММП, которое на глубине 10 м составило 0,1...1,5 °С [Дроздов и др., 1995].

В южной тундре на участке геокриологического мониторинга УКПГ-15 профиль с термометрическими скважинами охватывает водораздельную поверхность III морской террасы на левом берегу р. Хадуттэ и спускается по крутому склону южной экспозиции в долину р. Хадуттэ на I надпойменную террасу. Ландшафтное описание участков бурения термометрических скважин приведено в табл. 2, а характер изменения температур воздуха и ММП показан на рис. 5.

Изменение среднегодовой температуры воздуха в южной тундре заметнее, чем в южной лесотундре, но также неравномерно во времени. При общем положительном тренде от –10 до –7,5 °С на графике скользящих средних значений температуры воздуха виден период похолодания – с 1997 по 2003 г. После 2003–2004 гг. температура воздуха вновь повышается (см. рис. 5, а).

Таблица 2. Ландшафтная характеристика участков бурения термометрических скважин в южной тундре (район УКПГ-15)

Индексы		Описание геосистем	$t_{\text{ср.год}}, ^\circ\text{C}$		$\Delta t_{\text{ср.год}}, ^\circ\text{C}$
скважин	геосистем		1974	2008	1974–2008
15-03	6ж	Низкая надпойменная терраса р. Хадуттэ. Кочковатая (кочки высотой 20 см, покрытие поверхности 60 %) морошково-пушицево-багульниковая лишайниково-моховая тундра с заболоченными мочажинами. Скважина находится в осоково-пушицевой мочажине с куртинами ерника.	–5,9	–3,8	2,1
15-06	6н	Крутой взбугренный склон III морской террасы к долине р. Хадуттэ южной экспозиции, густой ольховник (Н = 1,5–3,0 м, СПП = 60–90 %) с участием ивы и ерника, мохово-разнотравный. Скважина находится в верхней части склона, в вогнутой циркообразной нише шириной 30 м (уклон 7–10°), в ивняке с участием ольхи (Н = 1,5 м, СПП = 40 %) мохово-хвощево-разнотравном.	–1,7	–0,8	0,9
15-08	6е	Пологовывпуклая водораздельная поверхность III морской террасы, бугорковатая с редкими пятнами-медальонами, травяно-кустарничковая (Н = 10–20 см, СПП = 30–70 %) мохово (СПП = 30–40 %) лишайниковая тундра. Скважина находится на основной поверхности тундры.	–5,9	–3,8	2,1
15-20	6е	Ровная водораздельная поверхность III морской террасы, с пятнами-медальонами. Нарушенный участок – песчаная насыпь высотой 1–2 м, около 200 м в поперечнике. Скважина находится под насыпью.	–5,5	–4,6* (2006)	0,9*
15-21	6е	Пологонаклонная прирвовочная поверхность III морской террасы. Нарушенный участок в 20 м от песчаной насыпи. Скважина находится на засыпанной песком поверхности (глубина слоя песка 7–10 см). Среди песка засыпанные кустарнички и пионерные арктоусово-ивняково-злаковые группировки (вейник, овсяница); СПП = 20–30 %.	–5,8	–3,1	2,7

* В 2007, 2008 гг. скважина засыпана песком – сооружена насыпь высотой 1–2 м для бурения глубокой скважины, температурных данных нет.

