

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ/AEROSPACE RESEARCH OF THE EARTH, PHOTOGRAMMETRY

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.3.2>

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ О ДЛИТЕЛЬНОСТИ ЛЕДОСТАВА НА ОЗЕРАХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Научная статья

Мельников А.В.¹, Кочергин Г.А.², Куприянов М.А.^{3,*}, Полищук В.Ю.⁴, Байсалимова О.А.⁵, Муратов И.Н.⁶, Золотарева А.М.⁷, Полищук Ю.М.⁸

¹ ORCID : 0000-0002-1073-7108;

² ORCID : 0009-0001-4875-7489;

³ ORCID : 0000-0002-9476-2887;

⁴ ORCID : 0000-0002-2058-1725;

⁵ ORCID : 0009-0000-0633-3832;

⁷ ORCID : 0009-0007-3550-8209;

⁸ ORCID : 0000-0002-4944-4919;

^{1, 2, 3, 5, 6, 7} Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий, Ханты-Мансийск, Российская Федерация

⁴ Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Российская Федерация

⁸ Институт химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (kupriyanovma[at]juriit.ru)

Аннотация

Статья посвящена важной проблеме разработки методологии проведения комплексного анализа результатов дистанционных исследований закономерностей динамики ледового покрова на озерах Северной Евразии (на примере Западной Сибири) в условиях воздействия современных климатических изменений. Для проведения исследований определены 4 тестовые зоны, расположенные в широтном диапазоне 50-70 градусов на территории Западно-Сибирской равнины. Разработан алгоритм дистанционного измерения продолжительности ледостава на озерах с использованием спутниковых снимков различного пространственного разрешения Landsat-8 и MODIS. Сформированы временные ряды данных о продолжительности ледостава по снимкам MODIS за период 2001-2023 гг. и временные ряды среднегодовой температуры воздуха и годовой суммы осадков, полученных по данным реанализа из архивов системы ERA-5. Проведены регрессионный анализ разнородных данных о ледоставе и климатических параметрах и анализ линейных трендов временных рядов, позволившие установить важные взаимосвязи между продолжительностью ледостава на озерах и изменениями климатических параметров на исследуемой территории.

Ключевые слова: космические снимки, Landsat-8, MODIS, геоинформационные системы, климатические изменения, длительность ледостава на озерах, анализ временных рядов, регрессионный анализ.

METHODS AND ALGORITHMS OF ANALYSIS OF DATA ON ICE COVER DURATION ON LAKES IN WESTERN SIBERIA FROM SPACE IMAGES IN THE CONDITIONS OF GLOBAL CLIMATIC CHANGES

Research article

Melnikov A.V.¹, Kochergin G.A.², Kupriyanov M.A.^{3,*}, Polishchuk V.Y.⁴, Baysalyamova O.A.⁵, Muratov I.N.⁶, Zolotareva A.M.⁷, Polishchuk Y.M.⁸

¹ ORCID : 0000-0002-1073-7108;

² ORCID : 0009-0001-4875-7489;

³ ORCID : 0000-0002-9476-2887;

⁴ ORCID : 0000-0002-2058-1725;

⁵ ORCID : 0009-0000-0633-3832;

⁷ ORCID : 0009-0007-3550-8209;

⁸ ORCID : 0000-0002-4944-4919;

^{1, 2, 3, 5, 6, 7} Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russian Federation

⁴ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation

⁸ Institute of Petroleum Chemistry, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation

* Corresponding author (kupriyanovma[at]juriit.ru)

Abstract

The article is dedicated to the important problem of developing a methodology for comprehensive analysis of the results of remote sensing studies of ice cover dynamics patterns on the lakes of Northern Eurasia (on the example of Western Siberia) under the impact of modern climatic changes. 4 test zones located in the latitudinal range of 50–70 degrees on the territory of the West Siberian Plain were defined for the research. An algorithm for remote measurement of lake ice duration using Landsat-8 and MODIS satellite images of different spatial resolution was developed. Time series of data on ice cover duration

from MODIS images for the period 2001–2023 and time series of mean annual air temperature and annual precipitation sum obtained from reanalysis data from ERA-5 system archives were formed. Regression analyses of heterogeneous data on ice formation and climatic parameters and linear trend analyses of time series were carried out, which allowed to establish important relationships between the duration of ice formation on lakes and changes in climatic parameters in the studied area.

Keywords: space images, Landsat-8, MODIS, geoinformation systems, climate change, lake ice cover duration, time series analysis, regression analysis.

