УДК 504.06 DOI: 10.15372/KhUR2023447 EDN: DSOGLW

# Спутниковые данные при исследовании растепления арктических ландшафтов в условиях нефтегазодобычи

М. Н. АЛЕКСЕЕВА, И. Г. ЯЩЕНКО

Институт химии нефти СО РАН, Томск (Россия)

E-mail: amn@ipc.tsc.ru

## Аннотация

Рассмотрены вопросы потепления климата и оттаивания многолетнемерзлых пород. Предложена методика оценки растепления арктических ландшафтов на основе расчета нормализованного разностного индекса снега NDSI (Normalized Difference Snow Index). Приведен фактологический материал по данным сети глобального мониторинга криолитозоны. Мониторинговые исследования показали, что по результатам расчета NDSI в 5 случаях из 23 наблюдаемых лет на метеостанции "Уренгой" и в 4 случаях из 23 лет на метеостанции "Тарко-Сале" выявлено аномально раннее снеготаяние. На техногенных площадках Уренгойского месторождения в 8 случаях из указанного периода наблюдалось отсутствие снега. При раннем снеготаянии уменьшается индекс снега NDSI и увеличивается глубина сезонно-талого слоя на площадках Уренгойского месторождения. Индекс NDSI может применяться в оценке продолжительности залегания снежного покрова и раннего снеготаяния и косвенно – при изучении глубины сезонно-талого слоя. Полученные результаты важны для прогнозных оценок темпов и масштабов оттаивания и деформации вечной мерзлоты и предотвращения аварийных ситуаций в нефтегазовом комплексе.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, сезонно-талый слой, индекс NDSI

## введение

Рост среднегодовых температур воздуха на Земле вызывает изменение количества осадков, ускорение таяния снега, увеличение глубины оттаивания многолетнемерзлых пород (ММП) и развитие деструктивных процессов [1]. Неустойчивость и нестабильность ММП (например, увеличение температуры и мощности слоя сезонного оттаивания мерзлых пород) приводит к термокарстовым процессам в Арктике, неравномерным просадкам поверхности грунта, заболачиванию и гибели лесов, усилению береговой эрозии [2]. По данным [1], в течение последних тридцати лет (1990–2019 гг.) в Арктике рост среднегодовой температуры составил около 2.43 °С. В районах морей Северного Ледовитого океана - от 2.31 °С (северная часть Гренландского и Норвежского морей) до 4.74 °С (Карское море) [3]. Неустойчивость мерзлых пород Арктической зоны связана с природными циклами климатического потепления и похолодания, особенностями рельефа, почвенно-растительного покрова и хозяйственной деятельностью человека [4]. На северо-востоке Европейской территории России, юге Сибири и севере Западной Сибири, наблюдаются неблагоприятные условия для сохранения ММП. В Западной Сибири за период 2001-2010 гг. относительно предыдущих 1966-2000 гг. отмечено снижение абсолютных значений сумм отрицательных температур воздуха и изменение теплофизических свойств снега из-за вариаций его высоты и плотности [5]. Техногенез усиливает процессы растепления мерзлых толщ, внося сопоставимые изменения в тепловое состояние горных пород, а зачастую превышающие естественные темпы в несколько раз. Повышение температуры ММП в верхней части разреза на застроенных территориях приводит к деградации этих пород и снижению несущей способности грунтов оснований и сооружений [6].

Известно [7], что вследствие растепления грунтов в Западной Сибири ежегодно происходит около 35 тыс. аварий на нефте- и газопроводах, около 21 % из них вызваны механическими воздействиями деформированного грунта. Основным фактором развития аварийности является изменение теплового поля на объектах инфраструктуры. Например, увеличение мощности вертикального факела в 3.6 раза в течение 15 сут влечет за собой повышение температуры на поверхности технической отсыпки вокруг факельной установки (ФУ) почти вдвое [8], а спустя полгода поверхностная температура грунта ФУ увеличивается в среднем на 1 °С.

