

Пространственно-временной анализ динамики озёрного ландшафта в районе Уренгойской ГРЭС

В. А. Хамедов^{1,2}, Д. А. Фратя¹

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий
Новосибирск, 630108, Россия
E-mail: khamedov.vladimir@mail.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического
приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Россия

Проведён анализ динамики озёрного ландшафта в районе действующей Уренгойской ГРЭС. Используются архивные и современные космические снимки высокого пространственного разрешения с космических аппаратов КН-9 (Hexagon 6, Mission 1206) и «Канопус-В», а также Landsat-1, -7, -8, -9. Выполнено исследование изменений площади оз. Ямылимуяганто, представляющего собой водоём-охладитель Уренгойской ГРЭС, и системы проток, соединяющей озеро и р. Пур. Проведены сезонные измерения теплового поля водоёма-охладителя, оказывающего воздействие на прилегающую к нему территорию. С использованием сервиса «Вега-Science» для исследуемой территории осуществлён анализ разновременных снимков, полученных с 1983 по 2023 г. На основе выполненной классификации разновременных космических снимков выявлен положительный тренд количества водных объектов и их суммарной площади за период с 2013 по 2023 г. Полученные результаты свидетельствуют о возможности оттока воды из водоёма-охладителя в связи с развитием термоэрозионных и термокарстовых процессов в пойменной части озера. Для контроля состояния озёрного ландшафта в районе Уренгойской ГРЭС требуется проведение систематических наблюдений, в том числе с применением средств дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: космический мониторинг, арктическая зона, многолетняя мерзлота, водоём-охладитель, термоэрозионные и термокарстовые процессы, КН-9 Hexagon, «Канопус-В», «Вега-Science»

Одобрена к печати: 21.03.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-261-270

Введение

Освоение Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) имеет большое значение для развития экономики и промышленности нашей страны. Площадь Арктической зоны составляет 9 млн км², при этом на её территории, обладающей высоким ресурсным потенциалом, создаётся 12–15 % валового внутреннего продукта страны. Регионы, входящие в Арктическую зону, обеспечивают существенную долю национального дохода и увеличение занятости населения. В настоящее время АЗРФ включает в себя четыре полных региона (Чукотский, Ямало-Ненецкий, Ненецкий автономные округа и Мурманскую обл.) и ещё пять регионов частично (республики Карелия, Коми, Саха (Якутия), Архангельская обл. и Красноярский край).

Для территории Арктической зоны характерно преобладание тундровых ландшафтов, обладающих определённой неустойчивостью к внешним воздействиям. Антропогенная нагрузка в условиях многолетней мерзлоты нарушает естественное состояние ландшафтов, приводит к гибели компоненты биоты, изменяет биохимические процессы в почве, тем самым оказывая влияние на криогенное рельефообразование. Выполненный в работе (Губарьков и др., 2011) анализ экзогенных геологических процессов, оказывающих влияние на естественные тундровые ландшафты, позволил классифицировать следующие факторы влияния: непосредственное влияние, связанное с механическими формами воздействия; опосредованное влияние, связанное с изменением гидрологического и гидрогеологического режима территории; опосредованное влияние, связанное с изменением тепловых потоков.

В настоящей работе проведено исследование динамики озёрного ландшафта территории в районе Уренгойской государственной районной электростанции (ГРЭС), расположенной в Ямало-Ненецком автономном округе. Электростанция была построена в 1987 г. для обеспечения электроснабжения предприятий Западно-Сибирского нефтегазового комплекса, в том числе Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения — одного из крупнейших в мире. Территория, на которой расположена ГРЭС, относится к зоне многолетней мерзлоты. При строительстве станции для исключения рисков неконтролируемой просадки грунта в процессе эксплуатации была применена технология предварительного электрооттаивания грунта, в результате которой произошла его осадка до 2 м (Мантикова, 2016). В настоящее время действующая ГРЭС стала источником хронического теплового воздействия на окружающую среду.

Материалы и методы

Исследованию вопросов трансформации ландшафтов арктических территорий в условиях распространения многолетнемерзлых пород посвящён ряд работ отечественных авторов (Корниенко, Якубсон, 2010; Корниенко и др., 2013) и зарубежных (Webb, Liljedahl, 2023; Webb et al., 2022). На *рис. 1* (см. с. 262) представлен фрагмент картосхемы глобального индекса зонирования многолетней мерзлоты PZI (*англ.* Permafrost Zonation Index), подготовленной в Цюрихском университете (*нем.* Universität Zürich, *англ.* University of Zurich) (Gruber, 2012). Индекс показывает степень распространения мерзлоты и может принимать значения от 0,1 до 1,0.