Введение

Изучению ледового режима на реках и озерах, характеризующегося периодами замерзания, ледостава и вскрытия льда, посвящено большое число работ. В частности, процессы образования и разрушения озерного льда рассмотрены в [1], [2]. Исследование ледостава в условиях климатических изменений, в том числе с использованием спутниковых снимков, проведено в [3], [5], [6], [7]. Исследования ледостава проводились на разных территориях. Показано, что на Тибетском нагорье основным фактором, влияющим на ледовый режим озер, является температура воздуха [5], [8], причем озера в северной части замерзают раньше и оттаивают позже, чем в южной части [9]. Большое число исследований ледостава было проведено на Аляске и других территориях Северной Америки [4], [6]. Исследования с использованием многолетних метеорологических наблюдений, гидрологических данных наблюдательных постов и данных дистанционного зондирования Земли выполнены на отдельных крупных озерах России — Онежском и Ладожском [10], [11].

Контактные наблюдения за ледовым покровом на больших территориях часто затруднены и требуют значительных затрат. Поэтому перспективным для изучения ледовых процессов на озерах становится использование данных дистанционного зондирования Земли. Отметим, что наиболее часто в таких исследованиях использовались данные со спутников MODIS, Landsat и Sentinel-2 [7], [8], [12], [14]. В [4], [6], [15], [17] рассматривались методические вопросы определения дат установления и разрушения ледового покрова и длительности ледостава на основе спутниковых данных с использованием климатических и гидрологических данных, направленные на получение информации о характеристиках ледового режима на озерах. Однако вопросам анализа динамики длительности ледостава под воздействием климатических изменений посвящены единичные работы, в частности [14], [18].

В [14] приводятся результаты исследования изменений озерного льда и прогнозные модели таких изменений до конца текущего столетия в условиях глобального изменения климата. Авторы использовали глобальные карты снежного покрова в северном полушарии, построенные на основе космических снимков MODIS, для определения продолжительности ледостава в период 2001–2020 гг. для более 30 000 озёр (67% от общей площади замерзающих озёр). Важным результатом представленного в [14] исследования является установление того факта, что в северных широтах наблюдается существенно более высокая продолжительность периода ледостава в сравнении со средними широтами северного полушария. Однако ни в цитированной работе, ни в других публикациях не исследованы региональные особенности изменения продолжительности ледостава на озерах в условиях воздействия современных изменений климата, что делает важной и актуальной задачу проведения таких исследований на территориях Северной Евразии. Для решения этой задачи необходимо разработать методические вопросы проведения комплексного анализа данных о длительности ледостава и климатических параметров (температуры и уровня осадков).

В связи с этим целью настоящей работы является разработка процедуры и алгоритмов комплексного анализа данных на основе временных рядов длительности ледостава по данным MODIS и климатических параметров (среднегодовой температуры воздуха и годовой суммы осадков) последних двух десятилетий на территории Западной Сибири.

Исследуемая территория, данные и методы

Исследование динамики ледового покрова на озерах в условиях современных климатических изменений проведено с использованием спутниковых снимков MODIS за период 2001–2023 гг для территории Западной Сибири, которая располагается между Уральскими горами и рекой Енисей и ограничивается на юге степями Северного Казахстана и с севера — Северным Ледовитым океаном. Исследуемая территория характеризуется равнинным характером поверхности с незначительным перепадом высот местности, не превышающим несколько десятков метров. На рис. 1 представлена схема расположения четырех тестовых зон, для которых проводился сравнительный анализ динамики ледостава на озерах за 22-х летний период.

