

Изучение динамики термокарстовых озёр в районе Ямбургского месторождения по данным спутников Landsat

С. Г. Корниенко

Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, 119333, Россия

E-mail: spaceakm2@ogri.ru

На основе данных спутников Landsat за период с 1988 по 2019 г. охарактеризованы доминирующие тенденции изменения суммарной площади водоёмов (СПВ) на участках более ранней (с 1984 г.) и более поздней (после 1988 г.) разработки Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения (Тазовский п-ов), расположенного в тундровой зоне со сплошным распространением многолетнемёрзлых пород. Для выделения водоёмов, представленных преимущественно термокарстовыми озёрами, использовался индекс MNDWI (*англ.* Modified Normalized Difference Water Index). Анализ проводился на основе параметра, характеризующего отношение СПВ на участках техногенной нагрузки к СПВ фоновой (без технических объектов) области, что позволяет существенно повысить чувствительность мультивременного анализа изменений СПВ, связанных с возможным антропогенным воздействием за счёт снижения влияния межгодовых различий количества осадков и климатических изменений. На участке более длительной разработки и более плотного размещения технических объектов выявлены значимые тренды, характеризующие сокращение СПВ на 19,3 % (дренирования озёр), что может быть связано с активизацией процессов эрозии, техногенного оврагообразования, изменений условий поверхностного стока при строительстве объектов, а также с формированием локального микроклимата. На участке более позднего освоения и меньшей плотности размещения объектов тренд сокращения СПВ на 7,0 % незначим и соизмерим с изменениями площади водоёмов фоновой области, характеризующими погрешность методики. Поскольку динамика термокарстовых озёр считается одним из индикаторов геоэкологических условий, предлагаемая методика анализа изменений СПВ может быть использована при изучении изменений состояния мерзлоты, в том числе связанных с влиянием антропогенных факторов.

Ключевые слова: антропогенное воздействие, дистанционное зондирование, криогенные ландшафты, суммарная площадь водоёмов, термокарстовые озёра, доминирующие тренды, тундра, Ямбургское месторождение

Одобрена к печати: 06.09.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-246-260

Введение

Водоёмы в районах сплошного распространения многолетнемёрзлых пород (ММП) и высокой льдистости грунтов, представленные в основном озёрами термокарстового происхождения, занимают значительные площади и относятся к числу важнейших природных компонентов, характеризующих особенности и состояние криогенных ландшафтов. Поскольку термокарстовые озёра формируются в результате вытаявания подземных льдов и растепления высокольдистых грунтов, предпринимались многочисленные попытки связать морфометрические характеристики озёр с современным потеплением климата и особенностями криогенных ландшафтов, в частности на основе анализа данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (Елсаков, Марушак, 2011; Кравцова, Родионова, 2016; Полищук и др., 2017; Пшеничников, 2021; Тарасенко, 2013; Carroll, Loboda, 2017; Ding et al., 2022; Nitze et al., 2017; Olthof et al., 2015; Saruulzaya et al., 2016; Veremeeva et al., 2021). В отношении влияния климата результаты, полученные различными исследователями, достаточно противоречивы, но преобладает мнение, что глобальное потепление приводит к увеличению площади и количества озёр в районах сплошного распространения мерзлоты и к уменьшению этих показателей в районах прерывистой мерзлоты (Ding et al., 2022; Olthof et al., 2015). Влияние антропогенных факторов на динамику термокарстовых озёр исследовалось в меньшей степени, хотя известно, что строительство дорог, промышленных и инфраструктурных объектов может

изменить поверхностный сток и, соответственно, гидрологические и геокриологические условия в районах их расположения (Кравцова, Родионова, 2016; Санников, 2016; Bolshaniik, Mukhamedyanov, 2019). Проблема доказательства связи морфометрических характеристик водоёмов в криолитозоне с климатическим трендом и/или антропогенным воздействием носит методический характер и обусловлена в первую очередь существенными межгодовыми различиями времени схода паводковых вод и количества атмосферных осадков (Корниенко, 2016; Тарасенко, 2013; Olthof et al., 2015). Тем не менее, поскольку изменение гидрологических условий, в частности в районах расположения нефтегазовых объектов, может быть связано с трансформацией мерзлоты и активизацией опасных геокриологических процессов (термокарст, термоэрозия, морозное пучение, подтопление, заболачивание и др.), проблема оценки динамики термокарстовых озёр как индикатора антропогенного воздействия остаётся актуальной.

Цель исследований — на основе данных спутников Landsat охарактеризовать доминирующие тенденции изменения площади термокарстовых озёр в районе Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ), в том числе связанные с возможным антропогенным воздействием.

Характеристика района исследований

Территория Ямбургского НГКМ расположена в центральной части Тазовского п-ова, в бассейне р. Пойловояха, и относится к подзоне субарктических южных тундр со сплошным распространением ММП мощностью 300–400 м. Карта-схема расположения района и участков исследований приведена на рис. 1.

