

Научная статья

УДК 528.88

DOI: 10.24412/2658-4255-2023-4-27-36



EDN: JXOUBF

Для цитирования:

Гурулев А.А., Орлов А.О., Казанцев В.А., Козлов А.К. [и др.] Обнаружение выхода газа в озере Шакшинское (Забайкальский край) дистанционными методами // Российская Арктика. 2023. Т. 5. № 4. С. 27-36. <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-4-27-36>

Получена: 27.10.2023
Принята: 07.11.2023
Опубликована: 13.11.2023

For citation:

Gurulev A.A., Orlov A.O., Kazantsev V.A., Kozlov A.K. [et al.] Detection of gas outlet in Lake Shakshinskoe (Trans-Baikal Territory) by remote methods. Russian Arctic, 2023, vol. 5, no. 4, pp. 27-36. (In Russian). <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-4-27-36>

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов



ОБНАРУЖЕНИЕ ВЫХОДА ГАЗА В ОЗЕРЕ ШАКШИНСКОЕ (ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ КРАЙ) ДИСТАНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

А.А. Гурулев* , А.О. Орлов , В.А. Казанцев , А.К. Козлов , С.В. Цыренжапов , Д.В. Середин 

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, г. Чита, Россия

E-mail: *lqc255@mail.ru

Аннотация

В работе приведены результаты спутниковых и подспутниковых измерений на оз. Шакшинское, расположенного в Забайкальском крае. С искусственных спутников Земли в тепловом инфракрасном диапазоне в центре водоема в 2021 году в летний период времени было зафиксировано повышенное значение температуры на 3°C...4°C поверхностных вод водоема площадью около 0,07 км² при общей площади озера 52 км². Данный эффект связывается с обильным выходом газа из недр Земли, активному выходу которого ранее препятствовали многолетнемерзлые породы. По всей видимости произошло их подтаивание. В марте 2022 г. были выполнены натурные измерения аномальной области водоема, которые заключались в изъятии проб газа из подо льда для проведения его химического анализа и в радиометрических исследованиях ледяного покрова в микроволновом диапазоне. Результаты показали, что данный газ содержит азот (до 98%), а также некоторые тяжелые углеводороды. Значение радиояркостной температуры ледяного покрова в сантиметровом диапазоне длин волн в данной области имело повышенное значение, что связывается с наличием большого количества газовых включений в ледяном покрове, которые захватывались в момент его становления.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, пресный ледяной покров, выход газа, микроволновый диапазон, инфракрасный диапазон, тепловое излучение

DETECTION OF GAS OUTLET IN LAKE SHAKSHINSKOE (TRANS-BAIKAL TERRITORY) BY REMOTE METHODS

A.A. Gurulev* , A.O. Orlov , V.A. Kazantsev , A.K. Kozlov , S.V. Tsyrenzhapov , D.V. Seredin 

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russia

E-mail: *lqc255@mail.ru

Abstract

The paper presents the results of satellite and subsatellite measurements on the lake. Shakshinskoe, located in the Trans-Baikal Territory. From artificial Earth satellites in the thermal infrared range in the center of the reservoir in 2021, in the summer period, an increased temperature value of 3°C ... 4°C of the surface waters of the reservoir with an area of about 0.07 km² with a total lake area of 52 km² was recorded. We associate this effect with the abundant release of gas from the bowels of the Earth, the active release of which was previously prevented by permafrost rocks. Apparently, their melting took place. In March 2022 full-scale measurements of the anomalous area of the reservoir were performed, which consisted of: taking gas samples from under the ice to conduct its chemical analysis; radiometric studies of the ice cover in the microwave range. The results showed that this gas contains nitrogen (up to 98%) and some heavy hydrocarbons. The value of the radio brightness temperature in the centimeter wavelength range of the ice

cover in this area was of increased importance, which is associated with the presence of an increased content of gas inclusions in the ice cover, which was captured at the time of its formation.

Keywords: remote sensing, fresh ice cover, gas output, microwave range, infrared range, thermal radiation

Введение

Как известно, в Арктике скорость повышения среднегодовой температуры, начиная с 70-х годов выше в два с половиной раза, чем глобальный рост температуры Земли [1]. Данный факт приводит к резкому уменьшению площади ледяного покрова в Арктической зоне. Так, за последние сорок лет его площадь (сентябрьский лед) уменьшилась на 40% [2]. Последствием этого явилось активное таяние многолетнемерзлых грунтов [3], которое приводит, в частности, к увеличению притока пресной воды в акваторию Обской губы [4]. Причем данный процесс наблюдается во всей Арктике [5].

Опреснение Обской губы связывается с деградацией многолетнемерзлых пород, которое происходит из-за глобального повышения температуры приземного слоя атмосферы. Следует отметить, что подводная мерзлота деградирует быстрее, чем многолетнемерзлые породы на суше [6]. В работе [7] показано, что в российской Арктике она деградирует со средней скоростью 14 см в год за последние 30 лет по данным полученным путем анализа кернов, изъятых из под вод северных морей. Скорость уменьшения мерзлоты в подводной части Арктической зоны превышает скорость таяния мерзлоты на суше почти в два раза. При деградации мерзлотных пород происходит выделение газов, в том числе и метана, в результате чего в Арктическом регионе концентрация метана в приземном слое атмосферы выше на 8%...10% [8], чем в других регионах Земли. В морях Восточной Арктики потоки метана в атмосферу соизмеримы с его потоками из акватории всего Мирового океана [9].