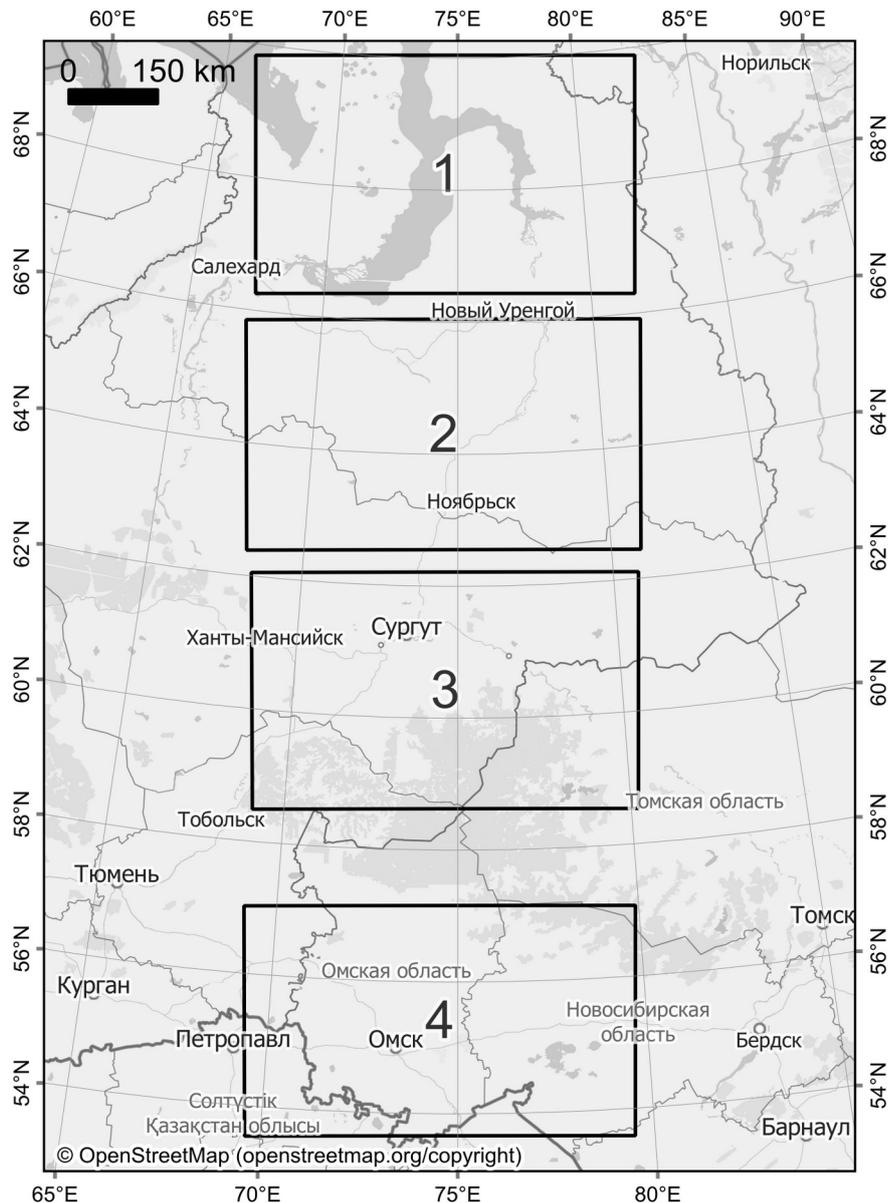


Рисунок 1 - Схема расположения тестовых зон
DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.3.2.1>

Для определения совокупности озер и их площади с приемлемой точностью в границах каждой тестовой зоны была сформирована коллекция космических снимков Landsat-8. Укажем здесь, что, согласно [19], погрешность определения площади озер с размерами более 2 км² по данным космической съемки со спутников среднего пространственного разрешения, к которым относятся данные Landsat-8, не превышает 0,2%. Определение границ воды для каждого озера на космическом снимке осуществлялось с использованием автоматизированного индекса выделения воды *AWEI* (Automated Water Extraction Index), рассчитываемого по формуле [20]:

$$AWEI = 4 \times (GREEN - SWIR1) - (0,25 \times NIR + 2,75 \times SWIR1),$$

где *GREEN* — канал № 3 (зелёный) с длиной волны 0,525–0,600 мкм;

SWIR1 — канал № 6 (ближний ИК — short-wavelength infrared) с длиной волны 1,560–1,660 мкм;

NIR — канал № 5 (ближний ИК — near infrared) с длиной волны 0,845–0,885 мкм;

SWIR2 — канал № 7 (ближний ИК — short-wavelength infrared) с длиной волны 2,100–2,300 мкм.

После расчета индекса *AWEI* для каждого кадра Landsat-8 производилась бинарная классификация с целью отделения водоемов от всех остальных объектов на космическом снимке, векторизация границ водных объектов и удаление полигональных объектов площадью менее 2 км², а также всех рек, проток, пойменных участков и других водоемов с высоким уровнем сезонных колебаний. В результате выполненной работы по дешифрированию космических снимков были определены совокупности озер с размерами более 2 км² для каждой зоны. Суммарное количество озер в указанных тестовых зонах составило более 2 000.

В качестве источника исходных данных о наличии/отсутствии ледового покрова на поверхности озер нами были использованы карты снежного покрова (product MOD10A1F), формируемые ежедневно на основе безоблачных космических снимков MODIS с разрешением 500 м [21]. Карта снежного покрова MOD10A1F представляет собой 8-битный растровый слой, каждый пиксел которого содержит значения индекса нормализованного разностного снежного индекса *NDSI* (Normalized Difference Snow Index), рассчитанного согласно [22] и приведенного к диапазону

от 0 (полное отсутствие снега) до 100 (полностью покрытая снегом территория). В процессе предварительной подготовки данных пиксели на картах снежного покрова, закрытые облачностью, заполнялись пикселями безоблачных наблюдений поверхности Земли из космических снимков предыдущих дней [23]. Применительно к нашей задаче данные MOD10A1F использовались для установления наличия или отсутствия льда на поверхности озер в границах выделенных тестовых зон. Для проведения этих исследований нами были проанализированы данные MOD10A1F за период с 2001 по 2023 гг. в количестве 35 523 шт., общим объемом 117 Гб.