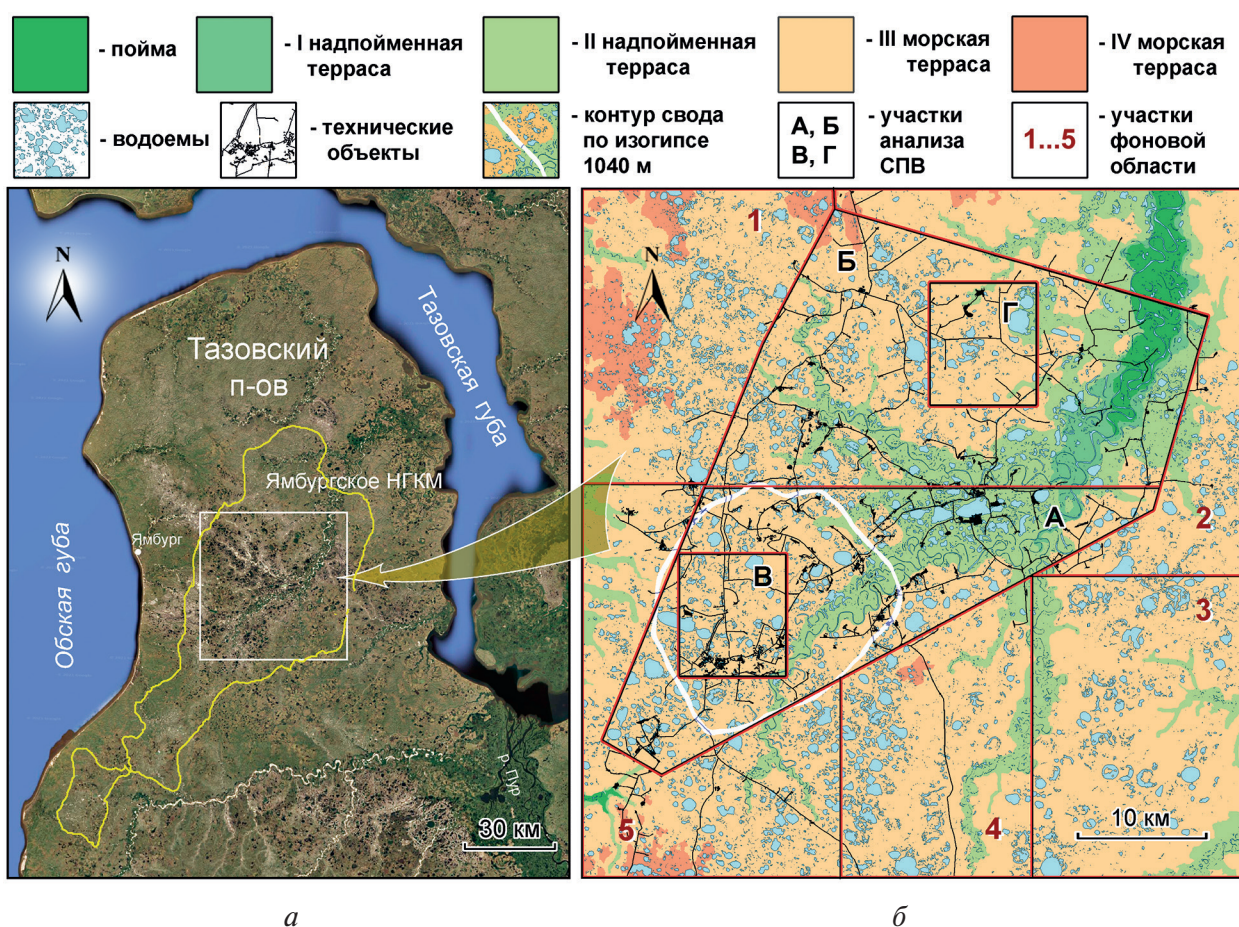


Рис. 1. Карта-схема расположения Ямбургского НГКМ, района исследований на территории Тазовского п-ова (а) и участков анализа изменений суммарной площади водоёмов (СПВ) (б)

Рельеф территории месторождения представлен Зырянской и Казанцевской морскими равнинами, а также эрозионно-аккумулятивными поверхностями пойм рек и надпойменных террас (Павлунин и др., 2015). Район исследований (см. *рис. 1б*) характеризуется абсолютными отметками рельефа от 9 до 43 м. Температуры грунтов на глубине нулевых теплооборотов в интервале глубин 7–10 м составляют $-0,5...-3,5$ °С. Глубины сезонного оттаивания грунтов варьируют от 0,8 до 1,5 м на участках залегания торфа и от 3,2 до 4,1 м в тальвегах оврагов и понижений. Отложения на территории месторождения представлены песчаными и суглинистыми разностями, часто сильно оторфованы, нередко сверху перекрыты торфом. Четвертичные отложения характеризуются высокой льдистостью грунтов в слое годовых теплооборотов (Bolshanik, Mukhamedyanov, 2019). В озерно-аллювиальных, болотных и аллювиальных отложениях широко распространены полигонально-жильные льды, которые встречаются практически на всех геоморфологических уровнях, преимущественно в центральных недренированных частях равнин, и приурочены к массивам торфяников и водоразделов (Горелик и др., 2015).

Для территории месторождения характерна высокая заболоченность и заозёрность. В напочвенном покрове доминирует низкорослая (2–20 см) мохово-лишайниково-кустарничковая растительность и кустарники.

Динамика площадей термокарстовых озёр в целом обусловлена относительно небольшой их глубиной (максимум 5–6 м), преобладающим плоским типом рельефа тундры, а также поверхностными криогенными процессами, влияющими на каналы поверхностного стока. Частичный или полный спуск (дренирование) озёр с образованием хасыреев, а также заполнение их водой могут происходить достаточно быстро. В зависимости от объёма выпавших осадков и интенсивности испарения количество озёр может меняться, в частности из-за слияния нескольких озёр в одно или, наоборот, дробления одного озера на несколько озёр. В этой связи для характеристики возможного антропогенного воздействия на динамику водного баланса количество озёр — менее информативный параметр по сравнению с суммарной площадью водоёмов (СПВ).

В районе исследований (см. *рис. 1б*) размером 50×50 км были определены участки фоновой (без технических объектов) области, относительно которой по данным космической съёмки оценивались изменения площади водоёмов на участках техногенной нагрузки более раннего (с 1984 г., участки А, В) и более позднего (после 1988 г., участки Б, Г) периодов разработки месторождения. Границы участков определялись исходя из условия приблизительно-го равенства средней за все годы суммарной площади водоёмов на больших участках А и Б, а также равенства СПВ входящих в них малых участков В, Г (см. *рис. 1б*). Из *рис. 1б* видно, что технические объекты расположены преимущественно на II надпойменной и III морской террасах, характеризующихся перепадами высотных отметок 18–25 и 30–45 м соответственно (Кузин, 1963). В разные годы суммарная площадь водоёмов (при исключении озёр с площадью менее 0,01 км²) может занимать от 8 до 11 % площади всего исследуемого района. В настоящем исследовании к водоёмам были отнесены все открытые поверхностные воды, включая озёра и реки, за исключением водно-болотных угодий, в которых может преобладать зарождающаяся растительность. На карте-схеме (см. *рис. 1б*) белым контуром также обозначен свод месторождения по изогипсе 1040 м, в границах которого начиналось промышленное бурение.

Антропогенное воздействие в районе месторождения в основном выражено в бурении скважин, строительстве разветвлённой сети дорог, соединяющей кустовые промысловые площадки, линий промысловых продуктопроводов, линий электропередач, установок комплексной и предварительной подготовки газа, компрессорных установок. Большинство технических объектов являются энергозависимыми и теплогенерирующими. Кустовые площадки оснащены горизонтальными факельными установками для сжигания промышленных стоков. К факторам антропогенного воздействия следует также отнести многочисленные разезды гусеничного транспорта, нарушающие целостность напочвенного растительного покрова, что в ряде случаев приводит к образованию линейного термокарста и изменению естественных условий поверхностного стока (Санников, 2016; Bolshanik, Mukhamedyanov,

2019). Следует отметить, что на этапе поисково-разведочных работ наиболее интенсивные нарушения поверхности на участке А происходили задолго до начала разработки месторождения, т.е. ещё до 1984 г. Строительство первых объектов и дорог было начато в районе В и в последствии расширялось преимущественно в северо-восточном направлении. К факторам антропогенного воздействия также может быть отнесено погружение свода месторождения в результате отбора газа и газового конденсата (Васильев и др., 2022).

Исходные данные и методика исследований

Для характеристики многолетней динамики водоёмов крупных районов наиболее приемлемы данные спутников Landsat, функционирующих с начала 80-х гг. прошлого столетия и до настоящего времени. Анализ проводился на основе серии из 10 снимков со спутников Landsat-5, -7, -8 (табл. 1) уровня обработки L1, находящихся в свободном доступе на портале Геологической службы США (англ. United States Geological Survey — USGS, <https://glovis.usgs.gov/app>). В работе использовались безоблачные снимки с датами съёмки после схода паводковых вод (июль, август).

Таблица 1. Используемые в работе снимки спутников Landsat

Дата съёмки	Год от начала периода наблюдений	Спутник	Местное время съёмки	Кадр (Path; Row)
06.07.1988	1	Landsat-5	10:58	159; 12
19.07.1990	3		10:54	160; 12
07.07.1994	7		10:46	159; 12
01.07.1995	8		10:39	160; 12
07.08.2000	13	Landsat-7	11:25	160; 12
15.07.2006	19	Landsat-5	11:27	160; 12
18.07.2013	25	Landsat-8	11:36	160; 12
02.08.2015	28		11:27	159; 12
06.07.2017	30		11:27	159; 12
19.07.2019	31		11:34	160; 12

К условиям при отборе снимков также относилось отсутствие осадков как минимум за три дня до даты съёмки. Предварительная обработка снимков включала калибровку спектральных каналов и формирование фрагментов на исследуемый район.