Газ может выходить из земных недр не обязательно постепенно - его выход может иметь взрывной характер. О данном факте говорит большое количество воронок, которые обнаружены на полуострове Ямал [10]. О том, что данный процесс носит взрывной характер, свидетельствует разброс грунта на некоторое расстояние от воронки [11]. Подтверждение выхода газа, в результате которого образуются воронки, было сделано в большом количестве исследований [12]. В этих исследованиях были выполнены натурные измерения по наличию углеводородных газов в средах, расположенных рядом с образовавшимися воронками.

Многолетнемерзлые породы Арктического региона простираются до 50° северной широты. Не является исключением и Забайкальский край, где существуют многолетнемерзлые и сезоннотальные почвенные покровы, данный факт отражен в работе [13]. В частности, в последнее время происходит деградация островковой мерзлоты и в городе Чита. Описанное явление в Забайкальском крае на данный момент активно не исследуется, что видно по отсутствию научных результатов по данной проблематике.

Материалы и методы

Для исследования деградации подводных многолетнемерзлых пород было выбрано озеро Шакшинское, расположенное в Забайкальском крае в 40 км от г. Чита. Глубина данного водоема достигает пяти метров. Водоем является пресным с минерализацией исходных вод около 120 мг/л и из-за относительно небольшой его глубины - эвтрофированным. Площадь водного зеркала составляет 52 км². В зимний период времени озеро покрывается ледяным покровом, толщина которого в весенний период времени может достигать 150 см, с минерализацией льда около 2 мг/кг в конце зимнего периода времени. Внутри данного объекта присутствуют различного рода примеси (фрагменты высшей водной растительности, газовые включения и т.п.), которые захватываются в момент его становления. Снежный покров на ледяном покрове не превышает 15 см в центре водоема.

В центре оз. Шакшинское наблюдается выход газа, который был обнаружен при исследовании мощности теплового излучения ледяного покрова данного водоема с самолета, что отражено в работе [14]. Затем за этим «пятном» активно велись наблюдения [15]. В августе 2021 года оно активизировалось и стало «проявляться» при различных методах исследований, в частности, на космических изображениях. Активизация выхода газа нами связывается с деградацией многолетнемерзлых пород, находящихся под дном озера.

Для исследования деградации мерзлоты под водоемом нами были проанализиро-

ваны спутниковые снимки в видимом диапазоне со спутников Landsat-8, Sentinel-2 и Канопус-В. Исследовались снимки в момент отсутствия ледяного покрова, т.е. в летнее время и ранней осенью. Видимый диапазон позволяет решать ряд задач, связанных с процессами, происходящими в водоеме, в частности, путем использования сканера цвета, можно регистрировать концентрацию хлорофилла [16], который также можно зафиксировать по космоснимкам на оз. Шакшинское. При выходе газа со дна озера будет наблюдаться изменение концентрации хлорофилла в данном месте, что фиксируется с помощью космоснимков в видимом диапазоне, даже после активной фазы газирования. Для анализа температуры водной поверхности озера использовался тепловой инфракрасный диапазон данных спутников. По мощности теплового излучения на длинах волн 10...14 мкм определяется температура поверхностного слоя воды в микронном слое. Для анализа наличия метана в атмосфере над водной поверхностью использовался ближний инфракрасный диапазон, находящийся в области длин волн 3...6 мкм.

Ледяной покров является индикатором состояния водного объекта. В течение времени своего существования он накапливает различного рода примеси из окружающей среды, как из атмосферы, так и из воды. Оптимальным методом дистанционного исследования представленного объекта является радиометрический метод в микроволновом диапазоне. Суть метода заключается в регистрации собственного теплового излучения, например, в сантиметровом диапазоне. Данное излучение формируется в слоях достаточно большой толщины пресного ледяного покрова, в отличие от миллиметрового диапазона, и таким образом можно определять включения внутри исследуемого объекта [17]. Так в работе [14] показано, что с помощью радиотеплового излучения ледяного покрова на оз. Шакшинское выявляются области выхода газовых включений и высшая водная растительность, вмороженная в лед.



Рисунок 1. Фотография радиометрического комплекса на длины волн 2,3 см, 3 см, 5,6 см, установленного на автомобиль

Для решения поставленной задачи мы использовали радиометрическую аппаратуру, установленную на автомобиль. Фотография установки показана на рисунке 1. Исследования были выполнены на длинах волн 2,3 см, 3 см и 5,6 см. Измерения выполнялись на вертикальной поляризации. Угол наблюдения составлял 45°. Калибровка приборов осуществлялась по отраженному от металлического листа излучению безоблачного неба и излучению эталона черного тела в этом диапазоне длин волн. Запись сигналов с радиометров осуществлялась на систему сбора данных фирмы «Agilent». В результате нами были выполнены трассовые записи радиояркостной температуры ледяного покрова, характеризующей мощность теплового излучения.