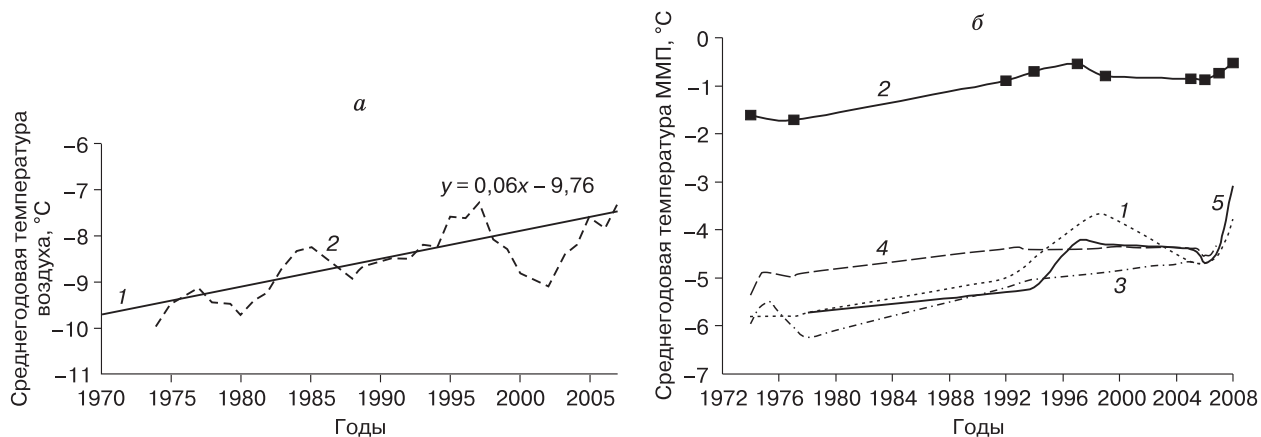


Рис. 5. Изменения среднегодовой температуры воздуха по данным метеостанции Тазовское (а) и температуры ММП на глубине 10 м (б) на участке УКПГ-15 (южная тундра).

а: 1 – линейный тренд; 2 – скользящие средние по пяти годам; б: 1 – I надпойменная терраса, заболоченная тундра (скв. 15-03); 2 – склон с высоким густым ольховником (скв. 15-06); 3 – III терраса, мохово-лишайниковая тундра (скв. 15-08); 4 – III терраса, песчаная насыпь на водоразделе (скв. 15-20); 5 – III терраса, приборочная мохово-лишайниковая тундра под песком (скв. 15-21).

Как показывают данные геокриологического мониторинга, за период 1974–2008 гг. в южной тундре, как и в лесотундре, в толще мерзлых пород повсеместно проявляется положительный температурный тренд [Дроздов, Чекрыгина, 1999]. Вслед за изменением температуры воздуха повышение температуры ММП также происходило неравномерно, волнообразно. В середине 1990-х гг. (синхронно с южной лесотундрой) наблюдалось заметное потепление мерзлых толщ, затем до 2004–2005 гг. шло постепенное понижение температуры ММП. Потом последовала новая “волна” тепла, немного уступающая предыдущей (см. рис. 5, а). Периоды потепления–похолодания наиболее четко выражены в долинных ландшафтах – на I надпойменной террасе р. Хадуттэ (скв. 15-03). На водораздельной поверхности температурные колебания заметно сглажены (скв. 15-21) либо вообще не наблюдаются (скв. 15-08).

В отличие от южной лесотундры в южной тундре резко снижается роль растительного покрова в формировании температурного поля мерзлых пород на локальном уровне. Дренированные и заболоченные водораздельные тундры, заторфованные кочкарники I надпойменной террасы р. Хадуттэ близки по температурным условиям как в 1974 г. (–5,5...–6,0 °С), так и в 2008 г. (–3,0...–3,8 °С), а температурный тренд в пределах большинства геосистем близок к +2 °С.

Исключение представляет только крутой склон III морской террасы южной экспозиции, поросший густым высокоствольным мохово-разнотравным ольховником. Высота кустарника (Н) составляет 1,5–3,0 м, а степень проективного по-

крытия (СПП) достигает 70–90 %. В южной тундре высокие кустарники не занимают большой площади и существуют только в наиболее защищенных от холода участках – на склонах южной экспозиции. Температура ММП здесь изначально была гораздо выше температуры окружающих пространств (–1,7 °С в 1974 г.), а температурный тренд (за счет буферной роли кустарников) заметно ниже (менее 1 °С). Таким образом, в южной тундре только ММП крутых закустаренных склонов можно отнести к “экосистемно обусловленной мерзлоте”, для остальной территории характерны “климатически обусловленные экосистемно модифицированные” мерзлые толщи [Shur, Jorgenson, 2007].

В южной тундре, как и в более южных районах, происходит сглаживание температурных различий между геосистемами. В 1974 г. температура ММП изменялась от –1,7 до –5,9 °С, в 2008 г. – от –0,8 до –3,8 °С. Однако в отличие от южной лесотундры потепление ММП проходит при более низких температурах и не приводит к понижению кровли ММП. Температура мерзлых пород остается стабильно отрицательной – около –1...–4 °С.