Изучение динамики термокарстовых озёр проводилось на основе анализа изменений суммарной площади водоёмов с площадью отдельных водоёмов более 0,01 км². Для выделения водных поверхностей использовался модифицированный нормализованный разностный водный индекс MNDWI (англ. Modified Normalized Difference Water Index), рассчитываемый по формуле (Ху, 2006):

$$\text{MNDWI} = \frac{\rho_{\text{Green}} - \rho_{\text{MIR}}}{\rho_{\text{Green}} + \rho_{\text{MIR}}}, \quad (1)$$

где ρ_{Green} и ρ_{MIR} — коэффициенты отражения в зелёной и средней инфракрасной области спектра соответственно. Для радиометров ТМ (англ. Thematic Mapper) и ЕТМ+ (англ. Enhanced Thematic Mapper Plus) (Landsat-5, -7) коэффициенты ρ_{Green} и ρ_{MIR} рассчитываются по данным 2-го и 5-го спектральных каналов, а для радиометра ОLI (англ. Operational Land Imager) (Landsat-8) — по данным 3-го и 6-го каналов соответственно. Согласно формуле (1) к водным поверхностям относят участки со значением $\text{MNDWI} > 0$ (Ху, 2006).

К числу основных природных факторов, влияющих на межгодовые различия СПВ в летний период, относятся: климатический тренд потепления, время схода паводковых вод,

количество осадков (Корниенко, 2016; Тарасенко, 2013; Olthof et al., 2015), а также интенсивность испарения. Совокупное влияние природных факторов может привести к естественной трансформации криогенных ландшафтов и изменению площади водоёмов. Антропогенное воздействие может рассматриваться как дополнительный фактор, влияющий на изменение ландшафта и площадь водоёмов на фоне природных факторов. Пренебрежение влиянием природных факторов может привести к спорным выводам об антропогенном влиянии на изменение гидрологической ситуации и на связанные с таким изменением трансформации криогенного ландшафта. Поскольку влияние природных и антропогенных факторов может быть соизмеримо, оценка вклада последних по данным ДЗЗ, по сути, представляет собой решение более сложной обратной задачи. В этой связи необходимы методические решения, позволяющие минимизировать влияние природных факторов для повышения достоверности оценки возможного антропогенного вклада в изменение СПВ. В частности, может быть применена методика относительной оценки (Корниенко, 2016) на основе параметра β_T , рассчитываемого для каждого года по формуле:

$$\beta_T = \frac{S_T}{S_\Phi},$$

где S_T — СПВ на участках техногенной нагрузки; S_Φ — СПВ фоновой области. Подобный подход позволяет по относительному параметру β_T с большей вероятностью характеризовать изменение суммарной площади водоёмов, обусловленное возможным антропогенным воздействием.

Для сравнительной оценки изменений параметра β_T дополнительно анализировались изменения СПВ по участкам фоновой области (1–5 на *рис. 1б*) на основе параметра β_i , рассчитываемого по формуле:

$$\beta_i = \frac{S_i}{S_\Phi - S_i},$$

где S_i — СПВ на i -м участке фоновой области, $i = 1, \dots, 5$ (см. *рис. 1б*). Подобный подход, использующий принцип перекрёстной проверки (*англ.* cross-validation) (Marcot, Hanea, 2021; Piralilou et al., 2022), позволяет провести независимую оценку изменения СПВ на i -м участке относительно остальных участков фоновой области для определения изменений, которые могут рассматриваться как методические погрешности, обусловленные возможным неравномерным влиянием на СПВ природных факторов.

Анализ доминирующих многолетних тенденций изменения СПВ проводился на основе изменений параметров β_T и β_i по величине наклона тренда μ , коэффициента детерминации уравнения линейной аппроксимации R^2 и величине доверительной вероятности p , характеризующей статистическую значимость тренда. Наклон тренда μ рассчитывался по формуле:

$$\mu = \frac{\beta^*(t_n) - \beta^*(t_1)}{\beta^*(t_1)} \times 100 \%,$$

где $\beta^*(t_n)$ и $\beta^*(t_1)$ — значения параметров β_T^* или β_i^* , рассчитанные согласно уравнению линейной аппроксимации в первый (t_1) и последний (t_n) год наблюдений.

Оценка статистической значимости трендов проводилась с использованием непараметрического теста Манна – Кендалла (Mann, 1945) для уровня значимости $\alpha = 0,1$. Тренды изменения СПВ по параметру μ считались значимыми при значениях доверительной вероятности $p < 0,1$.

Очевидно, что степень антропогенного воздействия на криогенные ландшафты и, соответственно, на состояние озёр может зависеть от концентрации технических объектов в исследуемых районах. В этой связи для сопоставления с изменениями СПВ рассчитывался параметр γ , характеризующий плотность размещения технических объектов на участках техногенной нагрузки:

$$\gamma = \frac{d}{D} \times 100 \%,$$

где d — площадь, занимаемая техническими объектами анализируемого участка; D — площадь участка с исключением площади, занимаемой водоёмами, за все годы наблюдений. Выделение пикселей, относящихся к техническим объектам, проводилось по распределениям индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) (Tucker, 1979) по пороговому значению $NDVI < 0,18$, которое определялось на основе анализа распределения этого параметра в границах самих технических объектов, карьеров и речных отмелей для каждого года съёмки. Итоговая схема пространственного расположения технических объектов (см. *рис. 1б*) формировалась путём совмещения схем каждого года съёмки с исключением участков речных отмелей. Для уточнения схемы расположения технических объектов использовались космические снимки высокого пространственного разрешения с ресурса Google Планета Земля (*англ.* Google Earth, <https://earth.google.com>). Обработка и анализ данных космической съёмки осуществлялись с использованием программ ENVI 5.3 и MS Excel.

Результаты исследований

На *рис. 2* приведены графики, характеризующие изменение абсолютных значений СПВ в границах всей фоновой области, а также на участках А и Б за весь анализируемый период. Ранее было показано, что максимальная погрешность одномоментного определения абсолютных значений СПВ $> 40 \text{ км}^2$ по данным Landsat не превышает 0,5 % (Корниенко, 2016). Как видно из графиков на *рис. 2*, СПВ по фоновой области, участкам А и Б больше 40 км^2 , однако разброс значений существенно выше погрешности в 0,5 %. Отрицательный тренд изменения СПВ по участку А (см. *рис. 2*) свидетельствует о снижении здесь суммарной площади водоёмов в отличие от фоновой области и участка Б, в границах которых отмечают тренды роста СПВ.

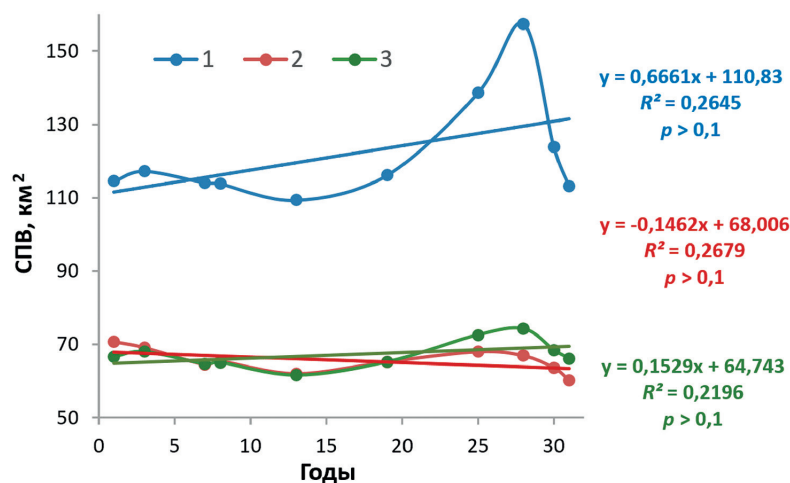


Рис. 2. Многолетние вариации СПВ. 1 — фоновая область; 2 — участок А; 3 — участок Б

Очевидно, что вариации суммарной площади водоёмов и наклон линий трендов могут быть связаны как с влиянием природных факторов, так и с возможным антропогенным воздействием. Подобное представление данных не позволяет охарактеризовать влияние антропогенной составляющей на изменение СПВ и тем более дать количественную оценку. В этой связи анализ и оценка изменений СПВ на участках техногенной нагрузки и участках фоновой области проводились на основе параметров β_T , β_i и μ .