Для анализа газа выходящего с глубины водоема в зимний период времени, был осуществлен отбор проб 12 марта 2022 года по следующей методике. На глубину 2 метра от поверхности (верхнего слоя ледяного покрова) помещалась воронка с закрепленной на ней емкостью, заполненной водой. При выходе газа со дна водоема пузырь с газом поднимался вверх, попадал в воронку, а затем и в емкость, вытесняя из нее часть воды. Через сутки после установки для сбора подледного газа производилась выемка емкости на поверхность ледяного покрова. Взятие проб было выполнено непосредственно в области активного выхода газа (в области «пятна»), а также в местах, где по ранее выполненным исследованиям данного водоема происходил выход газа на поверхность воды в результате разложения органического вещества в донных отложениях. Затем пробы газа были направлены для газохроматографического анализа на 22 компонента в ООО ПГК «Сибгеоком» в г. Иркутск.

Результаты и их обсуждение

В результате анализа космических снимков оз. Шакшинское были получены следующие факты. В августе 2021 года на исследуемом водоеме на космоснимках в видимом диапазоне наблюдалось явление, похожее на выход газа (рис. 2а). Это явление было зафиксировано на изображениях в виде белого пятна в центре водоема, которое име-

ло форму «запятой». Ассоциация пятна на оз. Шакшинское с выходом газа, связана со схожестью изображений данного явления в морях. Например, с тем, что было обнаружено при выходе газа в Балтийском море в конце сентября 2022 года на трубопроводах «Северный поток» и «Северный поток-2» в результате чрезвычайного происшествия, во время которого произошла утечка газа в окружающую среду – на рисунке 2б.

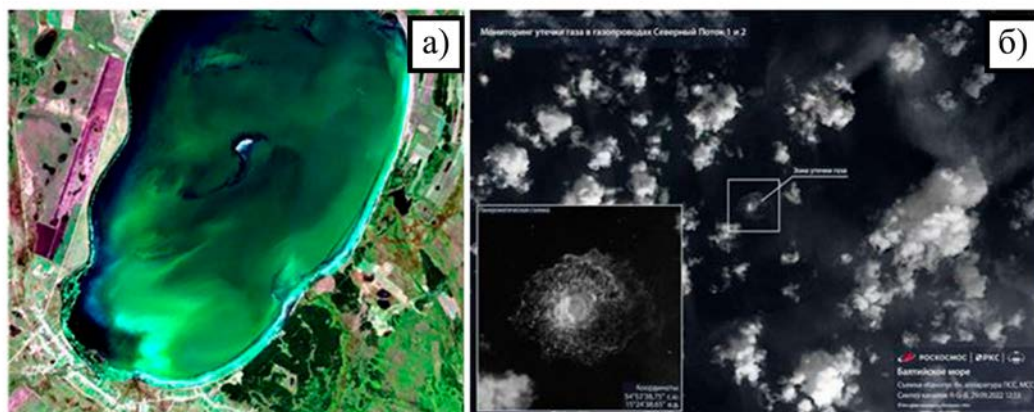


Рисунок 2. а) озеро Шакшинское. Спутник – Sentinel-2. Комбинированный RGB. 29 августа 2021 года; б) утечка газа из трубопровода "Северный поток". Спутник – "Канопус-В". 29 сентября 2022 года. Снимок опубликован в telegram-канале Госкорпорации «Роскосмос»¹

Следует отметить, что анализ снимков оз. Шакшинское за другие годы, в том числе и в 2022 и 2023 гг. не выявил эффекта такой интенсивности газоотделения, который был зафиксирован в августе 2021 года.

При разрушении ледяного покрова на исследуемом водоеме (май 2021 г.) первоначальное разрушение ледяного покрова наблюдалось вблизи «запятой», что показано на снимке, выполненном с космического аппарата «Канопус-В-ИК» в панхроматической съемочной системе (ПСС), в спектральном диапазоне 0,54...0,86 мкм 19 мая 2022 года (рисунок 3).

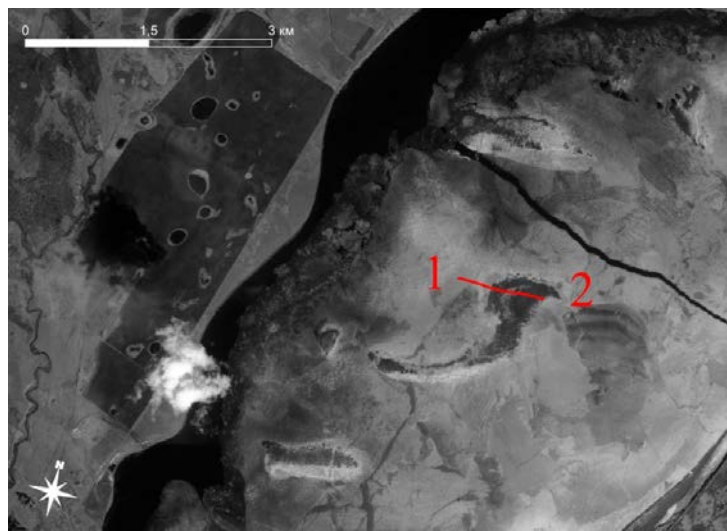


Рисунок 3. Космоснимок оз. Шакшинское в панхроматическом режиме. Дата: 19 мая 2022 год. 1-2 трасса для измерения мощности радиотеплового излучения

В результате наземных радиометрических исследований ледяного покрова оз. Шакшинское с использованием микроволновых радиометров было обнаружено повышение радиоярких температур в месте выхода газа в виде «запятой», что показано на рисунке 4 на дистанции от 300 м до 550 м. Трассовая запись была осуществлена по треку 1-2, показанному на рисунке 3.