В связи с существующей проблемой растепления вечномерзлых грунтов и изменений процессов снеготаяния в Арктической зоне России актуально применение космических снимков (КС) для распознавания тепловых объектов, их мониторинга и идентификации характеристик снежного покрова, что и является целью работы. В рамках указанной цели решались задачи формирования коллекций КС MOD09GA Landsat-8 за период 2000-2022 гг. и их обработки для расчета нормализованного разностного индекса снега NDSI (Normalized Difference Snow Index).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

## Описание объектов исследования

Исследования растепления арктических ландшафтов проводили на примере четырех площадок: на двух фоновых площадках (метеостанции "Уренгой" и "Тарко-Сале") и двух техногенных площадках с тепловыми объектами (действующие ФУ) Уренгойского и Восточно-Таркосалинского месторождений Пуровского района Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО). Известно, что на территории ЯНАО расположены стационарные площадки глобального мониторинга криолитозоны (САLМ – Circumpolar Active Layer Monitoring) [9]. Данные представляют собой ежегодные измерения максимальной глубины (см) сезонно-талого слоя (СТС) на 19 площадках размером 1 км<sup>2</sup> (1000 × 1000 м). Наземные измерения СТС выполнялись на площадках по сетке у закрепленных на местности реперов через каждые 100 м с 5-кратной повторяемостью с помощью щупа [10, 11]. Рядом с реперами в аналогичных условиях отбирались образцы почв и выполнялись описания растительного покрова по метровой сетке через каждые 10 см. На рис. 1 приведена карта распространения ММП ЯНАО с указанием стационаров измерения СТС и ФУ исследуемых месторождений.

Для статистического анализа глубин СТС на территории ЯНАО были отобраны показатели из общемировой базы данных по СТС [9]. В табл. 1 приведены средние значения по площадкам глубины СТС, измеряемые ежегодно в конце летнего сезона на территории ЯНАО.

В целом, в тундре формирование мерзлых толщ происходит в основном под воздействием климатических факторов [11-13]. На локальных уровнях темпы протаивания СТС зависят от положения геосистем ландшафта, облесенности, наличия болот и обводненных участков. При исследовании территории Уренгойского месторождения выявлено [11, 12], что запасы фитомассы и мощность органического горизонта почв влияют на темпы и глубину сезонного протаивания пород и температуру ММП. Растительность в естественных условиях выполняет теплоизолирующие и закрепляющие функции для ММП. Значительной инерцией к климатическим изменениям обладают залесенные участки и кустарники в долинах ручьев. Наиболее чутко реагируют на колебания температуры воздуха (потепление-охлаждение) мерзлые породы торфяных и минеральных бугров пучения, болот и тундр. Например, в южной лесотундре преимущественно лишайниковый покров почти не препятствует проникновению солнечной радиации в мерзлую толщу в теплые сезоны года. В пределах геосистем торфяников и комплексных болот ММП прогреваются значительно слабее за счет теплоизолирующей роли торфа, мощность которого варьирует от 0.5 до 2-3 м [12]. Удаление мхов приводит к активизации термокарста и термоэрозии.

В работе более подробно рассмотрены ландшафтные характеристики техногенных площадок: № 1 – на Уренгойском, и № 2 – на Восточно-Таркосалинском месторождениях.



Рис. 1. Картосхема распространения многолетнемерзлых пород на территории Ямало-Ненецкого автономного округа с цветовой градацией средних за 2005–2021 гг. значений мощности сезонноталого слоя (СТС) на площадках (обозначены цифрами на карте). ФУ – факельная установка.

Уренгойское месторождение введено в эксплуатацию в 1978 г., его протяженность с севера на юг – 220 км, площадь – более 6 тыс. км<sup>2</sup>. В 2018 г. запасы нефти были 291.6 млн т, добыча составляла 0.2 млн т. Нефть из оторочек: легкая (766–799 кг/м<sup>3</sup>), малосернистая, содержание серы – до 0.06 %, смол – 0.88 %, парафина – 2.87 % [14–16]. В 2020 г. запасы газа были 6164.8 млрд м<sup>3</sup>, добыча газа – 112.2 млрд м<sup>3</sup>. Газовые залежи – преимущественно метановые (СН<sub>4</sub> – 81.35–93.74 %; С<sub>2</sub>Н<sub>6</sub>+ высшие – 3.50– 6.85 %), содержание  ${\rm N_{_2}}$  и CO\_\_ не превышает 1 % [14–16].

Техногенная площадка № 1 находится в южной части Уренгойского лицензионного участка. Территория относится к лесотундре, где распространены кустарничково-лиственничные редколесья на повышениях рельефа и полигональные кустарничково-мохово-лишайниковые болота в низинах. Данный участок сложен верхнечетвертичными озерно-аллювиальными отложениями – песками с прослоями супесей, суглинков,

-
A
Ц
Z
Ę
щ
Z.
rabj

Средние значения сезонно-талого слоя (CTC), полученные на площадках CALM с 2008 по 2021 гг.