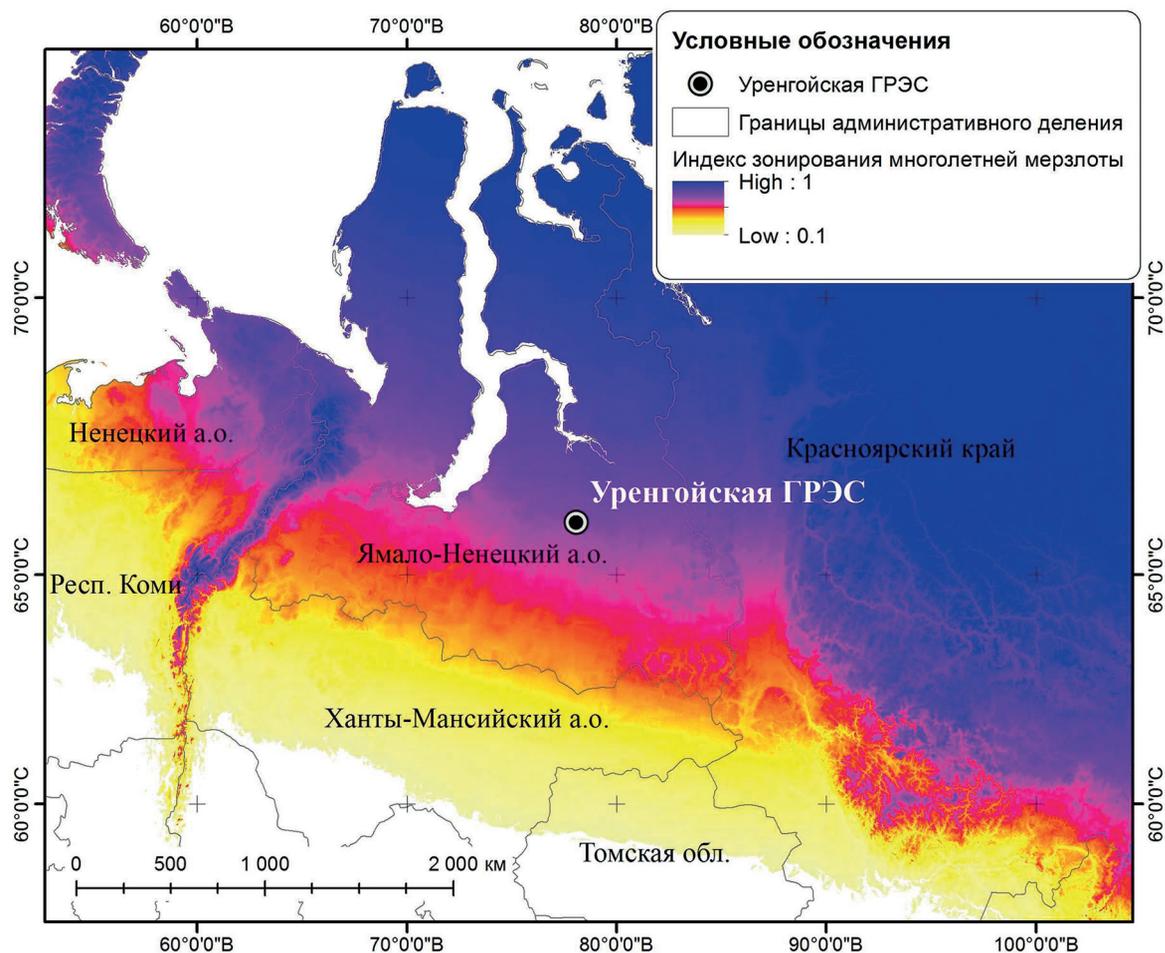


Рис. 1. Картосхема глобального индекса зонирования многолетней мерзлоты PZI

Минимальное значение индекса соответствует территориям островного распространения многолетнемерзлых пород, а максимальное — сплошному. В соответствии с картосхемой территория, на которой расположена Уренгойская ГРЭС, имеет относительно высокий индекс $PZI = 0,74$ и находится в переходной зоне, непосредственно прилегающей к области сплошного распространения мерзлоты. Такое положение объекта может оказывать влияние на тепловой баланс и, как следствие, на изменение ландшафта прилегающей территории в результате термокарстового протаивания грунта. Для оценки фактора теплового воздействия на исследуемую территорию рассмотрим динамику многолетнего тренда температуры воздуха и проведём исследование изменения теплового поля в районе существующего водоёма-охладителя ГРЭС — оз. Ямылимуяганто.

Озеро расположено в пойме р. Пур, западный и южный берега водоёма примыкают к склону долины реки. Основное назначение водоёма-охладителя заключается в обеспечении снижения температуры сбрасываемой в водоём технической воды, нагретой в результате охлаждения оборудования ГРЭС. Для повышения охлаждающей способности водоёма был реализован ряд инженерно-технических решений. Изменение береговой линии и углубление водоёма позволило за счёт увеличения объёма воды снизить оказываемую на него тепловую нагрузку. На *рис. 2а* показано исходное состояние озера и прилегающей территории на снимке высокого пространственного разрешения с космического аппарата (КА) КН-9 (Hexagon 6, Mission 1206), полученном 12.08.1973. На *рис. 2б*, подготовленном с использованием снимка с КА «Канопус-В» от 22.06.2022, показано современное состояние территории, где цифрами обозначены: 1 и 2 — точки забора водных ресурсов из водного объекта (береговая и циркуляционная насосные станции соответственно); 3 и 4 — места сброса воды. Кроме того, были сооружены искусственные косы, представляющие собой узкие полосы песчаного грунта, соединённые одним концом с берегом водного объекта (5–8 на *рис. 2б*).