Для повышения достоверности оценок изменения СПВ в зонах техногенной нагрузки анализировались тренды изменения площади водоёмов не только на участках А и Б, но и на участках меньшего размера В, Г, на участках А–В и Б–Г, относящихся к территориям участков А и Б за вычетом территорий участков В и Г соответственно, а также в границах III морской (III м. т.) и II надпойменной (II н. т.) террас участков А и Б.

В табл. 2 приведены исследуемые параметры по участкам.

Таблица 2. Суммарная площадь водоёмов (СПВ), наклон μ , коэффициенты детерминации R^2 , доверительная вероятность (p) трендов параметров β , по участкам фоновой области 1–5, β_T , по участкам техногенной нагрузки А, Б, В, Г, А–В, Б–Г, II н. т. (А), III м. т. (А), II н. т. (Б), III м. т. (Б) и плотность сосредоточения технических объектов γ

Участок	СПВ, км ²	μ , %	R^2	p	γ , %
<i>Участки фоновой области</i>					
1	27,06	2,86	0,0082	>0,1	–
2	15,91	–7,43	0,2651		
3	25,55	7,86	0,0650		
4	22,00	5,05	0,0394		
5	24,54	–7,50	0,1605		
<i>Участки техногенной зоны</i>					
А	72,05	–19,35	0,6545	<0,1	7,35
Б	66,96	–7,06	0,2658	>0,1	3,48
В	9,65	–19,25	0,6159	<0,1	10,85
Г	7,76	–1,03	0,0093	>0,1	3,14
А–В	61,91	–20,39	0,6630	<0,1	6,72
Б–Г	58,81	–8,20	0,2738	>0,1	3,53
III м. т. (А)	24,10	–20,46	0,7049	<0,1	7,95
II н. т. (А)	47,85	–17,89	0,5314	<0,1	5,67
III м. т. (Б)	27,62	–8,64	0,3088	>0,1	4,06
II н. т. (Б)	39,22	–7,60	0,1771	>0,1	2,61

По участкам фоновой области значения параметра μ разнонаправлены, не превышают 7,8 % и могут рассматриваться как степень неоднородности влияния природных факторов на изменение СПВ в районе исследований. Все тренды β_i по участкам фоновой области характеризуются низкими значениями коэффициента R^2 и значениями $p > 0,1$, что свидетельствует об отсутствии значимых изменений СПВ. При анализе трендов и количественной оценке изменений СПВ по участкам техногенной зоны значения параметра μ по участкам фоновой области могут рассматриваться как методическая погрешность.

Для зоны техногенной нагрузки аномальное снижение СПВ (по параметру μ), относительно высокие значения коэффициента R^2 и значимые тренды β_T ($p < 0,1$) отмечаются только на участке А, а также на участках, к нему относящихся (в табл. 2 значения выделены полужирным начертанием). На участке Б и участках в него входящих тренды β_T незначимы ($p > 0,1$), а коэффициенты R^2 и снижение СПВ (по параметру μ) соизмеримы со значениями этих параметров по участкам фоновой области.

В качестве примера на рис. 3 приведены тренды параметра β_T , характеризующие изменение СПВ на участках техногенной нагрузки А, Б, В, Г, а также III морской и II надпойменной террас участка А. На графиках также приведён параметр μ , характеризующий изменения (%) СПВ относительно фоновой области, величины доверительной вероятности p и границы доверительных областей (цветная заливка) линий трендов для $\alpha = 0,1$.

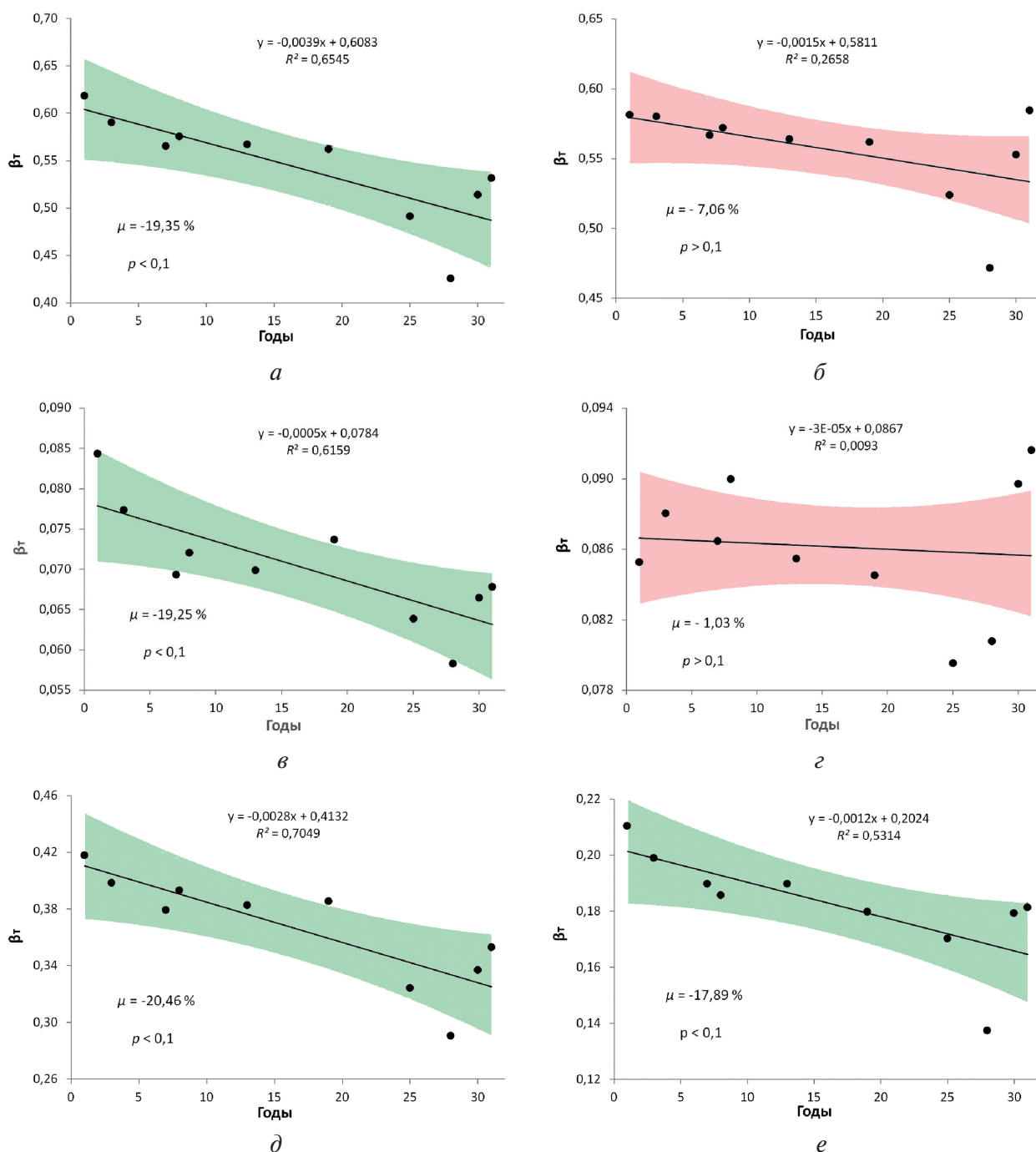


Рис. 3. Тренды параметра β_T , характеризующие изменение суммарной площади водоёмов на участках А (а), Б (б), В (в), Г (г), III морской (д) и II надпойменной (е) террас участка А относительно фоновой области

Наиболее вероятной причиной разброса значений параметра β_T (см. рис. 3) может быть неравномерное влияние природных факторов, на что указывает похожее расположение β_T для всех участков за период с 2013 по 2019 г.