Номер	Обозначение стационара, расположение	Средни	е значеі	ния глуб	MHbI CTO	С на стаг	ионаре :	за год, с	M						
площадки <sup>а</sup>		2008 r.	2009 r.	2010 r.	2011 r.	2012 r.	2013 г.	2014 r.	2015 r.	2016 r.	2017 r.	2018 r.	2019 r.	2020 r.	2021 r.
1	R1, Надым, Западная Сибирь	136	101	114	129	134	136	164	163	186	148	178	176	197	196
2	R1b, Надым, Западная Сибирь	I	I	I	I	I	95	95	96	107	108	100	108	125	121
3	R3, Марре-Сале, п-ов Ямал	114	85	98	102	127	115	102	122	136	98	107	121	137	120
4	R5, Васькины Дачи, п-ов Ямал	93	76	87	87	102	103	93	102	114	102	94	94	104	101
5	К5а, Васькины Дачи, п-ов Ямал	75	47	67	67	77	80	71	76	87	66	99	72	76	76
9	R5b, Васькины Дачи, п-ов Ямал	73	81	65	65	77	78	70	77	91	75	70	73	82	82
7	R5с, Васькины Дачи, п-ов Ямал	113	82	106	114	128	126	111	129	144	118	116	114	135	123
8	R5d, Васькины Дачи, п-ов Ямал	I	I	I	Ι	I	I	41	48	54	39	40	46	51	52
6	R50a, Уренгойское месторождение, УКПГ-5	84	65	77	72	87	70	76	85	74	69	111	103	120	114
10	R50b, Уренгойское месторождение, УКПГ-15	84	65	80	82	95	92	84	93	<b>66</b>	93	101	102	I	107
11	R53, Харп, Полярный Урал	I	T	T	I	T	I	I	I	66	94	100	111	134	Т
12	R54, Гыда, Гыданский п-ов	I	I	I	I	I	I	I	I	104	06	94	100	113	102
13	R54b, Гыда, Гыданский п-ов	I	I	I	I	I	I	I	I	66	61	60	63	73	70
14	R54с, Гыда, Гыданский п-ов	I	I	I	I	I	I	I	I		67	66	69	77	73
15	R55, о-в Белый (ил)	I	54	50	53	60	55	41	59	68	57	53	54	65	55
16	R55a, о-в Белый (песок)	I	100	06	98	114	112	91	111	130	115	107	109	131	121
17	R56, Октябрьский	I	I	I	I	I	68	76	85	92	64	74	84	103	111
18	R57, Лабыгнанги	I	I	I	I	I	43	51	46	52	37	45	50	56	57
19	R58, Еркута	I	I	I	I	I	I	I	I	I	82	84	94	102	101

Примечания. 1. CALM – Circumpolar Active Layer Monitoring. 2. Прочерк – нет данных. <sup>a</sup> Номер площадки соответствует номеру на рис. 1.

линзами торфа. По данным метеостанции "Уренгой", за многолетний период (1891–1980 гг.) число дней в году со снежным покровом в среднем составляет 235 и самая ранняя дата схода снежного покрова – 16 мая [17].

Запасы углеводородов в Восточно-Таркосалинском месторождении составляют: природный газ – 231 млрд м<sup>3</sup>, жидкие углеводороды – 41 млн т [18]. Добыча нефти на месторождении ведется с 1994 г., добыча газа – с 1998 г., добыча конденсата – с 2001 г. Годовая добыча нефти в 2014 г. составила 935.5 тыс. т. За 2014 г. добыто 8469 млн м<sup>3</sup> свободного газа по газовому объекту (пласт ПК1), 1887 млн м<sup>3</sup> свободного газа и газа газовых шапок по газоконденсатным объектам и 199.6 тыс. т конденсата [19].

Техногенная площадка № 2 с установкой низкотемпературной сепарации газа с ФУ находится в южной части Восточно-Таркосалинского месторождения. В основном территория месторождения заболочена или покрыта сетью мелких озер. Распространены плоскобугристые болота, с кустарничково-лишайниково-моховым покровом на буграх и травяно-моховым – в понижениях. Северно-таежные ландшафты представлены редкослойными сосново-лиственничными лесами. По многолетним данным [17], число дней в году со снежным покровом на метеостанции "Тарко-Сале" составляет 226 и самая ранняя дата схода снежного покрова – 11 мая.