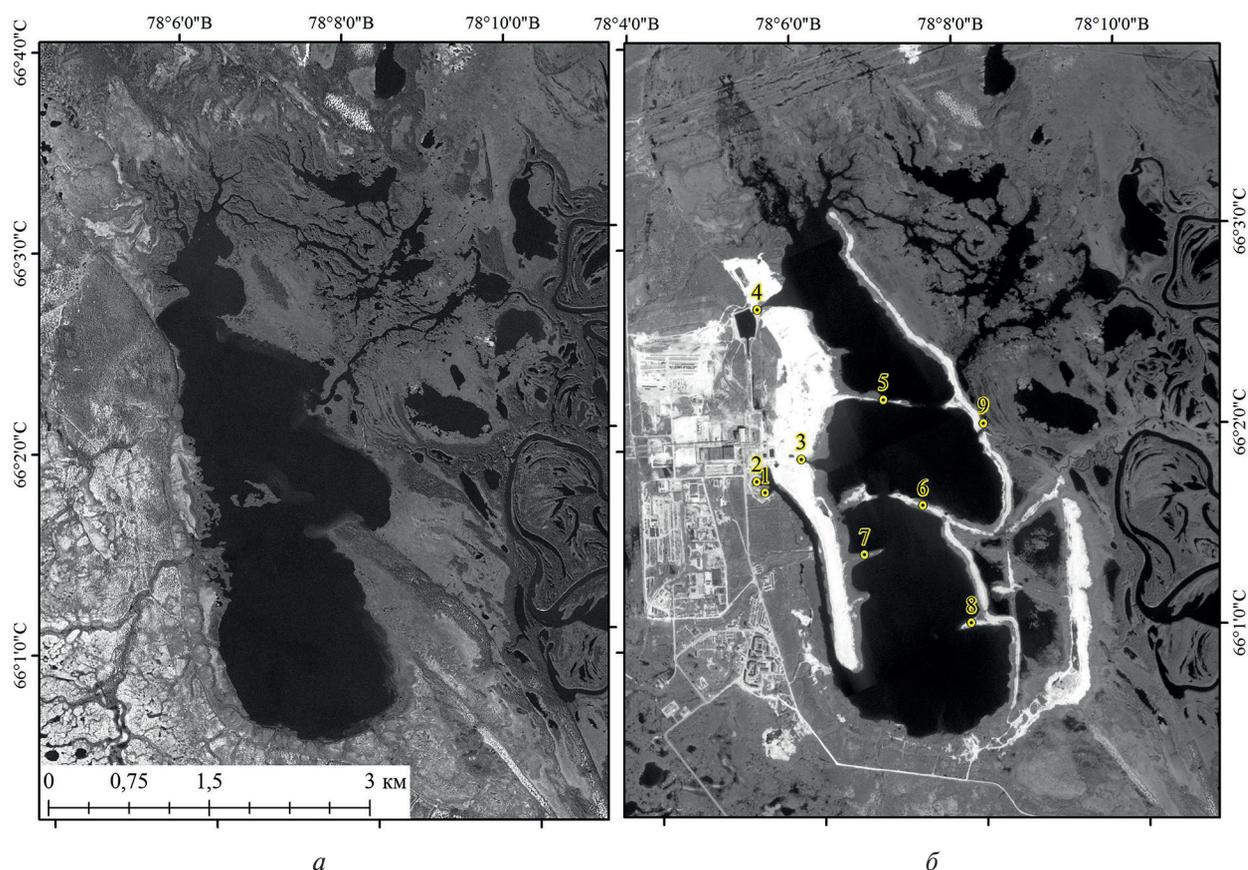


Рис. 2. Территория в районе Уренгойской ГРЭС: *а* — исходное состояние (1973); *б* — современное состояние (2022)

Сооружение кос позволило увеличить путь, проходимый водной массой от точки сброса до точки забора, и повысить эффективность охлаждения технических вод. При этом подпитка водоёма происходит в период паводка через систему протоков, соединяющих водоём с р. Пур (9 на *рис. 2б*). Восточный берег водоёма укреплён дамбой для предотвращения неконтролируемого перетекания воды в реку.

Результаты

На современном снимке наблюдается увеличение площади поверхности водного зеркала пойменной части озера, примыкающей к водоёму-охладителю в северной части. Водный режим этой части озера формируется в результате подпора подземных вод со стороны озера и частично — со стороны р. Пур. Увеличение площади может быть вызвано в том числе протайкой мерзлотных грунтов и появлением перемычек между берегами пойменного озера в результате повышения среднегодового значения температуры воздуха и теплового влияния водоёма-охладителя. На *рис. 3* показан фрагмент космического снимка КА «Канопус-В» северной части водоёма-охладителя с пойменной бессточной частью озера, наиболее подверженной тепловому воздействию от ГРЭС. Синим контуром на изображении обозначена площадь поверхности водного зеркала по состоянию на 1973 г. В результате термоэрозионной переработки береговой линии пойменной части озера и активизации термокарстовой просадки грунта возможен риск оттока воды из водоёма-охладителя, а в дальнейшем — неконтролируемый переток воды из водоёма-охладителя в р. Пур через пойменную часть озера и систему протоков.