¹ https://t.me/rosocosmos_gk/6920

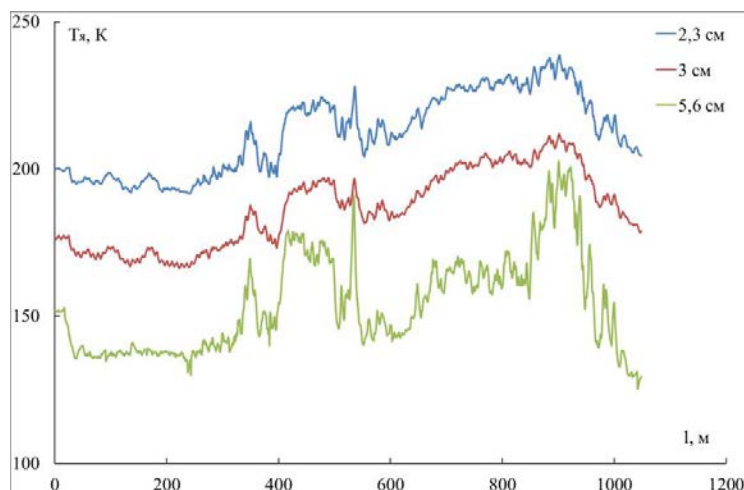


Рисунок 4. Трассовая запись радиоярких температур ($T_{я}$) на длинах волн 2,3 см, 3 см и 5,6 см через исследуемую область («запятая»). 17 марта 2022 г.

Как видно из приведенных графиков, существенных вариаций мощности радиотеплового излучения на дистанции 0...300 м практически не наблюдается. На этом участке ледяной покров не имеет ярко выраженных особенностей. На ледяном участке, где наблюдается «запятая», в ледяном покрове были визуально зафиксированы включения в виде пузырей и скопления органического вещества (вмерзшая в лед высшая водная растительность), которые и привели к существенному возрастанию радиоярких температур. Приращение $T_{я}$ достигает 20 К на длине волны электромагнитного излучения 2,3 см и 30 К для длины волны 5,6 см. Некоторое увеличение радиояркой температуры в районе 900 м по трассе можно объяснить накоплением газовых пузырей в ледяном покрове [18]. Иногда выход газа подо льдом может создать под ледяным покровом куполообразную структуру, возникающую при механических деформациях льда, которая ранее была обнаружена на исследуемом водоеме [19]. При измерении уровня водной поверхности озера до верхнего слоя льда (измерения осуществлялись в лунке) было зафиксировано повышенное значение данной величины, что может говорить о наличии отмеченной выше куполообразной структуры. Это показано на рисунке 5 на участке ~ 900 м. По всей видимости, в результате наличия напряженного состояния льда под действием куполообразного образования ледяного покрова, образовались волны течения во льду, которые и привели к повышению мощности теплового излучения участка ледяного покрова в сантиметровом диапазоне. Ранее, обнаружение волн течения в пресном ледяном покрове было осуществлено по радиолокационным снимкам [20].

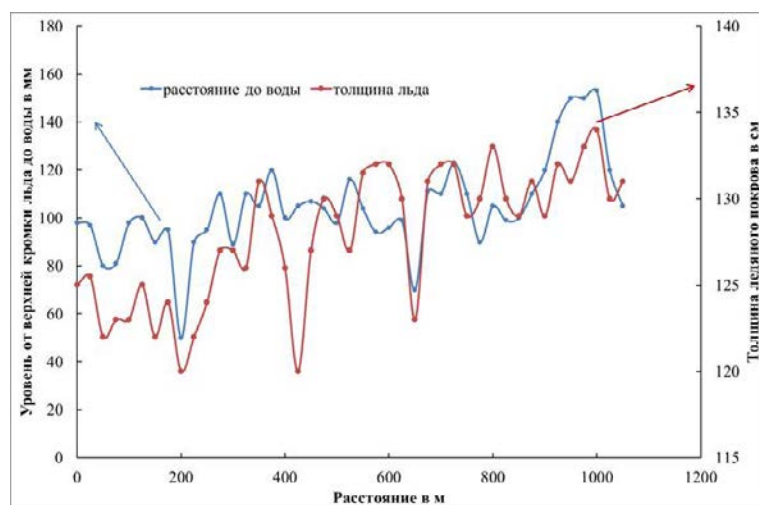


Рисунок 5. Изменение по трассе толщины ледяного покрова и уровня водной поверхности до верхнего слоя ледяного покрова. 16 марта 2022 г.