Как отмечалось выше, состояние криогенного ландшафта и площадь водоёмов может зависеть от концентрации технических объектов. Из табл. 2 видно, что наиболее высокие значения параметра γ , характеризующего плотность размещения технических объектов, приходятся на участок А и входящие в его состав участки с более высокими значениями μ . На рис. 4 (см. с. 254) для иллюстрации связи между изменением СПВ (параметр μ) и плотностью размещения технических объектов (параметр γ) на участках техногенной зоны приведён график,

построенный по данным из *табл. 2*. Горизонтальная линия на графике соответствует максимальному значению снижения (%) СПВ, наблюдаемому на участках фоновой области (см. *табл. 2*).

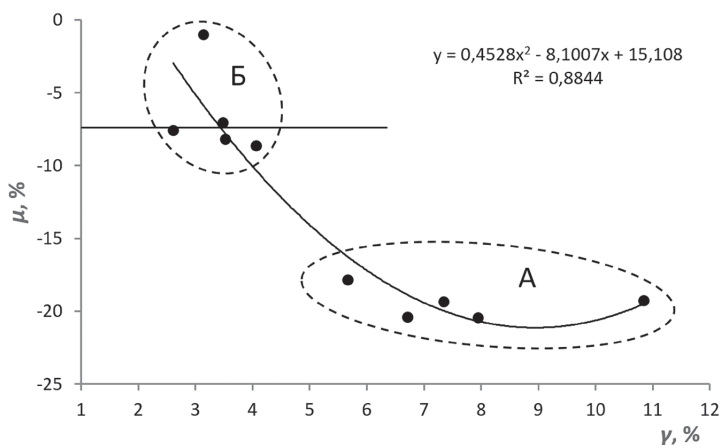


Рис. 4. График, характеризующий связь между плотностью размещения технических объектов (γ) и изменением СПВ (μ)

Группирование данных в два непересекающихся кластера (см. *рис. 4*) свидетельствует о существенных различиях участков А и Б в пространстве признаков μ и γ .

Обсуждение результатов

Результаты, полученные с применением предлагаемой методики, показывают, что значимость многолетних трендов изменения СПВ и их количественные показатели зависят не от суммарной площади самих водоёмов, а только от природных и, предположительно, антропогенных факторов влияния.

Рассчитанные относительно одной и той же СПВ фоновой области тренды параметров β_T , характеризующие изменение площади водоёмов на крупных участках (А, Б) техногенной нагрузки и участках меньшей площади (В, Г) с приблизительно равной СПВ, имеют различную значимость и существенно разное изменение (%) площади водоёмов (см. *табл. 2*, *рис. 3*). Это означает, что по предлагаемым параметрам (μ , R^2 , p) относительно одной и той же фоновой области могут сравниваться изменения СПВ на участках с различной площадью водоёмов.

Разброс значений μ и отсутствие значимых трендов изменения СПВ по участкам фоновой области указывают на неравномерность влияния природных факторов (осадков, испарения) в районе исследований. В то же время на участке техногенной нагрузки А отмечаются значимые тренды снижения СПВ, в разы (по параметру μ) превышающие максимальное снижение СПВ по участкам фоновой области (см. *табл. 2*). На участке Б, также относящемся к зоне техногенной нагрузки, тренды снижения СПВ незначимы и по анализируемым параметрам (μ , R^2 , p) близки к трендам участков фоновой области (см. *табл. 2*). Столь существенное отличие трендов изменения СПВ на участке А от трендов на участках фоновой области и участке Б указывает на то, что на участке А кроме природных есть другие значимые факторы, влияющие на снижение площади водоёмов.

Наиболее вероятной причиной аномального снижения СПВ на участке А может быть антропогенное воздействие, обусловленное спецификой разработки месторождения в начальный период, особенностями строительства и длительностью функционирования технических объектов. Участки А и Б практически идентичны в геоморфологическом плане, характеризуются равной суммарной площадью водоёмов и соразмерным размещением технических объектов на III морской и II надпойменной террасах (см. *рис. 1б*). Единственное явно наблюда-

емое различие участков А и Б заключается в плотности размещения технических объектов. На участке А и его фрагментах параметр γ в два-три раза выше, чем на участке Б и на фрагментах его территории (см. *табл. 2, рис. 4*), что указывает на более высокую степень антропогенного воздействия на ландшафт участка А и, как следствие, на изменение площади водоёмов в его границах.

Другое важное различие участков А и Б состоит в длительности освоения этих территорий. На участке А поисково-разведочные работы проводились задолго до официального начала разработки (строительства объектов) в 1984 г. Таким образом, за период с 1988 по 2019 г. на участке А суммарная интенсивность техногенного воздействия была значительно выше, чем на участке Б, что также могло повлиять на разницу в снижении СПВ на этих участках. Не исключено также, что отсутствие значимых изменений суммарной площади водоёмов на участке Б связано с применением более рациональных и экологически безопасных подходов при строительстве и эксплуатации технических объектов, поскольку предприятие ООО «Газпром добыча Ямбург», ведущее разработку Ямбургского НГКМ, постоянно совершенствует и внедряет в производство технологии, направленные на снижение рисков негативно-го воздействия на окружающую среду.

Если исключить влияние антропогенных факторов, то следует, что из всего района исследований (см. *рис. 1б*) только на участке А происходили локальные аномальные природные процессы, приводящие к снижению СПВ. Другими словами, следует допустить, что за период с 1988 по 2019 г. здесь выпадало меньше осадков, раньше происходил сход паводковых вод и/или интенсивнее шло испарение с озёр, причём не связанное с техногенными факторами. Однако в условиях тундры с плоским рельефом существование такой локальной зоны с аномальными природными атмосферными условиями практически исключено и не может рассматриваться как основная причина сокращения площади водоёмов на участке А.

Факт влияния объектов строительства на динамику термокарстовых озёр хорошо известен, однако очевидно, что существуют пороговые значения плотности размещения технических объектов, выше которых признаки их воздействия на ландшафт могут быть выявлены теми или иными средствами наблюдений. Из версии, что аномальное снижение СПВ на участке А связано с антропогенным (техногенным) воздействием, следует, что расположение кластеров А и Б (см. *рис. 4*) носит неслучайный характер. В этой связи по данным Landsat в схожих условиях могут быть определены пороговые значения плотности размещения технических объектов γ^* , выше которых возможны антропогенные трансформации криогенного ландшафта, приводящие к аномальному (значимому) снижению суммарной площади водоёмов. В данном случае подобное снижение СПВ возможно при значениях $\gamma^* > 5\%$ (см. *рис. 4*).