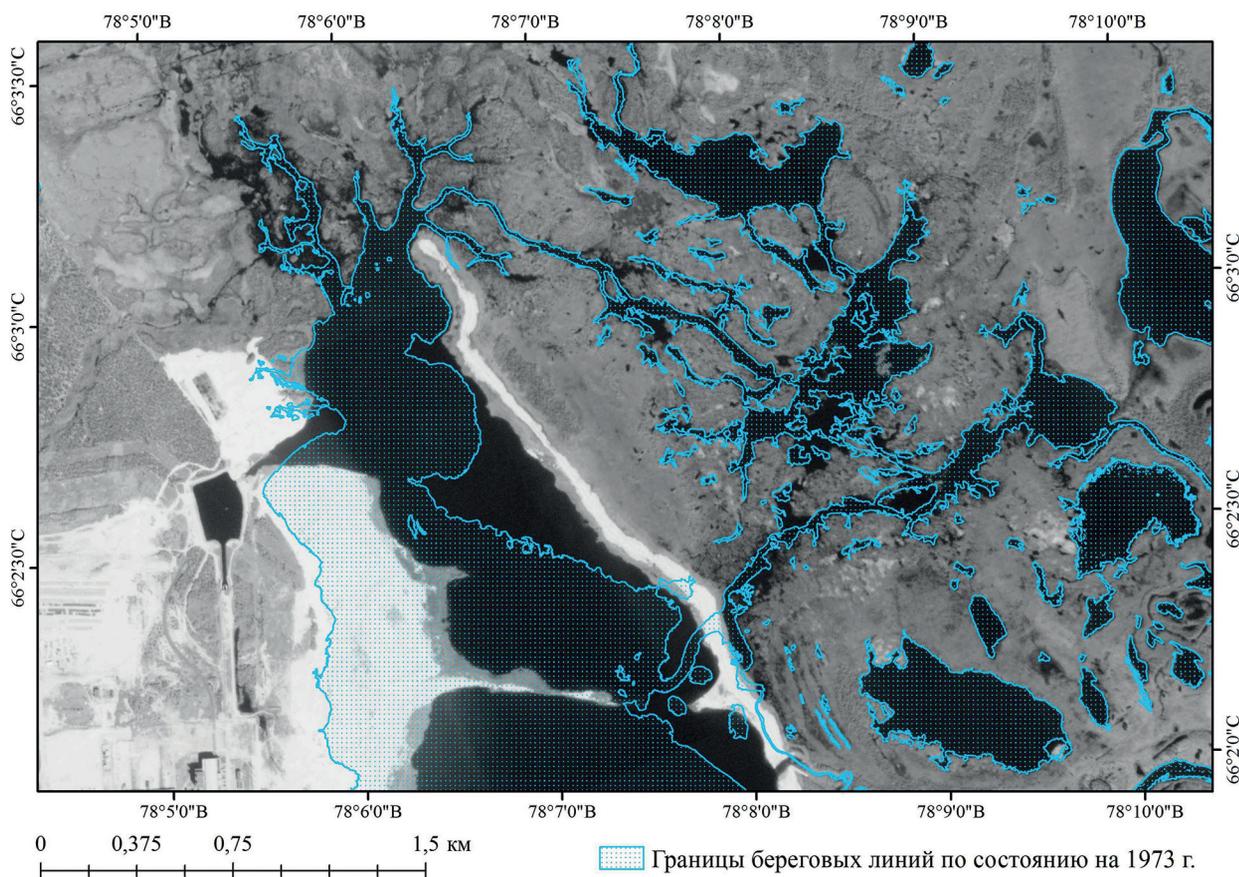


Рис. 3. Увеличение площади водной поверхности за счёт появления перемычек между береговыми линиями

Повышение среднегодовой температуры воздуха исследуемой территории подтверждается многолетними наблюдениями. На *рис. 4* показан график изменения температуры воздуха за период с 1951 по 2023 г. по данным метеостанции в п. г. т. Уренгой, полученным из справочно-информационного портала «Погода и климат» (<http://www.pogodaiklimat.ru/>). Линия тренда на *рис. 4* показывает прирост среднегодовой температуры воздуха за наблюдаемый период на 3 °С.

Одним из факторов, влияющих на повышение среднегодовой температуры, стало тепловое загрязнение от водоёма-охладителя ГРЭС. Для оценки температурных полей с помощью ГИС (геоинформационная система) были построены картосхемы на основе тепловой съёмки со спутника Landsat-8 за следующие даты: 13.02.2022, 07.03.2022, 10.04.2022, 12.05.2022, 23.06.2022, 13.07.2022, 08.08.2022, 02.11.2022. В качестве примера на *рис. 5* показано тепловое поле поверхности в районе Уренгойской ГРЭС по данным спутниковой съёмки от 02.11.2022. На изображении контрастно выделяются тепловые аномалии в месте сброса технической воды в водоём.