Наблюдения на ключевом участке близ УКПГ-15 позволили также выявить влияние техногенеза на перестройку температурного поля ММП. В 2007 г. несколько режимных термометрических скважин были засыпаны песком при сооружении технологической насыпи высотой 1–2 м. Скважина 15-20 была погребена под насыпью, температурные наблюдения здесь в 2007–2008 гг. не проводились. Окрестности скважины 15-21 оказались присыпаны слоем эолового песка мощ-

ностью до 10–15 см, перекрывшим напочвенный лишайниковый покров. Если в 2006 г. температура ММП в этой скважине была примерно такой же, как в других, и составляла $-4,6^{\circ}\text{C}$, то уже через два года она повысилась на $1,5^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 5, б). В остальных скважинах двухлетний температурный тренд не превысил $0,8^{\circ}\text{C}$. Очевидно, что столь резкое повышение среднегодовой температуры ММП связано с техногенезом и произошло в результате тепляющего воздействия песка, принесенного ветром с технологической насыпи.

ЛАНДШАФТНЫЕ ИНДИКАТОРЫ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Наиболее ярким ландшафтным индикатором климатического потепления явилось продвижение к северу предтундровых редколесий. В 1975–1980 гг. лиственничные редколесья и редины встречались на междуречье левых притоков Пура – рек Арка-Таб-яха и Таб-яха. К северу от р. Таб-яха междуречные поверхности были полностью безлесными [Ландшафты..., 1983]. Фрагменты низкорослых лиственничных редин встречались только на низких (I–II) речных террасах. Это подтверждалось и наземными исследованиями (крупномасштабная инженерно-геокриологическая съемка методом ключевых участков) и дешифрированием аэрофотоснимков 1960–1970-х гг.

Полевые наблюдения 2007–2008 гг. показали массовое продвижение на север по междуречью рек Таб-яха и Хадуттэ одиноко стоящих лиственниц высотой 1,5–3,0 м – вплоть до широтного отрезка долины р. Паровы-Хадуттэ (рис. 6). Внешний вид лиственниц свидетельствует о достаточно комфортных условиях их произрастания. К северу от р. Хадуттэ, уже в подзоне южных тундр, в 1997 г. на междуречьях также был отмечен 2–3-летний подрост лиственниц высотой 10–20 см, однако в последующие холодные малоснежные зимы лиственницы вымерзли и в настоящее время больше не



Рис. 6. Лиственничные редины на междуречье рек Таб-яха и Хадуттэ (северная лесотундра).

возобновляются (рис. 7). Таким образом, северная граница предтундровых редколесий сместилась за 30-летний период на 10–30 км к северу.

В тундровой зоне в числе заметных последствий климатического потепления последних десятилетий следует указать активизацию криогенных склоновых процессов на возвышенных равнинах, сложенных засоленными суглинистыми породами морского генезиса [Лейбман, Кизяков, 2007]. Расслоение обнажившихся при сходе оползней морских пород обогащает деятельный слой микроэлементами, повышающими морозостойкость растений, и способствует произрастанию на оползневых склонах аномальных для этих широт высокоствольных ивняков [Ребристая и др., 1995; Украинцева, 1997]. О смещении к северу ареалов высокоствольных кустарников ранее писал В.Н. Андреев [1970]. Местные ненецкие топонимы *неро* (ивняк), *нерка* (ива, ивовый), *нерута* (поросший ивой), *нерома* (заросли ивы) закреплены на топографических картах [Словарь..., 1971; Ukraintseva, 2008]. Все это свидетельствует о цикличности процесса криогенного оползания, его многократной активизации и широком распространении в тундрах Западной Сибири на протяжении нескольких столетий [Лейбман, Кизяков, 2007; Ukraintseva et al., 2003].

Геокриологический мониторинг показал, что условия, максимально благоприятные для продвижения на север более южных растительных форм, относятся ко второй половине 1990-х гг. Это подтвердили и наземные ландшафтные наблюдения. Так, упомянутый ранее массовый подрост 1–3-летних лиственниц на пологих водоразделах у южной границы тундровой зоны (р. Хадуттэ) был зафиксирован в 1997–1999 гг., а в начале 2000-х гг. они полностью исчезли (см. рис. 7).

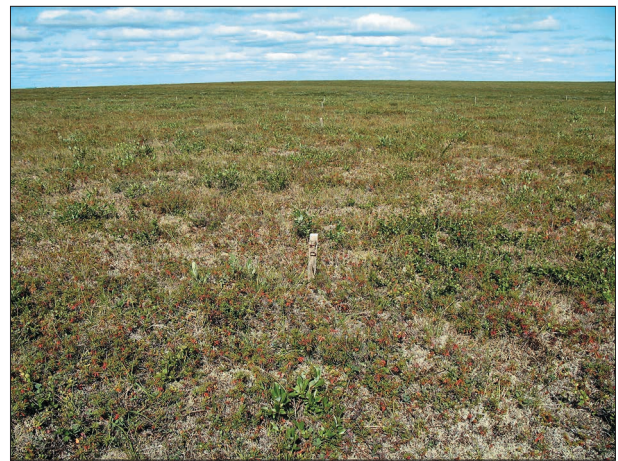


Рис. 7. Южная тундра к северу от долины р. Хадуттэ (участок УСПГ-15).