На *рис. 5* (см. с. 256) приведены фрагменты карты, характеризующие изменение площади водоёмов вблизи технических объектов на участках В и Г. Карта построена по разности распределения индекса MNDWI 1988 и 2019 гг. съёмки. На участке В (см. *рис. 5а*) площадь исчезнувшей водной поверхности более чем в три раза превышает площадь вновь образовавшейся водной поверхности, в то время как на участке Г (см. *рис. 5б*) площади сокращения и приращения водоёмов приблизительно равны.

Поскольку в 1988 и 2019 гг. природные факторы влияния на СПВ были приблизительно одинаковы для участков В и Г, наблюдаемые различия в изменении СПВ на этих участках (см. *рис. 5*), с одной стороны, могут служить подтверждением разницы в трендах β_T в их границах (см. *рис. 3в, г*), а с другой — иллюстрируют преобладающее сокращение СПВ на участке с более плотным сосредоточением технических объектов (см. *рис. 5а*).

Признаки увеличения или сокращения термокарстовых озёр относятся к числу важных ландшафтных индикаторов, характеризующих изменение локальных геоэкологических и геодинамических условий (Санников, 2016). Наблюдаемое существенное сокращение (на 19,3 %) СПВ на участке А может быть следствием активизации процессов эрозии, техногенного оврагообразования (Московченко и др., 2017; Павлушин и др., 2015; Санников, 2016; Bolshanik, Mukhamedyanov, 2019) и формирования новых каналов поверхностного стока в речную сеть как реакции ландшафтов на антропогенное воздействие. Дренажное термокарстовых озёр, обусловленное активизацией эрозионных процессов, косвенно свидетельствует

о повышении температуры ММП, увеличении мощности сезонно-талого слоя и деградации мерзлоты (Московченко и др., 2017). Известно, что к числу причин изменения площади термокарстовых озёр относят глобальное потепление климата. Учитывая относительно высокую концентрацию энергозависимых и теплогенерирующих технических объектов на участке А, наблюдаемое здесь снижение СПВ может быть следствием локального потепления, что в совокупности с глобальным потеплением может привести к усилению процессов деградации мерзлоты.

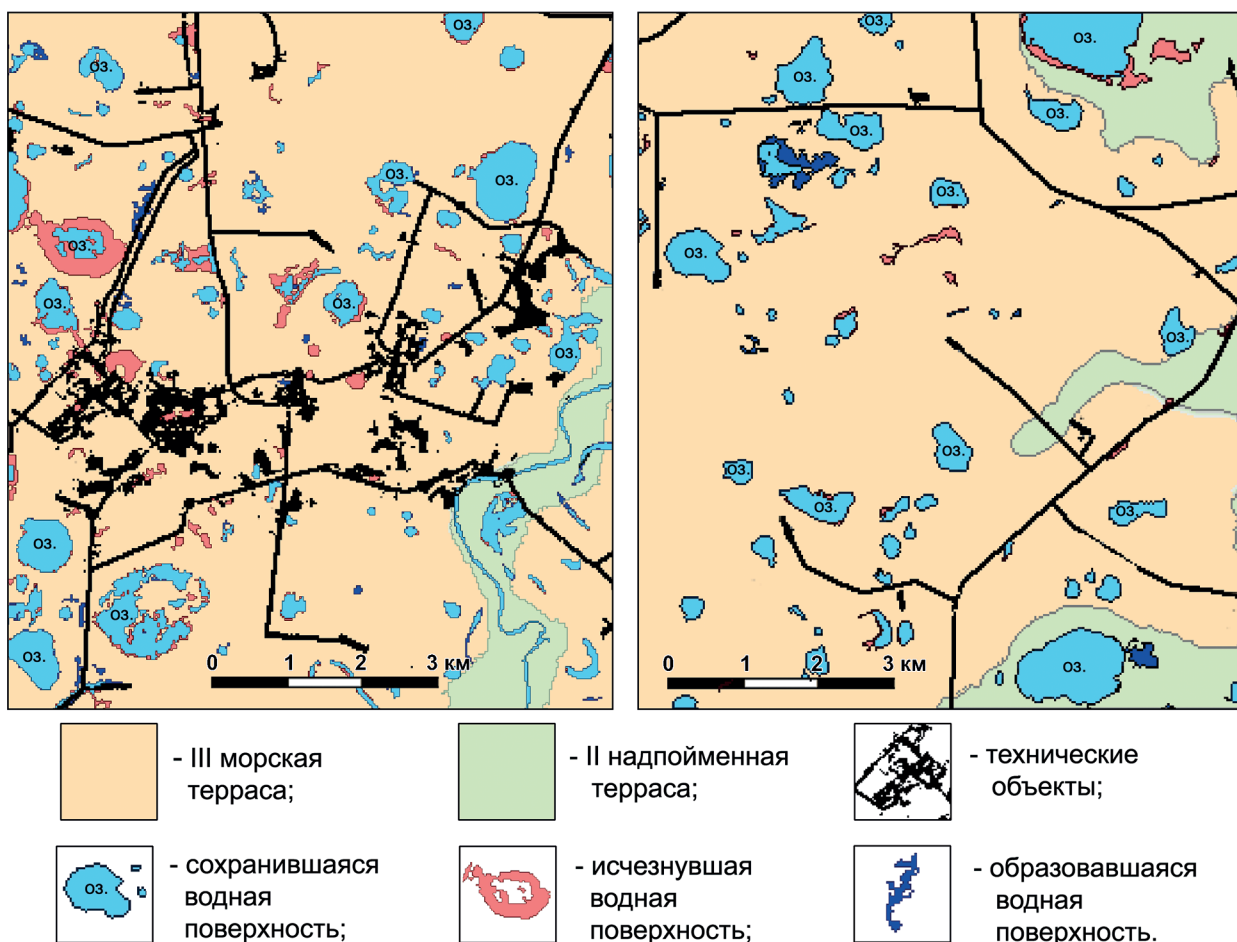


Рис. 5. Фрагменты карты изменения площади водоёмов на участках В (а) и Г (б) за период с 1988 по 2019 г.

Заключение

В настоящей работе впервые предпринята попытка количественной оценки изменения площади водоёмов (преимущественно термокарстовых озёр) в границах обширных зон длительной техногенной нагрузки, относящихся к территориям сплошного распространения многолетнемерзлых пород. По данным спутников Landsat за период с 1988 по 2019 г. на участке более раннего (с 1984 г.) освоения Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения выявлен значимый тренд существенного ($\mu = -19,3\%$) снижения суммарной площади водоёмов. Оценка проводилась на основе параметров, характеризующих изменение СПВ в зонах техногенной нагрузки относительно суммарной площади водоёмов фоновой (без технических объектов) области. Подобный подход позволяет повысить вероятность определения связи изменения СПВ с антропогенным воздействием за счёт снижения влияния природных факторов: климатического тренда потепления, межгодовых различий в количестве атмосферных

осадков, времени схода паводковых вод и интенсивности испарений. На участке более позднего (после 1988 г.) освоения тренд снижения СПВ существенно ниже ($\mu = -7,0\%$), незначим и соизмерим с изменениями площади водоёмов на участках фоновой области, характеризующими неравномерность влияния природных факторов на СПВ.

Наиболее вероятной причиной аномального снижения СПВ (дренирования озёр) на участке более ранней разработки может быть антропогенное (техногенное) воздействие, поскольку к особенностям этого участка относится более высокая плотность размещения технических объектов ($\gamma = 7,35\%$) по сравнению с участком более позднего освоения ($\gamma = 3,48\%$) и более длительный период техногенной нагрузки (с учётом этапов поисково-разведочных работ и строительства объектов). Геокриологическим фактором дренирования озёр, как правило, становится активизация процессов эрозии в результате изменения условий поверхностного стока при строительстве объектов. Аномальное сокращение СПВ на участке более раннего освоения может быть также связано с локальным потеплением, обусловленным более длительной эксплуатацией энергозависимых и теплогенерирующих объектов.