Рис. 4. Динамика среднегодовой температуры воздуха на метеостанции в п. г. т. Уренгой

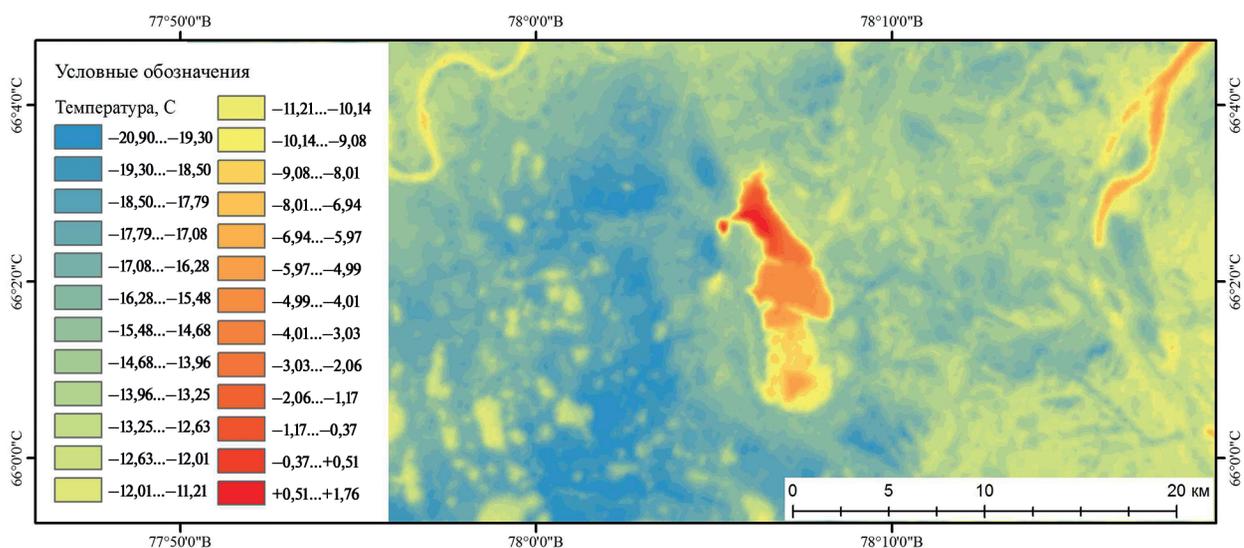


Рис. 5. Картосхема теплового поля в районе Уренгойской ГРЭС по данным космической съёмки от 02.11.2022

По результатам измерений теплового поля выполнен анализ сезонного изменения температуры водной поверхности водоёма-охладителя. На *рис. 6* (см. с. 266) показан график сезонной изменчивости температуры поверхности водоёма-охладителя в точках максимального и минимального нагрева поверхности. Водная поверхность в северной части водоёма не замерзает в течение всего года. Отрицательные значения температуры на графике сезонной изменчивости связаны с влиянием облачности на снимках от 13.02.2022 и 07.03.2022.