Следует отметить, что на месте «запятая» на ледяном покрове наблюдалось обильное присутствие высшей водной растительности вместе с корневой системой. Причиной её массового выброса на ледяную поверхность водоема мог быть кратковременный выброс газовой смеси со дна озера. Во время прорыва газа из недр

Земли корневая система водной растительности теряла сцепление с почвой и вместе с газом поднималась на поверхность озера. Так как этот процесс наблюдался перед началом ледостава, то во время становления ледяного покрова происходил захват данных образований льдом. При этом процессе и происходило увеличение температуры участка водного объекта в виде «запятой», которое и фиксировалось в тепловом инфракрасном диапазоне с космических аппаратов. Повышение температуры воды в исследуемой области в зимний период времени не наблюдалось. Такой вывод был сделан по прямым измерениям температуры воды, находящейся подо льдом, а также в лунке по толщине льда, значение которой приведено на рисунке 5. Имеющиеся изменения толщины льда связаны с естественными ее вариациями, а именно со значениями толщины снега на ледяном покрове. При большей толщине снега ее величина минимальна, даже при относительно небольших вариациях толщины снежного покрова и плотности снега на исследуемом участке водоема.

Активное выделение газа прекратилось, по данным космосъемки, в конце сентября 2021 года, однако сам процесс газирования не прекратился, что позволило взять пробы донного газа. В результате анализов проб были получены результаты, которые представлены в таблицах 1 и 2. Пробы под номерами 1, 2 и 3 соответствовали точкам изъятия газа вне участка «запятой», ближе к берегу.

Таблица 1.

Результаты газохроматографического анализа газа, об%

№ п/п	Дата отбора	Название пробы	Вид пробы	Объем пробы (см ³)	Дата анализа	Содержание компонента, об %				
						бензол	толуол	этилбензол	м,п-ксилол	о-ксилол
1	21.03.2022	1	Газ	3	29.03.2022	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	1,36*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷
2	21.03.2022	2	Газ	2	29.03.2022	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷
3	21.03.2022	3	Газ	3	29.03.2022	<1*10 ⁻⁷	1,09*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	1,2*10 ⁻⁷
4	21.03.2022	4	Газ	5	29.03.2022	1,21*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷
Показатель точности ±Δ, объемная доля %						-	-	-	-	-
НД на метод испытания						ПНД Ф 13.1:3.68-09				

Таблица 2.

Результаты газохроматографического анализа газа, об%

№ п/п	Дата отбора	Название пробы	Вид пробы	Объем пробы (см ³)	Дата анализа	Содержание компонента, об %																
						He Гелий	H ₂ Водород	CO ₂ Ди-оксид угле-рода	O ₂ Кис-ло-род	N ₂ Азот	CH ₄ Метан	C ₂ H ₆ Этан	C ₂ H ₄ Этилен	C ₃ H ₈ Пропан	C ₃ H ₆ Пропи-лен	iC ₄ H ₁₀ Изобутан	nC ₄ H ₁₀ Н-бутан	C ₄ H ₁₀ Бутилен	iC ₅ H ₁₂ Изопен-тан	nC ₅ H ₁₂ Н-пентан	C ₆ H ₁₄ Гексан	
1	21.03.22	1	Газ	3	29.03.22	<0,004	2,94*10 ⁻¹	<0,01	3,25	77,37	17,59	7,39*10 ⁻⁷	1,37	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	3,57*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	6,64*10 ⁻⁷	1,4*10 ⁻⁶	
2	21.03.22	2	Газ	2	29.03.22	<0,004	<0,004	<0,01	24,31	75,54	<1*10 ⁻⁶	6,31*10 ⁻⁶	3,2*10 ⁻³	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	2,75*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<0,2	<1*10 ⁻⁷	6,53*10 ⁻⁷	1,11*10 ⁻⁶	
3	21.03.22	3	Газ	3	29.03.22	<0,004	<0,004	<0,01	26,53	73,36	<1*10 ⁻⁶	7,63*10 ⁻⁶	3,08*10 ⁻³	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	5*10 ⁻⁷	<0,2	<1*10 ⁻⁷	1,39*10 ⁻⁶	1,25*10 ⁻⁶	
4	21.03.22	4	Газ	5	29.03.22	<0,004	<0,004	<0,01	1,2	98,65	<1*10 ⁻⁶	7*10 ⁻⁶	2,77*10 ⁻⁴	9,54*10 ⁻⁷	2,47*10 ⁻⁵	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<0,2	3,57*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	
Показатель точности ±Δ, объемная доля %						-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
НД на метод испытаний						СТО ИГ -026-2011																

Как видно из полученных данных, в особой точке на оз. Шакшинское в составе газа наблюдается аномально высокое значение концентрации азота ~98% и некоторых тяжелых углеводородов. Для проверки надежности данных нами были взяты повторные пробы газа по аналогичной методике в апреле 2022 года. Результаты были практически аналогичными предыдущим. Уровень азота в пробах был также высок (85%...93%). В ближнем инфракрасном диапазоне в области «запятой» было также отмечено увеличение уровня содержания метана в августе 2021 года. В конце сентября данного года метан над водной поверхностью уже отсутствовал, т.е. его концентрация уменьшилась настолько, что сенсоры, находящиеся на космических аппаратах не зафиксировали его присутствия.

Причиной высокого содержания азота и углеродистых соединений в газовых пробах исследуемого участка озера, по всей видимости, являются не химические про-

цессы, происходящие внутри донных осадков озера (разложение органики), а выход газа из недр Земли. В этом месте может быть расположено месторождение ископаемого топлива (уголь, нефть, природный газ и т.п.).