На сегодняшний день нет достаточного количества достоверных сведений для выявления закономерностей, характеризующих связь между интенсивностью антропогенного воздействия и изменением площади термокарстовых озёр. Изменение состояния водоёмов в зонах техногенной нагрузки может быть следствием влияния различных факторов, среди которых не только количество технических объектов, схемы и технологии их строительства, но также региональные климатические и ландшафтные особенности районов. Очевидно, что для выявления закономерных связей между изменением СПВ и антропогенным воздействием необходимы дополнительные системные исследования в различных осваиваемых районах криолитозоны, проводимые на основе единых методических подходов обработки и анализа данных ДЗЗ.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания по теме «Повышение эффективности и экологической безопасности освоения нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли в условиях меняющегося климата» (№ 122022800264-9).

Литература

1. Васильев Ю. В., Иноземцев Д. П., Волков О. В., Семенов С. С. Анализ и интерпретация результатов маркшейдерско-геодезических наблюдений на геодинамическом полигоне Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения // Маркшейдерский вестн. 2022. № 3(148). С. 61–71.
2. Горелик Я. Б., Солдатов П. В., Селезнев А. А. Инженерно-геокриологические условия Ямбургского газоконденсатного месторождения и динамика состояния кустовых площадок эксплуатационных скважин // Криосфера Земли. 2015. Т. 19. № 1. С. 58–69.
3. Елсаков В. В., Марущак И. О. Межгодовые изменения термокарстовых озёр северо-востока европейской России // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 5. С. 45–57.
4. Корниенко С. Г. Анализ погрешностей при оценке изменений площади водоёмов по данным космической съёмки (на примере термокарстовых озёр полуострова Ямал) // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 6. С. 595–607. DOI: 10.7868/S0321059616060031.
5. Кравицова В. И., Родионова Т. В. Исследование динамики площади и количества термокарстовых озёр в различных районах криолитозоны России по космическим снимкам // Криосфера Земли. 2016. Т. 20. № 1. С. 81–89.
6. Кузин И. Л. Геоморфологические уровни севера Западной Сибири // Геология и нефтегазоносность севера Западной Сибири: Тр. ВНИГРИ. 1963. Вып. 225. С. 330–339.
7. Московченко Д. В., Арефьев С. П., Глазунов В. А., Тигеев А. А. Изменение состояния растительности и геокриологических условий Тазовского полуострова (восточная часть) за период 1988–2016 гг. // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 6. С. 3–13.
8. Павлушин В. Б., Быкова А. В., Лобастова С. А. Мониторинг техногенного оврагообразования на объектах добычи углеводородного сырья в условиях криолитозоны // Инженерные изыскания. 2015. № 3. С. 60–68.
9. Полищук Ю. М., Богданов А. Н., Брыксина Н. А. и др. Опыт и результаты дистанционного исследования озёр криолитозоны Западной Сибири по космическим снимкам различного разрешения за

- 50-летний период // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 42–55. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-42-55.
10. *Пшеничников А. Е.* Исследование динамики термокарстовых озёр в различных районах криолитозоны России по космическим снимкам за первые два десятилетия XXI века // Геодезия и картография. 2021. № 7. С. 32–42. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-973-7-32-42.
 11. *Санников Г. С.* Изменения морфометрических показателей термокарстовых озёр западного Ямала как индикатор динамики геологической среды и её реакции на техногенное воздействие (на примере Бованенковского месторождения): дис. ... канд. геол.-мин. наук. Тюмень, 2016. 144 с.
 12. *Тарасенко Т. В.* Межгодовая изменчивость площадей термокарстовых озёр на территории центральной Якутии // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 2. С. 130–139. DOI: 10.7868/S0321059613010100.
 13. *Bolshani P. V., Mukhamedyanov T. I.* Transformation of the relief of territories of development of gas mining deposits of the Taza peninsula // Environmental Dynamics and Global Climate Change. 2019. V. 10. No. 1. P. 16–27. DOI: 10.17816/edgcc10454.
 14. *Carroll M. L., Loboda T. V.* Multi-decadal surfacewater dynamics in North American tundra // Remote Sensing. 2017. V. 9. Article 497. DOI: 10.3390/rs9050497.
 15. *Ding Z., Niu F., Li G. et al.* The Outburst of a lake and its impacts on redistribution of surfacewater bodies in high-altitude permafrost region // Remote Sensing. 2022. V. 14. Article 2918. DOI: 10.3390/rs14122918.
 16. *Mann H. B.* Nonparametric tests against trend // Econometrica. 1945. V. 13. P. 245–259.
 17. *Marcot B. G., Hanea A. M.* What is an optimal value of k in k-fold cross-validation in discrete Bayesian network analysis? // Computational Statistics. 2021. V. 36. P. 2009–2031. DOI: 10.1007/s00180-020-00999-9.
 18. *Nitze I., Grosse G., Jones B. M. et al.* Landsat-based trend analysis of lake dynamics across Northern permafrost regions // Remote Sensing. 2017. V. 9. Article 640. DOI: 10.3390/rs9070640.
 19. *Olthof I., Fraser R. H., Schmitt C.* Landsat-based mapping of thermokarst lake dynamics on the Tuktoyaktuk Coastal Plain, Northwest territories, Canada since 1985 // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 168. P. 194–204. DOI: 10.1016/j.rse.2015.07.001.
 20. *Piralilou S. T., Einali G., Ghorbanzadeh O. et al.* Google Earth Engine approach for wildfire susceptibility prediction fusion with remote sensing data of different spatial resolutions // Remote Sensing. 2022. V. 14. Article 672. DOI: 10.3390/rs14030672.
 21. *Saruulzaya A., Ishikawa M., Jambaljav Y.* Thermokarst Lake Changes in the Southern Fringe of Siberian Permafrost Region in Mongolia Using Corona, Landsat, and ALOS Satellite Imagery from 1962 to 2007 // Advances in Remote Sensing. 2016. No. 5. P. 215–231. DOI: 10.4236/ars.2016.54018.
 22. *Tucker C. J.* Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote Sensing of Environment. 1979. V. 8. P. 127–150. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
 23. *Veremeeva A., Nitze I., Günther F. et al.* Geomorphological and Climatic Drivers of Thermokarst Lake Area Increase Trend (1999–2018) in the Kolyma Lowland Yedoma Region, North-Eastern Siberia // Remote Sensing. 2021. V. 13. P. 178. DOI: 10.3390/rs13020178.
 24. *Xu H.* Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // Intern. J. Remote Sensing. 2006. V. 27. No. 14. P. 3025–3033. DOI: 10.1080/01431160600589179.