Длительность ледостава (в днях) определяется как разность между датой установления ледового покрова и датой разрушения льда (в результате весеннего таяния) на озерах. Определение указанных дат установления и разрушения льда на озерах по спутниковым снимкам требует знания порогового значения относительной величины площади озера, занятой водой. Для его нахождения был проведен эксперимент с использованием данных MOD10A1F и данных наземных наблюдений с гидропоста на берегу контрольного озера (Сартлан), расположенном на территории исследования.

Продолжительность ледостава на контрольном озере по результатам наземных наблюдений с гидропоста, полученных с сайта государственного мониторинга водных объектов России (gmvo.skniivh.ru), сопоставлялась с величиной, полученной для этого озера по данным MODIS при различных величинах относительной площади озера (s), занятой водой. По результатам этого сопоставления рассчитывалась средняя абсолютная разность длительности ледостава по спутниковым снимкам и по данным гидропоста на озере Сартлан, обозначаемая здесь и далее δ . Расчет величины δ производился по формуле:

$$\delta = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n |d_i - d'_i|, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где d_i — продолжительность ледостава (в i -й год), рассчитываемая как разность дат (в днях) установления и разрушения ледового покрова, определяемых по снимкам;

d'_i — продолжительность ледостава (в i -й год) по данным наблюдений на гидропосту;

n — количество лет (продолжительность периода исследований, годы).

График изменения δ в зависимости от представлен на рис. 2.

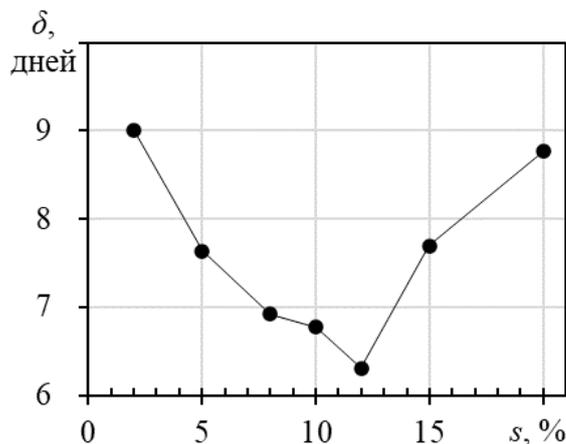


Рисунок 2 - Средняя разность длительности ледостава по спутниковым снимкам и по данным с гидропоста на озере Сартлан при различных значениях относительной величины площади озера, занятой водой

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.3.2.2>

График на рис. 2 позволяет определить пороговое значение величины s , на основании которого можно определять с наименьшей погрешностью даты образования и таяния льда дистанционным методом. В качестве порогового принимается ее значение s_0 , равное значению s при минимальном значении δ (рис. 2). Как видно из этого рисунка, значение s изменялось в пределах от 2 до 20 % и при значении $s_0 = 12\%$ достигалась наименьшая средняя погрешность (6,25 дней) при определении продолжительности ледостава предлагаемым дистанционным методом. Поэтому далее $s_0 = 12\%$ использовалось в качестве порогового значения величины s при определении длительности ледостава по снимкам MODIS.

Анализ данных и обсуждение результатов

Продолжительность ледостава в каждый год определялась как количество дней, прошедших с даты формирования ледового покрова в предыдущем календарном году до даты разрушения ледового покрова в текущем году с учетом определенного выше порогового значения s_0 . После определения продолжительности ледостава для каждого отдельного озера была рассчитана средняя продолжительность ледостава для каждого j -го года в i -ой тестовой зоне по формуле:

$$D_{i,j} = \frac{1}{n_{i,j}} \sum d_{i,j}$$

где $n_{i,j}$ — количество озёр в i -ой тестовой зоне в j -ом году;

$d_{i,j}$ — продолжительность ледостава на отдельном озере в i -й тестовой зоне в j -м году;

i — номер тестовой зоны ($i = 1, \dots, 4$);

j — год ($j = 2001, \dots, 2023$).

Общее количество озер, использованных при формировании временных рядов длительности ледостава в разных тестовых зонах, приведено в табл. 1.