В районе Ивано-Арахлейских озер существуют многолетнемерзлые породы. Так вблизи населенного пункта Преображенка, находящегося в 15 км от исследуемого участка оз. Шакшинское были исследованы данные породы, что показано в статье [21]. Под действием климатических изменений, а именно потепления климата, по всей видимости, произошла деградация подводной мерзлоты и накопившийся под ней газ в августе 2021 года вышел наружу, что и было зафиксировано с помощью космического мониторинга Земли в видимом и инфракрасном диапазонах.

Выводы

Таким образом, в Забайкальском крае, было зафиксировано разрушение многолетнемерзлых пород находящихся под водной толщей озера Шакшинское.

1. Деградация мерзлоты фиксировалась по космоснимкам в видимом и инфракрасном диапазонах при выходе газовой смеси на водную поверхность водоема.

2. Пресный ледяной покров является индикатором состояния водного объекта и отражает процессы, происходящие внутри водоема.

3. Микроволновый радиометрический метод исследования пресных ледяных покровов является эффективным, так как по мощности теплового излучения можно судить о свойствах ледяного покрова и судить о наличии различного рода примесей в нем.

Список литературы:

1. Семенов В.А. Современные исследования климата Арктики: прогресс, смена концепций, актуальные задачи // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 21–33. DOI: 10.31857/S0002351521010119.
2. Semenov V.A., Martin T., Behrens L.K., Latif M. Arctic sea ice area in CMIP3 and CMIP5 climate model ensembles – variability and change // The Cryosphere Discuss. 2015. V. 9. P. 1077–1131. DOI: 10.5194/tcd-9-1077-2015.
3. Васильев А.А., Гравис А.Г., Губарьков А.А., Дроздов Д.С., Коростелев Ю.В., Малкова Г.В., Облогов Г.Е., Пономарева О.Е., Садуртдинов М.Р., Стрелецкая И.Д., Стрелецкий Д.А., Устинова Е.В., Широков Р.С. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в западном секторе российской Арктики // Криосфера Земли. 2020. Т. 24. № 2. С. 15–30. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30).
4. Тихонов В.В., Романов А.Н., Хвостов И.В., Алексеева Т.А., Синицкий А.И., Тихонова М.В., Шарков Е.А., Комарова Н.Ю. Межгодовые вариации собственного микроволнового излучения Обской Губы в период ледостава и их связь с гидрологическими и климатическими изменениями региона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 185–199. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-185-199.
5. Kokelj S.V., Kokoszka J., van der Sluijs J., Rudy A.C.A., Tunnicliffe J., Shakil S., Tank S.E., Zolkos S. Thawdriven mass wasting couples slopes with downstream systems, and effects propagate through Arctic drainage networks // The Cryosphere. 2021. V. 15. No. 7. P. 3059–3081. DOI: 10.5194/tc-15-3059-2021.
6. Paulla C.K., Dallimore S.R., Jinc Y.K., Caressa D.W., Lundstena E., Gwiazdaa R., Andersona K., Clarked J.H., Youngblute S., Mellingf H. Rapid seafloor changes associated with the degradation of Arctic submarine permafrost // PNAS. 2022. V. 119. No. 12. P. e2119105119. DOI: 10.1073/pnas.2119105119.
7. Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O., Sergienko V., Lobkovsky L., Dudarev O., Tumskey V., Grigoriev M., Mazurov A., Salyuk A., Ananiev R., Koshurnikov A., Kosmach D., Charkin A., Dmitrevsky N., Karnaukh V., Gunar A., Meluzov A., Chernykh D. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf // Nature communications. 2017. V. 8. P. 15872. DOI: 10.1038/ncomms15872.
8. Космач Д.А., Сергиенко В.И., Дударев О.В., Куриленко А.В., Густафссон О., Семилетов И.П., Шахова Н.Е. Метан в поверхностных водах окраинных морей северной Евразии // Доклады Академии наук. 2015. Т. 465. № 4. С. 441. DOI: 10.7868/S0869565215340149.
9. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Kosmach D., Leifer I., Rekant P. Geochemical and geophysical evidence of methane release over the east siberian Arctic shelf // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2010. Т. 115. № 8. С. 08007. DOI: 10.1029/2009JC005602.