#### Методы исследования

В работе использованы описательный статистический и дистанционный методы исследования. Статистические расчеты проводились в редакторе Excel и в системе Statistica 10.0. В редакторе Excel выполнялись расчет и графическое отображение средних глубин СТС по годам и их трендов на промышленных площадках Уренгойского месторождения. В системе Statistica 10.0. по методике [20] проводился расчет и графическое отображение размаха (среднего значения, стандартного отклонения, стандартной ошибки среднего) глубин СТС по стационарам.

Основным источником информации для выделения и анализа характеристик снежного покрова являются космические снимки в видимом и ближнем ИК-диапазонах. Как известно [21], чистый, свежевыпавший снег в видимом диапазоне (четвертый канал космических снимков MODIS,  $\lambda = 0.545...0.565$  мкм) имеет альбедо, близкое к 1.0. Выпавшая из атмосферы сажа уменьшает отражательную способность и ускоряет процесс снеготаяния. Альбедо тающего, грязного (запыленного) снега снижается, при этом NDSI поверхностей без снега меньше 0.4.

Для исследованной территории была сформирована коллекция безоблачных космических снимков, полученных со спектрорадиометра MODIS, время съемки которых максимально скорректировано с датами самого раннего схода снежного покрова на метеостанциях [17].

В нашей работе для изучения процессов снеготаяния использован индекс NDSI – это значение относительной величины, показывающей различие между отражательными способностями снега в видимом и инфракрасном излучениях. По KC MODIS индекс NDSI вычисляется по формуле [22]:

NDSI = (R4 - R6)/(R4 + R6)

где R4 – отражение от снега в четвертом канале ( $\lambda = 0.545...0.565$  мкм), R6 – отражение от снега в шестом канале ( $\lambda = 1.628...1.652$  мкм). Расчет по данной формуле осуществлялся в среде ERDAS Imagine. Индекс NDSI изменяется от -1 до 1, и снежные поверхности имеют NDSI > 0.4 [23].

Далее по методике [24] рассчитывали значения коэффициента ранговой корреляции:

 между индексом NDSI и глубиной СТС на площадке R50a, УКПГ-5;

 между глубиной СТС на площадке R50a, УКПГ-5 по данным [9] и средней с 1 по 16 мая температурой воздуха на метеостанции "Уренгой" [25, 26];

 между индексом NDSI на техногенной площадке № 1 и средней с 1 по 16 мая температурой воздуха на площадке с метеостанцией "Уренгой".

По КС Landsat-8 построены карты температуры поверхности Земли в соответствии с алгоритмом, опубликованным ранее в [27].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе [3] для территории Западной Сибири приведены тренды изменения глубин СТС за период с начала наблюдений (1992 г.) по 2019 г. В целом, на территории ЯНАО происходит увеличение значений СТС за десятилетний период от 3 до 23 см. Высокий рост значений СТС определен на площадках Уренгойского месторождения: R50b УКПГ-15 (23 см/10 лет); R50a, УКПГ-5 (20 см/10 лет).

Построенная нами диаграмма (рис. 2) распределения по годам средней глубины СТС на промышленных площадках Уренгойского ме-



Рис. 2. Средняя глубина сезонно-талого слоя (СТС) на промышленных площадках Уренгойского месторождения с 2008 по 2021 гг.



Рис. 3. Диаграмма размаха глубины сезонно-талого слоя (СТС) по стационарым площадкам. Обозначение площадки соответствует данным табл. 1.

сторождения свидетельствует о процессах растепления мерзлых толщ под влиянием климата и техногенеза. В 2008 г. на площадках R50a, УКПГ-5 и R50b, УКПГ-15 мощность СТС в разрезах составила 84 см, а в 2021 г. – уже 114 и 107 см соответственно (см. рис. 2).

В данной работе рассмотрена характеристика растительности и глубина СТС на площадках. Сформирован массив глубин СТС за 2008– 2021 гг. по 8 площадкам: R1, Надым; R3, Марре-Сале; R5, Васькины Дачи; R5а, Васькины Дачи; R5b, Васькины Дачи; R5с, Васькины Дачи; R50a, УКПГ-5; R50b, УКПГ-15. Значения средних и стандартных отклонений СТС на этих стационарах приведены на рис. 3.