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ММП

Закономерности пространственно-временной изменчивости температуры ММП показаны на серии карт района Уренгойского НГКМ (рис. 8). Первая карта температуры (Б) составлена по результатам инженерно-геокриологической съемки 1972–1977 гг., вторая карта (В) – по данным повторной съемки и режимных наблюдений 1992–1997 гг., третья (Г) построена на основе новых данных геокриологического мониторинга (1999, 2005–2007 гг.).

Представленные на рис. 8 карты температуры ММП территории Уренгойского НГКМ, построенные для разных временных срезов, со всей очевидностью демонстрируют, что за 20 лет (1977–1997 гг.) температура ММП повысилась примерно на 1 °С, а последнее десятилетие характеризуется ее стабилизацией при одновременном массовом опускании кровли ММП в южной лесотундре. Это означает, что мерзлые породы потеряли свою устойчивость, оттаивание ММП за теплый период превышает величину их зимнего промерзания и на глубине от 2 до 5–8 м формируется слой постоянно талых пород.

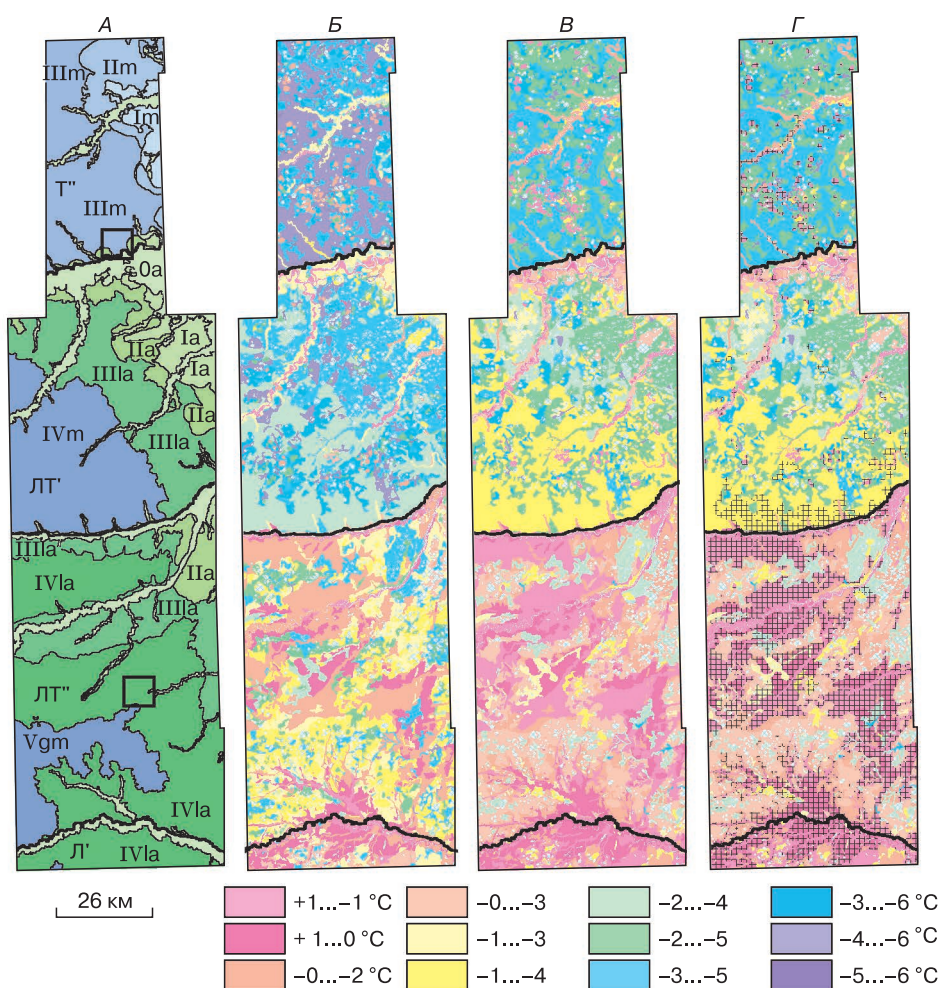


Рис. 8. Динамика температуры ММП:

А – карта типов геосистем (природные подзоны и ландшафты); Б–Г – температура ММП в разные годы: 1977 (Б), 1997 (В), 2005–2007 (Г). Жирные линии – границы природных подзон: Т'' – южная тундра, ЛТ' – северная лесотундра, ЛТ'' – южная лесотундра, Л' – северная тайга. Тонкие линии – границы ландшафтов: Vgm – пятая ледниково-морская равнина, IVm – четвертая озерно-аллювиальная равнина, IVla – третья морская терраса, IIIa – третья озерно-аллювиальная равнина, IIIla – вторая надпойменная терраса, IIa – первая надпойменная терраса, Ia – пойма. Штриховка – площади сплошного и прерывистого современного опускания кровли ММП. Квадраты – участки геокриологического мониторинга (действующие режимные площадки).

ВЫВОДЫ

Выполнена оценка состояния геосистем и температурного поля ММП территории Уренгойского НГКМ в условиях меняющегося климата. Анализ данных мониторинговых наблюдений позволяет сделать следующие выводы.

1. За период с 1974 по 2008 г. произошли существенные изменения среднегодовой температуры воздуха и горных пород (на глубине примерно 10 м). И в приземных слоях воздуха, и в толще мерзлых пород повсеместно проявляется положительный температурный тренд. Температура ММП в целом повторяет климатический тренд, заметно сглаживая его. Повышение температур воздуха и ММП происходило неравномерно как во времени, так и в пространстве, поэтому можно говорить о циклах потепления–похолодания.

2. Показано, что геосистемы криолитозоны по-разному реагируют на климатические изменения. Пространственные различия температурного поля ММП наиболее велики в южной лесотундре. Диапазон повышения температуры составляет от +0,8 до +2,6 °С, что связано с теплоизолирующей ролью геосистем, и прежде всего растительного покрова. Максимальные значения температурного тренда ММП характерны для бугров пучения и лишайниковых тундр. Несколько уступают им болота и торфяники. Наиболее мощный буфер создают лиственничные редколесья и высокоствольные кустарники (ерники, ивняки), затрудняющие проникновение солнечной радиации в толщу мерзлых пород.

3. Установлено, что на участках кустарников и редколесий в южной лесотундре температура ММП приблизилась к 0 °С, местами началась деградация ММП и опускание их кровли до глубины 5–8 м и более. Это сделало мерзлые породы в геосистемах кустарников и лиственничных редколесий самыми уязвимыми в ландшафтах южной лесотундры.

4. В отличие от южной лесотундры в южной тундре резко снижается роль растительного покрова в формировании температурного поля ММП и его пространственной изменчивости на локальном уровне. Для тундр, болот и торфяников характерны “климатически обусловленные экосистемно модифицированные” мерзлые толщи [Shur, Jorgenson, 2007], близкие по значениям среднегодовой температуры ММП и по характеру ее изменения во времени. Исключение представляют лишь редкие геосистемы крутых закустаренных склонов с аномально высокой температурой ММП, которые можно отнести к “экосистемно обусловленной мерзлоте”.

5. Выявлено, что в южной лесотундре низкотемпературные ММП прогреваются гораздо быст-

рее, чем породы с изначально высокой среднегодовой температурой, что приводит к постепенному выравниванию среднегодовой температуры пород. Аналогичные процессы идут и в южно-тундровой ландшафтной подзоне, но при более низких температурах ММП (–4...–5 °С).

6. Несмотря на потепление климата и наблюдающееся повышение температуры ММП на территории Уренгойского НГКМ, инструментально зафиксированы лишь единичные случаи перехода ММП в талое состояние по всей мощности слоя годовых теплооборотов. В то же время опускание кровли ММП до глубины 5–8 м и более и формирование участков несливающейся мерзлоты массово обнаружены в южной лесотундре, что показано на серии карт.

Исследования выполняются при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 08-05-00872, 09-05-10030к) в рамках Международных проектов TSP (термическое состояние мерзлоты) и CALM (циркумполярный мониторинг сезонноталого слоя) и научной программы ОНЗ РАН № 13.

Литература

Андреев В.Н. Некоторые географические закономерности в распределении надземной фитомассы в тундровой зоне в связи с продвижением на север древесно-кустарниковой растительности // Биологические основы использования природы Севера (Сыктывкар, 12–16 дек. 1966 г.): Материалы симпозиума. Сыктывкар, Коми кн. изд-во, 1970, с. 6–13.