Таблица 1 - Количество озер в тестовых зонах

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.3.2.3>

Тестовая зона	1	2	3	4
Количество озер, шт.	171	925	678	270

Графики временных рядов средней продолжительности ледостава (D) на озерах, полученные по спутниковым снимкам за период 2001–2023 гг. в разных тестовых зонах, представлены на рис. 3.

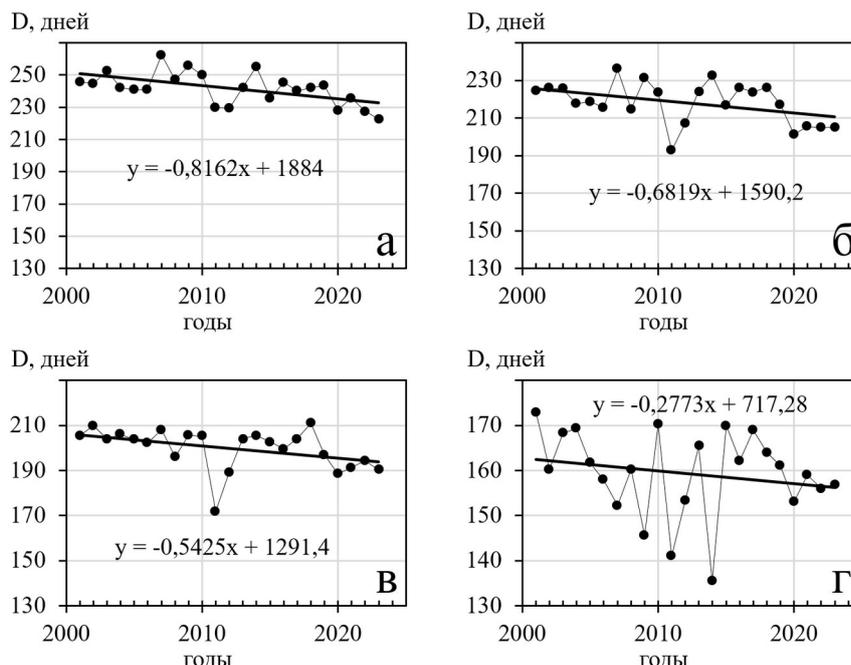


Рисунок 3 - Временные ряды средней продолжительности ледостава на озерах в тестовых зонах 1 (а), 2 (б), 3 (в) и 4 (г) за период 2001-2023 гг

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.3.2.4>

Для изучения особенностей динамики длительности ледостава на озерах под воздействием изменения климата в разных тестовых зонах временные ряды, представленные на рис. 3, аппроксимировались линейным уравнением вида:

$$y = ax + b, \tag{1}$$

где a — коэффициент линейного тренда (дни/год);

x — время (в годах);

b — свободный член уравнения аппроксимации.

Определенные, согласно (1), уравнения линейной аппроксимации временных рядов длительности ледостава для каждой тестовой зоны представлены в поле графиков рис. 3. Точки на графиках рис. 3 представляют средние значения длительности ледостава на всех озерах в каждой тестовой зоне в указанном году. Отрезки сплошных линий на этих графиках отображают линейные тренды изменения длительности ледостава на озерах, полученные по результатам аппроксимации временных рядов линейным уравнением вида (1). Как видно на рис. 3, изменение средней длительности ледостава проявляет отрицательный линейный тренд, демонстрирующий тенденцию сокращения во времени длительности ледостава на озерах во всех тестовых зонах за период 2001–2023 гг.

Временные ряды среднегодовой температуры воздуха (Т) и годовой суммы осадков (Р) получены на основе данных реанализа ERA-5 [24]. Для иллюстрации на рис. 4 приведены графики временных рядов температуры воздуха в 1-й и 4-й зонах, а на рис. 5 — графики временных рядов годовой суммы осадков в этих же зонах. Графики демонстрируют линейный рост температуры в обеих зонах (рис. 4) и разнонаправленные тенденции в изменении уровня осадков: рост в 1-й зоне и его сокращение в 4-й зоне (рис. 5).