Наибольшее среднее значение глубины СТС установлено на стационаре R1, Надым (154±30 см). Характер распространения ММП на площадке R1, Надым по карте [28] – прерывистый, данный участок согласно карте растительности [29] находится в подзоне северной тайги, распространены лиственнично-еловые леса с кедром в сочетании с травяными, кустарничково-травяными и мохово-лишайниковыми полигональными и бугристыми болотами. За 2008-2021 гг. на стационаре Марре-Сале средняя мощность СТС составляла 113±15 см (см. рис. 3). Площадка Марре-Сале находится на п-ове Ямал у полярной станции Марре-Сале на поверхности II и III морских террас, расположена в пределах подзоны типичной тундры на дренированной поверхности террас, сложенных песчаными отложениями и покрытых полигональными травянокустарничково-лишайниковыми тундрами [11].

По сравнению с другими участками невысокие глубины СТС на R50b, УКПГ-15 и R50a, УКПГ-5 связаны с распространением на этих территориях промерзлых болот с торфом. На УКПГ-5 глубина СТС составляет 86±18 см (см. рис. 3). Среднегодовая температура ММП на глубине 1 м составляет -1 °C [30]. Характер распространения ММП на площадке R50a, УКПГ-5 согласно карте мерзлотно-ландшафтной дифференциации криолитозоны России [28] - прерывистый. По карте растительности [29] - участок находится в подзоне предтундровых лиственничных редколесий в сочетании с травяными, кустарничково-травяными и мохово-лишайниковыми полигональными и бугристыми болотами. На площадке R50a, УКПГ-5 скважины измерения глубин СТС находились в пределах шести геосистем [12]. В 2008 г. относительно 1975 г. наиболее повысилась (на 2.6 °C) температура ММП на глубине 10 м на площадке R50a, УПГ-5 на бугре, на краю раздува (песок с пятнами кладонии). Высота данного бугра пучения составляет 3-4 м, диаметр 50 м, произрастает кустарничково-лишайниковая растительность и единично – подрост березы высотой 1.5–2.0 м.

На R50b, УКПГ-15 глубина СТС составляет 91±12 см. Площадка R50b, УКПГ-15 находится в подзоне южных тундр, распространены кустарниковые, кустарничковые и кочкарно-пушицевые с березой и ивами сообщества и осоковомохово-лишайниковые плоскобугристые болота. На R50b, УКПГ-15 в составе геосистем, в пределах которых отбирали пробы, описан участок с нарушенным растительным покровом, где температура ММП до глубины 10 м в 2008 г. повысилась на 2.7 °С относительно 1975 г. [12].

Коэффициент ранговой корреляции Спирмена  $(r_{\rm c})$  между NDSI и глубиной СТС на площадке R50a, УКПГ-5 равен -0.3. Связь между исследуемыми признаками – обратная, теснота (сила) связи – слабая, зависимость признаков статистически не значима (R > 0.05). Отрицательное значение коэффициента корреляции свидетельствует о тенденции повышения СТС с уменьшением NDSI (раннее снеготаяние).

Предполагая приближенность (80 км) метеостанции "Уренгой" и площадки R50а, УКПГ-5, рассчитали коэффициент корреляции Спирмена между значениями температур за 1–16 мая и глубиной СТС:  $r_{\rm S} = 0.5$ , что указывает на их связь – глубина протаивания СТС увеличивается с возрастанием весенней температуры воздуха.



Рис. 4. Динамика NDSI за период 2000–2022 гг.: *a* – на площадке с факельной установкой Уренгойского месторождения и на метеостанции "Уренгой"; *б* – на площадке с факельной установкой Восточно-Таркосалинского месторождения и на метеостанции "Тарко-Сале".

Коэффициент корреляции  $r_{\rm S}$  между средней температурой воздуха за 1–16 мая и NDSI на метеостанции "Уренгой" равен –0.732. Связь между исследуемыми признаками – обратная, сила связи высокая. Следовательно, индекс NDSI может применяться для оценки продолжительности залегания снежного покрова и раннего снеготаяния и косвенно – при изучении глубины CTC.

В результате расчета NDSI установлено, что на метеостанции "Уренгой" в даты, близкие к 16 мая, наблюдалось отсутствие снежного покрова в 5 случаях – 2003, 2011, 2015, 2020 и 2021 гг. На техногенной площадке № 1 с ФУ отсутствие снежного покрова наблюдалось в 13 случаях: 2005–2008, 2010, 2011, 2013–2015, 2018 и 2020–2022 гг. В указанные годы произошло более раннее снеготаяние по сравнению с 2000–2002 гг. Показаны отрицательные тренды NDSI на площадке с метеостанцией и на площадке № 1 (рис. 4, *a*). Значения NDSI на метеостанции "Уренгой" примерно за 20-летний период изменяются от 0.8 (15.05.2001 г.) до -0.3 и -0.2 (14.05.2020 г. и 16.06.2021 г. соответственно). Значения NDSI на техногенной площадке № 1 за 20-летний период изменяются от 0.8 (15.05.2000 г.) до -0.44 (14.05.2020 г.) (см. рис. 4, *a*).