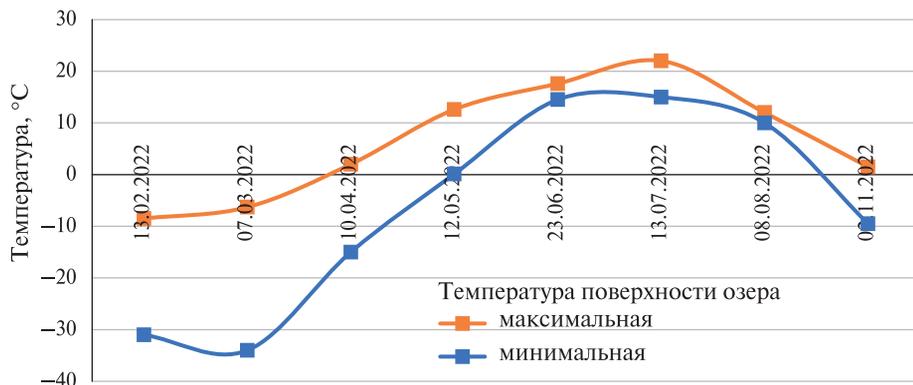


Рис. 6. Максимальная и минимальная температура поверхности водоёма-охладителя

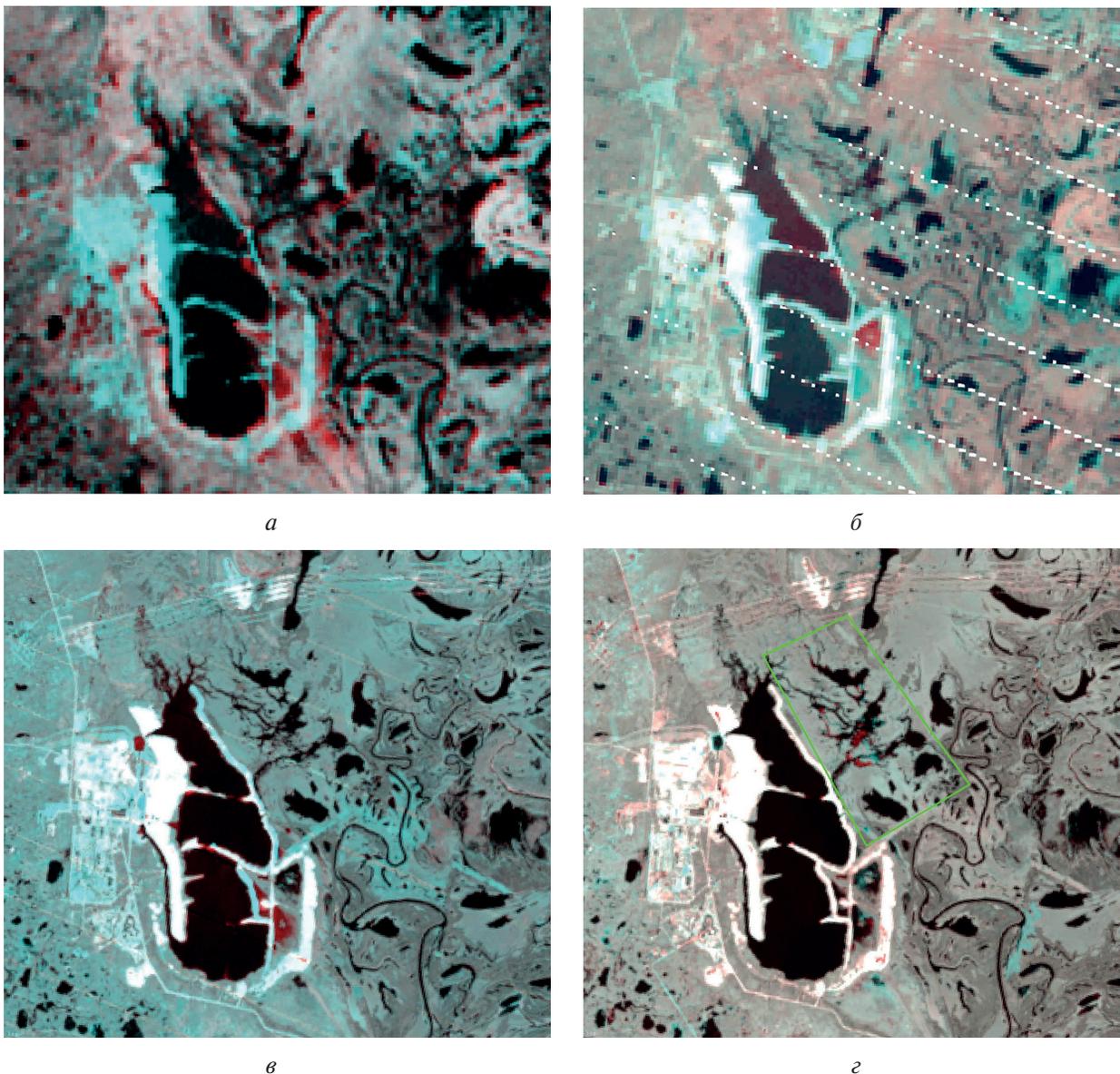


Рис. 7. Динамика изменения объектов гидрографии на разновременных снимках Landsat за временные периоды: а — с 26.07.1983 по 31.07.1993; б — с 31.07.1993 по 27.08.2003; в — с 27.08.2003 по 29.07.2013; г — с 29.07.2013 по 02.08.2023

Для выявления динамики трансформации ландшафтов, как правило, используются комбинации разновременных снимков с их последующей тематической обработкой (Алтухов, Коршунов, 2019; Архипова, Герасюк, 2018; Курбатова и др., 2021; Терехов и др., 2023). Применение разновременных спутниковых снимков при изучении динамики процессов трансформации позволяет своевременно выявить и локализовать развитие опасных природных процессов. Например, в результате проведённых исследований (Тананаев и др., 2017), основанных на материалах полевых работ и данных дистанционного зондирования Земли, была установлена средняя скорость отступления берегов зал. Рубча в южной части акватории Хантайского вдхр. в Красноярском крае, составляющая 1–3 м/год, которая связана с термокарстовой и термоэрозионной переработкой перемычек между акваторией залива и близлежащими озёрами и формированием стока в обход действующей плотины Усть-Хантайской ГЭС.

Для исследуемой территории с использованием сервиса «Вега-Science» был проведён анализ разновременных снимков. На *рис. 7* (см. с. 266) представлены сформированные комбинации из разновременных снимков с КА Landsat-1, -7, -8, -9, позволяющие оценить изменения площади и конфигурации объектов гидрографии исследуемого участка за период с 1983 по 2023 г. Красным цветом на синтезированных разновременных изображениях обозначены участки с увеличившейся площадью поверхности водного зеркала, белым — участки, не изменившие своей конфигурации в наблюдаемый временной период. Как видно из представленных снимков, для предотвращения стока из водоёма-охладителя ГРЭС в р. Пур через систему протоков восточный берег водоёма был укреплен дамбой. Вместе с этим в период с 2013 по 2023 г. (см. *рис. 7г*) наблюдается увеличение площади поверхности водного зеркала пойменной части озера за счёт появления перемычек между береговыми линиями озера. Развитие термоэрозионного и термокарстового процесса может привести к оттоку воды и снижению её объёма в теплообменнике.