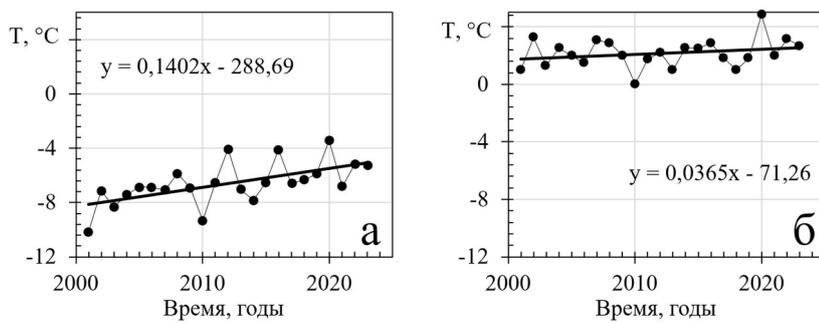


Рисунок 4 - Временные ряды среднегодовой температуры воздуха по данным реанализа за период 2001-2023 гг. в тестовых зонах 1 (а) и 4 (б)

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.3.2.5>

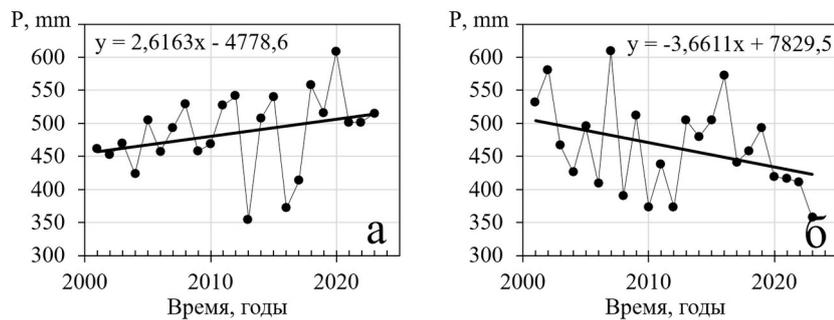


Рисунок 5 - Временные ряды годовой суммы осадков по данным реанализа за период 2001-2023 гг. в тестовых зонах 1 (а) и 4 (б)

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.3.2.6>

Значения коэффициентов линейных трендов изменений исследуемых показателей, определенные в результате анализа временных рядов данных об изменении длительности ледостава, температуры и годовой суммы осадков за период 2001–2023 гг. в разных зонах, приведены в табл. 2, в которой приняты следующие обозначения:

- a_d — коэффициент линейного тренда изменений длительности ледостава,
- a_t — коэффициент линейного тренда изменений температуры,
- a_p — коэффициент линейного тренда изменений годовой суммы осадкой.

Таблица 2 - Коэффициенты линейного тренда изменений длительности ледостава на озерах, среднегодовой температуры и годовой суммы осадков в разных тестовых зонах

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.3.2.7>

Тестовая зона	1	2	3	4
a_d , дней/год	-0,816	-0,682	-0,542	-0,277
a_t , °C/год	0,140	0,113	0,085	0,037
a_p , мм/год	2,616	0,797	0,062	-3,661

Как видно из табл. 2, во всех зонах наблюдаются отрицательные линейные тренды изменения длительности ледостава, что демонстрирует ее сокращение за 22-летний период исследования. Однако сокращение длительности ледостава на озерах значительно более выражено на севере, чем на юге, что подтверждается уменьшенными почти в 3 раза, по данным табл. 2, значениями коэффициента a_d в 1-й зоне по сравнению с 4-й зоной. Известно, что на северных территориях в разных регионах мира в последние десятилетия скорость повышения температуры выше, чем на юге. Эта закономерность подтверждается данными и для территории Западной Сибири, где, согласно табл. 2, коэффициент тренда повышения температуры в 1-й тестовой зоне (север) в 3,8 раз больше, чем в 4-й зоне (юг).

Выполнен многофакторный регрессионный анализ данных совместных исследований временных изменений длительности ледостава на озерах, среднегодовой температуры воздуха и годовой суммы осадков, результаты которого можно представить уравнением множественной линейной регрессии в виде:

$$\bar{S} = c_0 + c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + c_3 \cdot x_3, \quad (2)$$

где c_i — регрессионные коэффициенты ($i = 0, \dots, 3$);

- x_1 — время (годы);
 x_2 — среднегодовая температура воздуха;
 x_3 — годовая сумма осадков.

В результате проведенного анализа определены регрессионные коэффициенты уравнения (2), значения которых для разных зон представлены в табл. 3. В этой таблице приведены также коэффициенты детерминации R^2 , вычисленные при определении регрессионных уравнений вида (2) для каждой зоны.

Таблица 3 - Коэффициенты уравнения множественной регрессии для разных зон

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.3.2.8>

Тестовая зона	c_0	c_1	c_2	c_3	R^2	c_2/c_3
1	1138	-0,446	-2,137	-0,027	0,41	79
2	933	-0,363	-2,881	0,010	0,28	-281
3	876	-0,341	-2,381	0,011	0,25	-216
4	453	-0,143	-3,345	0,003	0,15	-1115

Представленное выше регрессионное уравнение (2) определяет статистическую взаимосвязь изменений длительности ледостава на озерах и климатических параметров и может быть использовано в качестве регрессионной модели прогнозирования длительности ледового покрова на озерах с учетом тенденций современных климатических изменений на исследуемой территории на ближайшие десятилетия.