Установлено, что на метеостанции "Тарко-Сале" с 2000 по 2022 гг. за исключением 2010, 2011, 2020, 2021 гг. в даты, близкие к 11 мая, лежал снег. На техногенной площадке № 2 отсутствие снежного покрова установлено в 2010, 2011, 2013, 2018-2022 гг. (см. рис. 4, б). Наблюдается общая тенденция снижения NDSI (отрицательные тренды на рис. 4, б) как на техногенной площадке № 2, так и на площадке с метеостанцией "Тарко-Сале". Индекс NDSI на площадке с метеостанцией изменялся от 0.7 (даты, приближенные к 11 мая в 2000-2009 гг.) до -0.16 (09.05.2020 г). На техногенной площадке № 2 за 20-летний период индекс NDSI изменился от -0.5 (09.05.2020 г. и 10.05.2021 г.) до 0.7 (11.05.2000 г.) (см. рис. 4, б).

На метеостанции "Уренгой" [25, 26] средняя за период 1-16 мая температура выше 0 °С была в 2011, 2014, 2015 и 2020-2022 гг. (рис. 5, *a*),



Рис. 5. Динамика средней температуры воздуха за выбранные даты мая ежегодно с 2006 по 2022 гг. на метеостанциях: *a* – "Уренгой" с 1 по 16 мая; б – "Тарко-Сале" с 1 по 11 мая.



Рис. 6. Участки Уренгойского и Восточно-Таркосалинского месторождений с зонами теплового воздействия факельных установок: *a* – картосхема температуры поверхности Уренгойского месторождения в результате дешифрирования КС Landsat-8 за 29.03.2021 г.; *в* – картосхема температуры поверхности Восточно-Таркосалинского месторождения в результате дешифрирования КС Landsat-8 за 18.02.2021 г.; *б* и *г* – снимки поверхности Земли [33].

что объясняет раннее таяние снега в эти годы, как было сказано выше. Наблюдается общая тенденция повышения средней температуры воздуха за 1–16 мая (см. рис. 5, *a*). Варьирование температуры происходит в диапазоне от -7 °C в 2007 г. до 4 °C в 2020 г.

На метеостанции "Тарко-Сале" [31, 32] средняя за период 01-11 мая температура выше 0 °С была в 2011, 2014-2015, 2019-2022 гг. (см. рис. 5, б), что объясняет раннее таяние снега в эти годы. Общий тренд температуры положительный. Средняя за период 01-11 мая температура варьирует от (-4.5)-(-5) °С в 2007, 2009, 2018 гг. до 4.6 °С в 2020 г.

Полученные расчеты подтверждаются данными из работы [3]. Так, продолжительность залегания снежного покрова зимой 2018–2019 гг. в среднем по России оказалась значительно меньше климатической нормы, что объясняется аномально высокими температурами воздуха.

В результате дешифрирования снимка Landsat-8 за 29.03.2021 г. на территории Уренгойского месторождения выявлена зона теплового воздействия радиусом 243 м (рис. 6, *a*). Температура участка с ФУ составила 20 °С, тогда как температура поверхности Земли без ФУ – (-15)–(-14) °С. На 21.04.2021 г. температура участка с ФУ составила 30 °С, тогда как на удалении 257 м от факела она равна –7.4 °С. На 17.06.2021 г. температура участка с ФУ максимальная (65 °С), а на расстоянии 257 м от ФУ температура составила 24 °С.