Для исследования динамики озёрного ландшафта выбран участок общей площадью 633,12 га, обозначенный на *рис. 7г* зелёным контуром. Были подобраны снимки Landsat-9 (02.08.2023) и Landsat-8 (05.09.2021, 15.08.2019, 25.08.2017, 29.08.2015, 20.07.2013), по которым на основе выполненной в «Вега-Science» классификации ISODATA (от *англ.* Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) рассчитаны количественные характеристики динамики озёрного ландшафта интересующего участка. Результаты представлены в виде графика на *рис. 8* (см. с. 267). Количество объектов гидрографии увеличилось в среднем на 15 %, при этом их суммарная площадь выросла в среднем на 11 %.

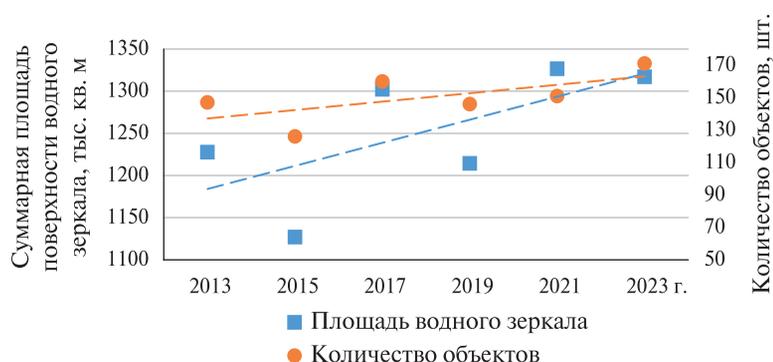


Рис. 8. Динамика суммарной площади поверхности водного зеркала и количества водных объектов на участке наблюдения

Наблюдаемые годовые колебания суммарной площади поверхности водного зеркала и количества водных объектов на участке наблюдения частично коррелируют с колебаниями годового количества осадков и пиковыми значениями уровня воды в периоды паводка на р. Пур, однако имеют обратный тренд динамики (*рис. 9*, см. с. 268). Это позволяет сделать

выводы о развитии термоэрозионных и термокарстовых процессов на исследуемом участке, связанных с тепловым воздействием водоёма-охладителя Уренгойской ГРЭС и частично зависящих от естественных природных процессов.



Рис. 9. Динамика годового количества осадков и пиковых значений уровня воды за период с 2013 по 2023 г. по данным метеостанции п. г. т. Уренгой

Выводы

В результате проведённой работы выполнен анализ динамики озёрного ландшафта в районе Уренгойской ГРЭС, выявлены факторы непосредственного и опосредованного влияния на территорию наблюдения, связанные как с механическими формами воздействия, так и с изменением гидрологического, гидрогеологического режимов территории, а также с изменением тепловых потоков.

Полученные результаты свидетельствуют о существующем риске оттока воды из водоёма-охладителя Уренгойской ГРЭС в связи с развитием термоэрозионных и термокарстовых процессов в пойменной части озера. Для контроля состояния исследуемого участка требуется проведение систематических наблюдений, в том числе с применением средств дистанционного зондирования Земли из космоса.

Авторы выражают благодарность коллективам Института космических исследований РАН за предоставленный доступ к сервису «Вега-Science» и Сибирского центра НИЦ «Планета» за предоставленные материалы космической съёмки с КА «Канопус-В».

Литература

1. Алтухов А. И., Коршунов Д. С. Метод поиска изменений состояния земной поверхности по разно-временным космическим снимкам // Научно-техн. вестн. информац. технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 3. С. 410–416. DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-410-416.
2. Архипова О. Е., Герасюк В. С. Оценка состояния рекреационной зоны Таганрогского залива на основе анализа мультиспектральных данных (Landsat) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 65–74. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-65-74.
3. Губарьков А. А., Алешин Г. А., Идрисов И. Р., Кириллов А. В. Мониторинг экзогенных геологических процессов на магистральном газопроводе «Заполярье – Новый-Уренгой» // Изв. высш. учеб. заведений. Нефть и газ. 2011. № 3(87). С. 7–13.
4. Корниенко С. Г., Якубсон К. И. Изучение современных трансформаций ландшафта на территории Уренгойского НГКМ по данным космической съёмки // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. 2010. № 1(1). С. 14.
5. Корниенко С. Г., Хренов Н. Н., Василенко П. А. Развитие научных основ аэрокосмического геоэкологического мониторинга и обеспечения безопасности геотехнических объектов при освоении нефтегазовых месторождений Арктики и Субарктики // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. 2013. № 1(7). С. 15.