10. Хименков А.Н., Сергеев Д.О., Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б. Взрывные процессы в области распространения многолетнемерзлых пород - новый вид геокриологической опасности // Геозкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2019. № 6. С. 30-41. DOI: 10.31857/S0869-78092019630-41.
11. Оленченко В.В., Сеницкий А.И., Антонов Е.Ю., Ельцов И.Н., Кушнаренко О.Н., Плотников А.Е., Потапов В.В., Эпов М.И. Результаты геофизических исследований территории геологического новообразования "Ямальский кратер" // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. № 4. С. 94–106.
12. Кизяков А.И., Сонюшкин А.В., Лейбман М.О., Зимин М.В., Хомутов А.В. Геоморфологические условия образования воронки газового выброса и динамика этой формы на центральном Ямале // Криосфера Земли. 2015. Т. 19. № 2. С. 15-25.
13. Трофимова И.Е., Балыбина А.С. Географические закономерности летнего термического режима почв в Забайкалье // География и природные ресурсы. 2017. № 4. С. 105-113. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-4(105-113).
14. Бордонский Г.С., Крылов С.Д., Поляков С.В. Особенности радиояркости пресного ледяного покрова, содержащего газоподобные включения // Исследование Земли из космоса. 1992. № 5. С. 13-21.
15. Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Различие картин радарных и радиометрических измерений (на примере ледяного покрова эвтрофированного озера) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 228-240
16. Копелевич О.В., Шеберстов С.В. Оценка по спутниковым данным межгодовых и сезонных изменений температуры поверхности атлантического океана и концентрации хлорофилла в поверхностном слое в период 1998-2008 гг // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 238-247.
17. Du J., Kimball J.S., Duguay C., Kim Y., Watts J.D. Satellite microwave assessment of northern hemisphere Lake ice phenology from 2002 to 2015 // Cryosphere. 2017. Vol. 11. P. 47-63. DOI: 10.5194/tc-11-47-2017.
18. Бордонский Г.С., Золотарева Л.Н., Крылов С.Д. Оценка пространственного распределения высшей водной растительности по радиотепловому излучению ледяного покрова в СВЧ-диапазоне // Исследование Земли из космоса. 1994. № 3. С. 96-102.
19. Бордонский Г.С., Крылов С.Д., Гурулев А.А., Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Особенности структуры пропарины в ледяном покрове, образованной выходами газа // Лёд и снег. 2018. Т. 58. № 3. С. 405-416.
20. Гурулев А.А., Бордонский Г.С., Орлов А.О. Регистрация автоволн пластического течения в ледяных структурах при радиолокационных измерениях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 222-229.
21. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Чижова Ю.Н., Станиловская Ю.В. Миграционные бугры пучения в криолитозоне Восточной Сибири и Дальнего Востока // Инженерная геология. 2014. № 1. С. 40-64.

References:

1. Semenov V.A. Sovremennyye issledovaniya klimata Arktiki: progress, smena koncepcij, aktual'nye zadachi [Modern studies of the Arctic climate: progress, change of concepts, actual tasks]. Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana. [Izvestiya RAS. Physics of the atmosphere and ocean], 2021, vol. 57, no. 1, pp. 21–33. (In Russian). DOI: 10.31857/S0002351521010119.
2. Semenov V.A., Martin T., Behrens L.K., Latif M. Arctic sea ice area in CMIP3 and CMIP5 climate model ensembles – variability and change. The Cryosphere Discuss, 2015, vol. 9, pp. 1077–1131. DOI: 10.5194/tcd-9-1077-2015.
3. Vasil'ev A.A., Gravis A.G., Gubar'kov A.A., Drozdov D.S., Korostelev YU.V., Malkova G.V., Oblogov G.E., Ponomareva O.E., Sadurtdinov M.R., Streleckaya I.D., Streleckij D.A., Ustinova E.V., SHirokov R.S. Degradaciya merzloty: rezul'taty mnogoletnego geokriologicheskogo monitoringa v zapadnom sektore rossijskoj Arktiki [Permafrost degradation: results of long-term geocryological monitoring in the western sector of the Russian Arctic]. Kriosfera Zemli [Cryosphere of the Earth], 2020, vol. 24, no. 2, pp. 15-30. (In Russian). DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30).
4. Tihonov V.V., Romanov A.N., Hvostov I.V., Alekseeva T.A., Sinickij A.I., Tihonova M.V., SHarkov E.A., Komarova N.YU. Mezhhodovyye variacii sobstvennogo mikrovolnovogo izlucheniya Obskoj Guby v period ledostava i ih svyaz' s gidrologicheskimi i klimaticheskimi