Васильев А.А., Дроздов Д.С., Москаленко Н.Г. Динамика температуры многолетнемерзлых пород Западной Сибири в связи с изменениями климата // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 2, с. 10–18.

Вечная мерзлота и освоение нефтегазоносных районов / Под ред. Е.С. Мельникова, С.Е. Гречищева. М., ГЕОС, 2002, 402 с.

Дроздов Д.С., Коновалова Г.Ю., Чекрыгина С.Н. Изменение инженерно-геокриологических условий на территории Уренгойского месторождения при освоении (по материалам повторной съемки) // Тезисы докл. юбил. годовичного собрания НСКЗ “Эволюционные геокриологические процессы в Арктических регионах и проблемы глобальных изменений природной среды и климата на территории криолитозоны” (Пушино, 24–28 апр. 1995 г.). Пушино, Науч. центр РАН, 1995, с. 115–116.

Дроздов Д.С., Егоров И.П., Чекрыгина С.Н. Пространственно-временная изменчивость инженерно-геокриологических условий площади Уренгойского ГКМ // Тезисы докл. годовичного собрания ОНСКЗ “Фундаментальные исследования криосферы Земли в Арктике и Субарктике (итоги и перспективы)” (Пушино, 23–26 апр. 1996 г.). Пушино, Науч. центр РАН, 1996, с. 91–93.

Дроздов Д.С., Чекрыгина С.Н. Повторная инженерно-геологическая съемка и геокриологический мониторинг Уренгойского месторождения (север Западной Сибири) // Тезисы докл. Междунар. конф. “Мониторинг криосферы” (Пушино, 20–23 апр. 1999 г.). Пушино, Науч. центр РАН, 1999, с. 176–177.

- Дроздов Д.С., Чекрыгина С.Н.** Техногенез и геокриологический мониторинг района Уренгойского газового месторождения (Западная Сибирь) // Тезисы докл. VII Междунар. конф. "Новые идеи в науках о Земле". М., Изд-во Моск. ун-та, 2005, т. 4, с. 70–71.
- Дроздов Д.С., Васильев А.А., Коростелев Ю.В. и др.** Климатические факторы и изменения температуры грунтов на севере Западной Сибири // Тезисы докл. науч. конф. "Вклад России в Международный полярный год (МПП)" (Сочи, 2–8 окт. 2008 г.). Сочи, Росгидромет, РАН, 2008, с. 58–59.
- Ландшафты** криолитозоны Западно-Сибирской газоносной провинции / Под ред. Е.С. Мельникова. Новосибирск, Наука, 1983, 165 с.
- Лейбман М.О., Кизяков А.И.** Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова. Москва; Тюмень, ИКЗ СО РАН, 2007, 206 с.
- Москаленко Н.Г.** Антропогенная динамика растительности равнин криолитозоны России. Новосибирск, Наука, 1999, 280 с.
- Ребристая О.В., Хитун О.В., Чернядьева И.В., Лейбман М.О.** Динамика растительности на криогенных оползнях в центральной части полуострова Ямал // Ботан. журн., 1995, т. 80, № 4, с. 31–48.
- Словарь** терминов и других слов, встречающихся в ненецких географических названиях / Сост. А.П. Алекса. М., ГУГК, 1971, 105 с.
- Украинцева Н.Г.** Ивняковые тундры Ямала как индикатор засоленности поверхностных отложений // Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике. Новосибирск, Наука, 1997, с. 182–187.
- Drozhdov D.S., Malkova G.V., Melnikov V.P.** Recent advances in Russian geocryological research: a contribution to the International Polar Year // Proc. of the Ninth Intern. Conf. on Permafrost (Fairbanks, USA, June 29–July 3, 2008). Fairbanks, 2008, vol. 1, p. 379–385.
- Shur Y.L., Jorgenson M.T.** Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems // Permafrost and Periglacial Process, 2007, No. 18, p. 7–19.
- Ukraitseva N.** Vegetation response to landslide spreading and climate change in the West Siberian Tundra // Proc. of the Ninth Intern. Conf. on Permafrost. Fairbanks, 2008, vol. 2, p. 1793–1798.
- Ukraitseva N.G., Streletskaya I.D., Ermokhina K.A., Yermakov S.Yu.** Geochemical properties of plant-soil-permafrost system at landslide slopes, Yamal, Russia // Permafrost: Proc. of the 8th Intern. Conf. on Permafrost, Zurich, Switzerland, 2003, vol. 2, p. 1149–1154.

*Поступила в редакцию
3 августа 2009 г.*