6. Курбатова И. Е., Верещака Т. В., Иванова А. А. Космический мониторинг трансформации болотных ландшафтов в условиях антропогенных воздействий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 216–227. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-216-227.
7. Мантjikова Э. К. Уренгойская ГРЭС: от идей и замыслов к реализации // Науч. вестн. Ямало-Ненецкого автоном. округа. 2016. № 3(92). С. 89–93.
8. Тананаев Н. И., Хамедов В. А., Макарычева Е. М. Состояние и динамика береговой черты Хантайского водохранилища в южной части акватории (залив Рубча) // Геоэкология. Инженер. геология, гидрогеология, геокриология. 2017. № 1. С. 50–57.
9. Терехов А. Г., Сагатдинова Г. Н., Мухамедиев Р. И. и др. Перспективы использования псевдоцветных композитов при анализе многолетних временных рядов спутниковых данных в задаче оценки состояния растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. С. 51–56. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-51-66.
10. Gruber S. Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation // The Cryosphere. 2012. V. 6. P. 221–233. DOI: 10.5194/tc-6-221-2012.
11. Webb E. E., Liljedahl A. K. Diminishing lake area across the northern permafrost zone // Nature Geoscience. 2023. V. 16. P. 202–209. DOI: 10.1038/s41561-023-01128-z.
12. Webb E. E., Liljedahl A. K., Cordeiro J. A. et al. Permafrost thaw drives surface water decline across lake-rich regions of the Arctic // Nature Climate Change. 2022. V. 12. P. 841–846. DOI: 10.1038/s41558-022-01455-w.

Analysis of spatial and temporal dynamics of lake landscapes near Urengoykaya power plant

V. A. Khamedov^{1,2}, D. A. Fratya¹

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies
Novosibirsk 630108, Russia
E-mail: khamedov.vladimir@mail.ru

² Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
Saint Petersburg 190000, Russia

The paper presents the results of studies of lake landscape dynamics occurring near Urengoykaya SDPP (State District Power Plant). We analyzed the historic and current high-resolution KH-9 (Hexagon 6, Mission 1206) and Canopus-V satellite imagery, as well as Landsat-1, -7, -8, -9 imagery. We traced changes in the area of Lake Iamyilimuiaganto that serves as a cooling reservoir for Urengoykaya SDPP and the changes in the spatial distribution of the tributaries, connecting the lake with the Pur River. We measured seasonal changes of infrared emission of the cooling reservoir that effects the adjacent territories. We examined the imagery from 1983 to 2023 using the VEGA-Science satellite service. The resulting data reveals the possibilities of the outflow from the cooling reservoir due to the thermal erosion and karst in the bottom-land area of the lake. Systematic observations including satellite imagery analysis are required to control the changes in lake landscapes in the region of Urengoykaya SDPP.

Keywords: space monitoring, Arctic zone, permafrost, cooling pond, thermoerosion and thermokarst processes, KH-9 Hexagon, Kanopus-V, Vega-Science

Accepted: 21.03.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-261-270

References

1. Altukhov A. I., Korshunov D. S., Search method for changes of the earth's surface state through multi-temporal satellite images, *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2019, Vol. 19, No. 3, pp. 410–416 (in Russian), DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-410-416.

2. Arkhipova O. E., Gerasyuk V. S., Assessment of the state of the Taganrog Bay recreational zone on the basis of multispectral data (Landsat) analysis, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 2, pp. 65–74 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-65-74.
3. Gubar'kov A. A., Aleshin G. A., Idrisov I. R., Kirillov A. V., Monitoring of exogenous geological processes on the main gas pipeline “Zapolarnoe – Novy Urengoi”, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Neft' i gaz*, 2011, No. 3(87), pp. 7–13 (in Russian).
4. Kornienko S. G., Yakubson K. I., Studying of modern transformations of a landscape on territory of Urengoy's oil and gas deposit by use of remote sensing data, *Georesursy, geoenergetika, geopolitika*, 2010, No. 1(1), p. 14. (in Russian).
5. Kornienko S. G., Khrenov N. N., Vasilenko P. A., Development of scientific bases of the aerospace geoecological monitoring and security of geotechnical objects at exploitation of oil and gas deposits of the arctic and subarctic region, *Georesursy, geoenergetika, geopolitika*, 2013, No. 1(7), p. 15 (in Russian).
6. Kurbatova I. E., Vereshchaka T. V., Ivanova A. A., Space monitoring bog landscape transformation under anthropogenic impact conditions, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 216–227 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-216-227.
7. Mantikova E. K., Urengoi state district power station: from ideas and plans to implementation, *Nauchnyi vestnik Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga*, 2016, No. 3(92), pp. 89–93 (in Russian).
8. Tananaev N. I., Khamedov V. A., Makarycheva E. M., Bank features and retreat of the khantaiskoe water reservoir shoreline in its southern reach (Rubcha bay), *Geokologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 2017, No. 1, pp. 50–57 (in Russian).
9. Terekhov A. G., Sagatdinova G. N., Mukhamediev R. I. et al., Prospects for the use of pseudo-color image processing in analysis of long-term time series of satellite data in the task of assessing vegetation cover state, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 6, pp. 51–56 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-51-66.
10. Gruber S., Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation, *The Cryosphere*, 2012, Vol. 6, pp. 221–233, DOI: 10.5194/tc-6-221-2012.
11. Webb E. E., Liljedahl A. K., Diminishing lake area across the northern permafrost zone, *Nature Geoscience*, 2023, Vol. 16, pp. 202–209, DOI: 10.1038/s41561-023-01128-z.
12. Webb E. E., Liljedahl A. K., Cordeiro J. A. et al., Permafrost thaw drives surface water decline across lake-rich regions of the Arctic, *Nature Climate Change*, 2022, Vol. 12, pp. 841–846, DOI: 10.1038/s41558-022-01455-w.