В результате дешифрирования Landsat-8 на территории Восточно-Таркосалинского месторождения выявлена зона теплового воздействия наибольшего радиуса 399 м (см. рис. 6, *в*). Температура пикселя с ФУ составила –2 °С, тогда как температура поверхности Земли без ФУ – (-36) °С. На рис 6, б и *г* детально видны производственные объекты с ФУ [33].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что в 5 случаях из 23 наблюдаемых лет и в 4 случаях из 23 лет выявлено аномально раннее снеготаяние на метеостанциях "Уренгой" и "Тарко-Сале" соответственно. В результате расчета индекса NDSI установлено, что на метеостанции "Уренгой" в даты, близкие к 16 мая, наблюдалось отсутствие снежного покрова в 2003, 2011, 2015, 2020 и 2021 гг. Выявлено, что на метеостанции "Тарко-Сале" в даты, близкие к 11 мая, не было снежного покрова в 2010-2011, 2020-2021 гг. Не было снежного покрова на техногенных площадках Уренгойского месторождения в 13 случаях из 23 лет и на Восточно-Таркосалинском месторождении в 8 случаях из 23 лет. На техногенной площадке № 1 с ФУ отсутствие снежного покрова наблюдалось в 13 случаях: 2005-2008, 2010, 2011, 2013-2015, 2018 и 2020-2022 гг. В эти годы было более раннее снеготаяние по сравнению с 2000-2002 гг. На техногенной площадке № 2 не было снежного покрова в 2010-2011, 2013, 2018-2022 гг.

Установлена отрицательная слабая взаимосвязь повышения СТС с уменьшением NDSI, коэффициент корреляции  $r_{\rm S} = -0.3$ . В среднем, невысокие по сравнению с другими участками глубины СТС на R50b, УКПГ-15 и R50a, УКПГ-5 связаны с распространением промерзлых торфяных болот. Однако описанные тренды увеличения СТС на техногенных площадках Уренгойского месторождения подтверждают, что техногенез усиливает процессы растепления мерзлых толщ. Кроме того, на примере восьми стационарных площадок показано, что глубина протаивания зависит от характеристик литологии и растительного покрова арктических территорий.

Выявлено увеличение глубины протаивания СТС с увеличением весенней температуры воздуха. Существует обратная связь между средней за 1–16 мая температурой воздуха и индексом NDSI на метеостанции "Уренгой", коэффициент корреляции  $r_{\rm S}$  = -0.732. Следовательно, индекс NDSI может быть применен для прогнозной оценки продолжительности залегания снежного покрова и раннего снеготаяния и косвенно – при изучении глубины СТС, что важно при планировании и обустройстве нефтегазовых предприятий арктических территорий, где высок риск экологических катастроф из-за деформации многолетних грунтов. Представленная методика может быть применена для всех территорий распространения сплошной и прерывистой мерзлоты.

В целом, мониторинг продолжительности залегания снежного покрова и растепления ландшафтов целесообразно проводить с использованием методов дистанционного зондирования.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХН СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (НИОКТР 121031500046-7).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Жилина И. Ю. Потепление в Арктике: возможности и риски // Экономические и социальные проблемы России. 2021. № 1. С. 66-87.
- 2 Кокорин А. О. Изменение климата: обзор Пятого оценочного доклада МГЭИК. М.: WWF, 2014. 80 с.
- 3 Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.meteorf.gov.ru/press/releases/ 20628/ (дата обращения: 08.11.2022).
- 4 Долгополова Е. Н. Роль многолетнемерзлых пород в формировании гидролого-морфологического режима устьев рек водосбора Северного Ледовитого океана // Арктика: экология и экономика. 2018. № 4. С. 70-85.
- 5 Осокин Н. И., Сосновский А. В. Влияние термического сопротивления снежного покрова на устойчивость многолетнемерзлых пород // Криосфера Земли. 2016. Т. 20, № 3. С. 105–112.
- 6 Информационная записка с оценкой современного состояния недр в естественных и техногенно-нарушенных условиях территории Арктической зоны Российской Федерации, в т. ч. на геокриологических полигонах Марре-Сале и Воркутинский в 2020 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://geomonitoring.ru/download/pshz/ arctic2020.pdf (дата обращения: 08.11.2022).
- 7 Глобальное изменение климата и деградация вечной мералоты [Электронный ресурс]. Режим доступа: https:// ardexpert.ru/article/9099 (дата обращения: 08.11.2022).
- 8 Ваганова Н. А., Филимонов М. Ю. Долгосрочное прогнозирование влияния техногенных факторов на деградацию вечной мерзлоты в арктических и приполярных районах // Сб. докл. XII Междунар. конф. "Российские регионы в фокусе перемен", Екатеринбург, 16–18 ноября 2017. С. 463–473.
- 9 Циркумполярная сеть мониторинга активного слоя (CALM): долгосрочные наблюдения за климатически активным слоем – системой вечной мерзлоты [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www2.gwu.edu/~calm/data/ north.htm (дата обращения: 08.11.2022).
- 10 Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/ 295519843\_Kontinentalnaa\_mnogoletnaa\_merzlota (дата обращения: 08.11.2022).
- 11 Васильев А. А., Коростелев Ю. В., Москаленко Н. Г., Дубровин В. А. Измерения сезонно-талого слоя в Западной Сибири по программе CALM (база данных) // Криосфера Земли. 1998. Т. 2, № 3. С. 87–90.
- 12 Дроздов Д. С., Украинцева Н. Г., Царев А. М., Чекрыгина С. Н. Изменение температурного поля мерзлых пород и состояния геосистем на территории Уренгойского месторождения за последние 35 лет (1974–2008) // Криосфера Земли. 2010. Т. 14, № 1. С. 22–31.
- 13 Конищев В. Н. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5: География. 2009. № 4. С. 10–20.
- 14 Уренгойское нефтегазоконденсатное месторождение НГКМ [Электронный ресурс]. Режим доступа: https:// neftegaz.ru/tech-library/mestorozhdeniya/141626urengoyskoe-ngkm/ (дата обращения: 08.11.2022).