Как видно из табл. 3, отношение величин регрессионных коэффициентов c_2/c_3 изменяется в разных зонах по абсолютному значению в интервале 79–1115. Это показывает, что вклад температуры в изменения длительности ледостава превышает на 2–3 порядка вклад изменений уровня осадков во всех зонах. Следовательно, изменения длительности ледостава на озерах определяются в основном температурным фактором, а влияние осадков на продолжительность ледового покрова пренебрежимо мала. Поэтому при прогнозировании длительности ледостава на озерах Западной Сибири достаточно учитывать только изменения среднегодовой температуры воздуха.

Заключение

Предложена процедура анализа разнородных данных о динамике ледового режима на озерах и климатических параметров. Разработаны методические вопросы и алгоритм определения длительности ледостава на озерах по снимкам MODIS. С использованием данных о длительности ледостава на контрольном озере, на берегу которого расположен гидропост, определено пороговое значение относительной площади озера, занятой водой, наблюдаемой на космическом снимке. Эта величина использована при дистанционных измерениях длительности ледостава на основе карт снежного покрова, создаваемых регулярно по снимкам MODIS. Сформированы временные ряды средних значений продолжительности ледостава на озерах в четырех тестовых зонах, расположенных в меридиональном направлении (в широтном диапазоне 50–70 градусов) на территории Западно-Сибирской равнины.

Анализ временных рядов данных о длительности ледостава на озерах Западной Сибири показывает в среднем сокращение длительности ледостава во всех тестовых зонах. Однако, коэффициенты линейного тренда этих изменений показывают, что скорость сокращения длительности ледостава на севере значительно выше, чем на юге. Временные ряды среднегодовой температуры воздуха и уровня осадков, сформированные по данным реанализа на основе системы ERA-5, использованы для оценки климатических воздействий на длительность ледостава. Проведенный многомерный регрессионный анализ массивов данных о длительности ледостава, среднегодовой температуре воздуха и годовой суммы осадков показывает, что вклад температуры в изменения длительности ледостава превышает на 2–3 порядка вклад изменений уровня осадков во всех зонах. Следовательно, изменения длительности ледостава на озерах определяются в основном температурным фактором, а влияние осадков на продолжительность ледового покрова пренебрежимо мала. Поэтому при прогнозировании длительности ледостава на озерах Сибири достаточно учитывать только изменения среднегодовой температуры воздуха.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-11-20023).

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The work was financially supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-11-20023).