- izmeneniyami regiona [Interannual variations of own microwave radiation of the Gulf of Ob during the ice age and their relationship with hydrological and climatic changes in the region]. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2021, vol. 18, no. 6, pp. 185-199. (In Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-185-199.
5. Kokelj S.V., Kokoszka J., van der Sluijs J., Rudy A.C.A., Tunnicliffe J., Shakil S., Tank S.E., Zolkos S. Thawdriven mass wasting couples slopes with downstream systems, and effects propagate through Arctic drainage networks. *The Cryosphere*, 2021, vol. 15, no. 7, pp. 3059–3081. DOI: 10.5194/tc-15-3059-2021.
 6. Paulla C.K., Dallimore S.R., Jinc Y.K., Caressa D.W., Lundstena E., Gwiazda R., Andersona K., Clarked J.H., Youngblute S., Mellingf H. Rapid seafloor changes associated with the degradation of Arctic submarine permafrost. *PNAS*, 2022, vol. 119, no. 12, pp. e2119105119. DOI: 10.1073/pnas.2119105119.
 7. Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O., Sergienko V., Lobkovsky L., Dudarev O., Tumskoy V., Grigoriev M., Mazurov A., Salyuk A., Ananiev R., Koshurnikov A., Kosmach D., Charkin A., Dmitrevsky N., Karnaukh V., Gunar A., Meluzov A., Chernykh D. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf. *Nature communications*, 2017, vol. 8, pp. 15872. DOI: 10.1038/ncomms15872.
 8. Kosmach D.A., Sergienko V.I., Dudarev O.V., Kurilenko A.V., Gustafsson O., Semiletov I.P., SHahova N.E. Metan v poverhnostnyh vodah okrainnyh morej severnoj Evrazii [Methane in the surface waters of the marginal seas of northern Eurasia]. *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], 2015, vol. 465, no 4, pp. 441. (In Russian). DOI: 10.7868/S0869565215340149.
 9. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Kosmach D., Leifer I., Rekant P. Geochemical and geophysical evidence of methane release over the east siberian Arctic shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, vol. 115, no 8, pp. 08007. DOI 10.1029/2009JC005602.
 10. Himenkov A.N., Sergeev D.O., Vlasov A.N., Volkov-Bogorodskij D.B. Vzryvnye processy v oblasti rasprostraneniya mnogoletnemerzlyh porod - novyj vid geokriologicheskoy opasnosti [Explosive processes in the field of permafrost propagation - a new type of geocryological hazard]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya* [Geocology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology], 2019, no. 6, pp. 30-41. (In Russian). DOI: 10.31857/S0869-78092019630-41.
 11. Olenchenko V.V., Sinickij A.I., Antonov E.YU., El'cov I.N., Kushnarenko O.N., Plotnikov A.E., Potapov V.V., Eпов M.I. Rezul'taty geofizicheskikh issledovanij territorii geologicheskogo novoobrazovaniya "YAmal'skij krater" [Results of geophysical studies of the territory of the geological formation "Yamal crater"]. *Kriosfera Zemli* [Cryosphere of the Earth], 2015, vol. XIX, no. 4, pp. 94–106. (In Russian).
 12. Kizyakov A.I., Sonyushkin A.V., Lejbman M.O., Zimin M.V., Homutov A.V. Geomorfologicheskie usloviya obrazovaniya voronki gazovogo vybrosa i dinamika etoj formy na central'nom YAmale [Geomorphological conditions for the formation of a gas emission funnel and the dynamics of this form in central Yamal]. *Kriosfera Zemli* [Cryosphere of the Earth], 2015, vol. 19, no. 2, pp. 15-25. (In Russian).
 13. Trofimova I.E., Balybina A.S. Geograficheskie zakonomernosti letnego termicheskogo rezhima pochv v Zabajkal'e [Geographical patterns of the summer thermal regime of soils in Transbaikalia]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and natural resources], 2017, no. 4, pp. 105-113. (in Russian). DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-4(105-113).
 14. Bordonsky G.S., Krylov S.D., Polyakov S.V. Osobennosti radioyarkosti presnogo ledyanogo pokrova, sodержashchego gazovye vklyucheniya [Features of radio brightness of fresh ice cover containing gas inclusions]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Exploration of the Earth from space], 1992, no. 5, pp. 13-21. (in Russian).
 15. Bordonskij G.S., Gurulev A.A., Orlov A.O., Cyrenzhapov S.V. Razlichie kartin radarnykh i radiometricheskikh izmerenij (na primere ledyanogo pokrova evtrofirovannogo ozera) [The difference between radar and radiometric measurements (on the example of the ice cover of a eutrophied lake)]. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2014, vol. 11, no. 2, pp. 228-240. (in Russian).
 16. Kopelevich O.V., SHeberstov S.V. Ocenka po sputnikovym dannym mezhgodovykh i sezonnykh izmenenij temperatury poverhnosti atlanticheskogo okeana i koncentracii hlorofilla v poverhnostnom sloe v period 1998-2008 gg [Estimation by satellite data of interannual and seasonal changes in the Atlantic Ocean surface temperature and chlorophyll concentration in the surface layer in the period 1998-2008]. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote

- sensing of the Earth from space], 2010, vol. 7, no. 1, pp. 238-247. (in Russian).
17. Du J., Kimball J.S., Duguay C., Kim Y., Watts J.D. Satellite microwave assessment of northern hemisphere Lake ice phenology from 2002 to 2015. *Cryosphere*, 2017, vol. 11, pp. 47-63. DOI: 10.5194/tc-11-47-2017.
 18. Bordonskij G.S., Zolotareva L.N., Krylov S.D. Ocenka prostranstvennogo raspredeleniya vysshej vodnoj rastitel'nosti po radioteplovomu izluchenyu ledyanogo pokrova v SVCH-diapazone [Assessment of the spatial distribution of higher aquatic vegetation by radiothermal radiation of the ice cover in the microwave range]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Earth exploration from space], 1994, no. 3, pp. 96-102. (in Russian).
 19. Bordonskij G.S., Krylov S.D., Gurulev A.A., Orlov A.O., Cyrenzhapov S.V. Osobennosti struktury propariny v ledyanom pokrove, obrazovannoj vyhodami gaza [Features of the structure of the proparina in the ice cover formed by gas outlets]. *Lyod i sneg* [Ice and snow], 2018, vol. 58, no. 3, pp. 405-416. (in Russian).
 20. Gurulev A.A., Bordonskij G.S., Orlov A.O. Registraciya avtovoln plasticheskogo techeniya v ledyanyh strukturah pri radiolokacionnyh izmereniyah [Registration of autowaves of plastic flow in ice structures with radar measurements]. *Sovremennyye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2023, vol. 20, no. 3, pp. 222-229. (in Russian).
 21. Vasil'chuk YU.K., Budanceva N.A., Vasil'chuk A.K., Chizhova YU.N., Stanilovskaya YU.V. Migracionnye bugry pucheniya v kriolitozone Vostochnoj Sibiri i Dal'nego Vostoka [Migration heave mounds in the cryolithozones of Eastern Siberia and the Far East]. *Inzhenernaya geologiya* [Engineering geology], 2014, no. 1, pp. 40-64. (in Russian).