Studying the dynamics of thermokarst lakes in the area of the Yamburg gas field using Landsat satellite data

S. G. Kornienko

*Oil and Gas Research Institute RAS, Moscow 119333, Russia
E-mail: spaceakm2@ogri.ru*

Based on Landsat satellite data for 1988 to 2019, the dominant trends of changes in the total area of water bodies (TAWB) in the areas of earlier (since 1984) and later (after 1988) development of the Yamburg oil-gas-condensate field (Tazovsky Peninsula) located in the tundra zone with a continuous spread of permafrost rocks were characterized. MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) was used to identify water bodies represented mainly by thermokarst lakes. The analysis was based on the parameter characterizing the ratio of TAWB in the areas of technogenic load to TAWB of the background (without technical facilities) area, which allows to significantly increase the sensitiv-

ity of the multitemporal analysis of TAWB changes associated with possible anthropogenic impact by reducing the influence of interannual differences in precipitation and climatic changes. On the site of a longer development and denser placement of technical facilities, significant trends have been identified, characterizing a reduction of the TAWB by 19,3 % (lake drainage), which may be associated with the activation of erosion processes, anthropogenic gully formation, changes in surface runoff conditions during construction of facilities, as well as the formation of a local microclimate. At the site of a later development and a lower density of objects, the TAWB reduction trend by 7.0 % is not significant and corresponds to the changes of the background area, characterizing the methodology error. Since the dynamics of thermokarst lakes is considered to be one of the indicators of geocryological conditions, the proposed methodology for analyzing changes in TAWB can be used to study changes in the state of permafrost, including those associated with the influence of anthropogenic factors.

Keywords: anthropogenic impact, remote sensing, cryogenic landscapes, thermokarst lakes, total area of water bodies, dominant trends, tundra, Yamburg field

Accepted: 06.09.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-246-260

References

1. Vasil'ev Yu. V., Inozemtsev D. P., Volkov O. V., Semenov S. S., Analysis and interpretation of the results of mine surveying and geodetic observations at the geodynamic test site of the Yamburg oil-gas-condensate field, *Marksheiderskii vestnik*, 2022, No. 3(148), pp. 61–71 (in Russian).
2. Gorelik Ya. B., Soldatov P. V., Seleznev A. A., Engineering and geocryological conditions of the Yamburg gas and condensate reservoir and dynamics of the ground state of boreholes, *Kriosfera Zemli*, 2015, Vol. 19, No. 1, pp. 58–69 (in Russian).
3. Elsakov V. V., Marushchak I. O., The Inter-Year Changes of Thermokarst Lakes on North-East Part of European Russia, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2011, No. 5, pp. 45–57 (in Russian).
4. Kornienko S. G., Analysis of errors in estimating changes in water body areas by satellite data: case study of thermokarst lakes in Yamal peninsula, *Vodnye resursy*, 2016, Vol. 43, No. 6, pp. 595–607 (in Russian), DOI: 10.7868/S0321059616060031.
5. Kravtsova V. I., Rodionova T. V., Investigation of the dynamics in area and number of thermokarst lakes in various regions of Russian cryolithozone, using satellite images, *Kriosfera Zemli*, 2016, Vol. 20, No. 1, pp. 81–89 (in Russian).
6. Kuzin I. L., Geomorphological levels of the north of Western Siberia, *Geologiya i neftegazonosnost' severa Zapadnoi Sibiri, Trudy VNIGRI*, 1963, Vyp. 225, pp. 330–339 (in Russian).
7. Moskovchenko D. V., Arefyev S. P., Glazunov V. A., Tigeev A. A., Changes in vegetation and geocryological conditions of the Tazovsky peninsula (eastern part) for the period of 1988–2016, *Kriosfera Zemli*, 2017, Vol. 21, No. 6, pp. 3–13 (in Russian), DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-6(3-13).
8. Pavlunin V. B., Bykova A. V., Lobastova S. A., Monitoring of technogenic ravine formation at hydrocarbon production objects in the permafrost conditions, *Inzhenernye izyskaniya*, 2015, No. 3, pp. 60–68 (in Russian).
9. Polishchuk Yu. M., Bogdanov A. N., Bryksina N. A. et al., Experience and results of a remote study of lakes in the permafrost zone of Western Siberia from satellite images of various resolutions over a 50-year period, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 42–55 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-42-55.
10. Pshenichnikov A. E., Studying the dynamics of thermokarst lakes in various regions of Russian cryolithozone, using satellite images for the first two decades of the XXI century, *Geodeziya i kartografiya*, 2021, No. 7, pp. 32–42 (in Russian), DOI: 10.22389/0016-7126-2021-973-7-32-42.
11. Sannikov G. S., *Izmeneniya morfometricheskikh pokazatelei termokarstovykh ozer zapadnogo Yamala kak indikator dinamiki geologicheskoi sredy i ee reaktsii na tekhnogennoe vozdeistvie (na primere Bovanenkovskogo mestorozhdeniya): diss. kand. geol.-min. nauk* (Changes in the morphometric parameters of thermokarst lakes in the western Yamal as an indicator of the dynamics of the geological environment and its response to technogenic impact (on the example of the Bovanenkovskoye field), Cand. geol.-min. sci. thesis), Tyumen, 2016, 144 p. (in Russian).
12. Tarasenko T. V., Interannual variability of areas of thermokarst lakes in central Yakutia, *Vodnye resursy*, 2013, Vol. 40, No. 3, pp. 130–139 (in Russian), DOI: 10.7868/S0321059613010100.
13. Bolshaniuk P. V., Mukhamedyanov T. I., Transformation of the relief of territories of development of gas mining deposits of the Taza peninsula, *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 2019, Vol. 10, No. 1, pp. 16–27, DOI: 10.17816/edgcc10454.

14. Carroll M. L., Loboda T. V., Multi-decadal surfacewater dynamics in North American tundra, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, Article 497, DOI: 10.3390/rs9050497.
15. Ding Z., Niu F., Li G. et al., The Outburst of a lake and its impacts on redistribution of surfacewater bodies in high-altitude permafrost region, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, Article 2918, DOI: 10.3390/rs14122918.
16. Mann H. B., Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, 1945, Vol. 13, pp. 245–259.
17. Marcot B. G., Hanea A. M., What is an optimal value of k in k-fold cross-validation in discrete Bayesian network analysis? *Computational Statistics*, 2021, Vol. 36, pp. 2009–2031, DOI: 10.1007/s00180-020-00999-9.
18. Nitze I., Grosse G., Jones B. M. et al., Landsat-based trend analysis of lake dynamics across Northern permafrost regions, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, Article 640, DOI: 10.3390/rs9070640.
19. Olthof I., Fraser R. H., Schmitt C., Landsat-based mapping of thermokarst lake dynamics on the Tuktoyaktuk Coastal Plain, Northwest territories, Canada since 1985, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 168, pp. 194–204, DOI: 10.1016/j.rse.2015.07.001.
20. Piralilou S. T., Einali G., Ghorbanzadeh O. et al., Google Earth Engine approach for wildfire susceptibility prediction fusion with remote sensing data of different spatial resolutions, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, Article 672, DOI: 10.3390/rs14030672.
21. Saruulzaya A., Ishikawa M., Jambaljav Y., Thermokarst Lake Changes in the Southern Fringe of Siberian Permafrost Region in Mongolia Using Corona, Landsat, and ALOS Satellite Imagery from 1962 to 2007, *Advances in Remote Sensing*, 2016, No. 5, pp. 215–231, DOI: 10.4236/ars.2016.54018.
22. Tucker C. J., Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 1979, Vol. 8, pp. 127–150, DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
23. Veremeeva A., Nitze I., Günther F. et al., Geomorphological and Climatic Drivers of Thermokarst Lake Area Increase Trend (1999–2018) in the Kolyma Lowland Yedoma Region, North-Eastern Siberia, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, Article 178, DOI: 10.3390/rs13020178.
24. Xu H., Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery, *Intern. J. Remote Sensing*, 2006, Vol. 27, No. 14, pp. 3025–3033, DOI: 10.1080/01431160600589179.