- 15 Государственный доклад "О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2018 году" [Электронный ресурс]. Режим доступа: https:// www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-gosudarstvennyydoklad-o-sostoyanii-i-ispolzovanii-mineralno-syrevyhresu.pdf (дата обращения: 08.11.2022).
- 16 Государственный доклад "О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году" [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.rosnedra.gov.ru/data/Files/File/7992.pdf (дата обращения: 08.11.2022).
- 17 Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Вып. 17. Тюменская и Омская области. СПб.: Гидрометиздат, 1998. 702 с.
- 18 Восточно-Таркосалинское нефтегазовое месторождение [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://neftegaz.ru/ tech-library/mestorozhdeniya/141749-vostochnotarkosalinskoe-neftegazovoe-mestorozhdenie-ngm/ (дата обращения: 08.11.2022).
- 19 Общая характеристика Восточно-Таркосалинского месторождения [Электронный ресурс]. Режим доступа: https:// sjes.esrae.ru/ru/article/view?id=475 (дата обращения: 08.11.2022).
- 20 Никифоренко Ю. Ю. Статистические методы в экологии и природопользовании: учеб. пособие. Краснодар: КубГАУ, 2019. 88 с.
- 21 Сухинин А. И., Воробьева М. В., Охоткина Е. А. Космический мониторинг снегового покрова Сибири по данным радиометра MODIS // Вестн. Сибирского гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева. 2011. № 4. С. 90-96.
- 22 Mapping snow cover using MODIS. Part I: The MODIS Instrument [Электронный ресурс]. Режим доступа: http:// www.csun.edu/climate/MODIS\_SnowCover\_ex2\_NDSI\_ L3\_with\_title.pdf (дата обращения: 08.11.2022).

- 23 Шошин Е. Л. Методы дистанционного измерения характеристик снежных покровов // Вестник кибернетики. 2021. № 1. С. 20-30.
- 24 Смирнов М. Б. Основы обработки экспериментальных данных. Курс лекций. Учеб. пособие для химиков и геохимиков. М.: ИНХС РАН, 2013.
- 25 Архив погоды в Уренгое [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=23453 (дата обращения: 08.11.2022).
- 26 Архив погоды в Уренгое [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://rp5.ru/Архив\_погоды\_в\_Уренгое (дата обращения: 08.11.2022).
- 27 Алексеева М. Н., Ященко И. Г. Алгоритм детектирования факельных установок по сжиганию попутного нефтяного газа и оценка объемов выбросов вредных веществ // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32, № 6. С. 490–494.
- 28 Тумель Н. В., Зотова Л. И. Геоэкология криолитозоны: учеб. пособие. М.: Географический факультет МГУ, 2014. 244 с.
- 29 Карта растительности М 1 : 16 000 000 // Атлас СССР. М.: Произв. картосостав. об-ние "Картография" ГУГК, 1984. С. 108-109.
- 30 Скважины Температура вечной мерзлоты [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://gtnpdatabase.org/ boreholes (дата обращения: 08.11.2022).
- 31 Архив погоды в Тарко-Сале [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.pogodaiklimat.ru/weather. php?id=23552 (дата обращения: 08.11.2022).
- 32 Архив погоды в Тарко-Сале [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://rp5.ru/Архив\_погоды\_в\_Тарко-Сале (дата обращения: 08.11.2022).
- 33 USGS EarthExplorer [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://earthexplorer.usgs.gov/ (дата обращения: 08.11.2022).