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Newton A.M.W. Climate change and Northern Hemisphere lake and river ice phenology from 1931—2005 / A.M.W. Newton, D.J. Mullan // *The Cryosphere*. — 2021. — Vol. 15. — № 5. — P. 2211–2234. — DOI: 10.5194/tc-15-2211-2021.
2. Su L. Variation in Ice Phenology of Large Lakes over the Northern Hemisphere Based on Passive Microwave Remote Sensing Data / L. Su, T. Che, L. Dai // *Remote Sensing*. — 2021. — Vol. 13. — № 7. — P. 1389. — DOI: 10.3390/rs13071389.
3. Sharma S. Loss of Ice Cover, Shifting Phenology, and More Extreme Events in Northern Hemisphere Lakes / S. Sharma, D.C. Richardson, R.I. Woolway [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. — 2021. — Vol. 126. — № 10. — P. e2021JG006348. — DOI: 10.1029/2021JG006348.
4. Zhang S. Remote sensing of lake ice phenology in Alaska / S. Zhang, T.M. Pavelsky, C.D. Arp [et al.] // *Environmental Research Letters*. — 2021. — Vol. 16. — № 6. — P. 064007. — DOI: 10.1088/1748-9326/abf965.
5. Sun L. Analysis of Ice Phenology of Middle and Large Lakes on the Tibetan Plateau / L. Sun, B. Wang, Y. Ma [et al.] // *Sensors*. — 2023. — Vol. 23. — № 3. — P. 1661. — DOI: 10.3390/s23031661.
6. Zhang S. Remote Sensing of Lake Ice Phenology across a Range of Lakes Sizes, ME, USA / S. Zhang, T.M. Pavelsky // *Remote Sensing*. — 2019. — Vol. 11. — № 14. — P. 1718. — DOI: 10.3390/rs11141718.
7. Sojka M. Use of Landsat Satellite Images in the Assessment of the Variability in Ice Cover on Polish Lakes / M. Sojka, M. Ptak, S. Zhu // *Remote Sensing*. — 2023. — Vol. 15. — № 12. — P. 3030. — DOI: 10.3390/rs15123030.
8. Cai Y. Variations of Lake Ice Phenology on the Tibetan Plateau From 2001 to 2017 Based on MODIS Data / Y. Cai, C. Ke, X. Li [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. — 2019. — Vol. 124. — № 2. — P. 825–843. — DOI: 10.1029/2018JD028993.
9. Guo L. Uncertainty and Variation of Remotely Sensed Lake Ice Phenology across the Tibetan Plateau / L. Guo, Y. Wu, H. Zheng [et al.] // *Remote Sensing*. — 2018. — Vol. 10. — № 10. — P. 1534. — DOI: 10.3390/rs10101534.
10. Баклагин В.Н. Совершенствование метода дешифрирования космических снимков Больших Озер на классы «Вода»-«Лед» / В.Н. Баклагин // *Современные проблемы науки и образования*. — 2015. — № 2–3. — P. 290.
11. Baklagin V.N. Influence of meteorological conditions on the formation of ice regime of the Lake Onega / V.N. Baklagin // *Ice and Snow*. — 2019. — Vol. 59. — № 4. — P. 546–556. — DOI: 10.15356/2076-6734-2019-4-413.
12. Pointner G. The role of lake size and local phenomena for monitoring ground-fast lake ice / G. Pointner, A. Bartsch, B.C. Forbes [et al.] // *International Journal of Remote Sensing*. — 2019. — Vol. 40. — № 3. — P. 832–858. — DOI: 10.1080/01431161.2018.1519281.
13. Liu C. Fine-Resolution Mapping of Pan-Arctic Lake Ice-Off Phenology Based on Dense Sentinel-2 Time Series Data / C. Liu, H. Huang, F. Hui [et al.] // *Remote Sensing*. — 2021. — Vol. 13. — № 14. — P. 2742. — DOI: 10.3390/rs13142742.
14. Wang X. Continuous Loss of Global Lake Ice Across Two Centuries Revealed by Satellite Observations and Numerical Modeling / X. Wang, L. Feng, W. Qi [et al.] // *Geophysical Research Letters*. — 2022. — Vol. 49. — № 12. — P. e2022GL099022. — DOI: 10.1029/2022GL099022.
15. MODIS-based Daily Lake Ice Extent and Coverage dataset for Tibetan Plateau / Y. Qiu, P. Xie, M. Leppäranta [et al.] // *Big Earth Data*. — 2019. — Vol. 3. — № 2. — P. 170–185. — DOI: 10.1080/20964471.2019.1631729.
16. Huo P. Monitoring Ice Phenology in Lake Wetlands Based on Optical Satellite Data: A Case Study of Wuliangsu Lake / P. Huo, P. Lu, B. Cheng [et al.] // *Water*. — 2022. — Vol. 14. Monitoring Ice Phenology in Lake Wetlands Based on Optical Satellite Data. — № 20. — P. 3307. — DOI: 10.3390/w14203307.
17. Zhang X. An Automatic Method to Detect Lake Ice Phenology Using MODIS Daily Temperature Imagery / X. Zhang, K. Wang, G. Kirillin // *Remote Sensing*. — 2021. — Vol. 13. — № 14. — P. 2711. — DOI: 10.3390/rs13142711.
18. Wang X. High-Resolution Mapping of Ice Cover Changes in Over 33,000 Lakes Across the North Temperate Zone / X. Wang, L. Feng, L. Gibson [et al.] // *Geophysical Research Letters*. — 2021. — Vol. 48. — № 18. — P. e2021GL095614. — DOI: 10.1029/2021GL095614.
19. Kupriaynov M.A. The Modelling Study of Area Measurement Accuracy Using Remote Sensing Techniques / M.A. Kupriaynov, G.A. Kochergin, Y.M. Polishchuk // *Yugra State University Bulletin*. — 2018. — Vol. 14. — № 3. — P. 25–34. — DOI: 10.17816/byusu2018025-34.
20. Feyisa G.L. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery / G.L. Feyisa, H. Meilby, R. Fensholt [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. — 2014. — Vol. 140. Automated Water Extraction Index. — P. 23–35. — DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.029.
21. Hall D. MODIS/Terra CGF Snow Cover Daily L3 Global 500m SIN Grid, Version 61 / D. Hall, G. Riggs. — NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2020. — URL: <https://nsidc.org/data/MOD10A1F/versions/61> (accessed: 15.11.2024).
22. Salomonson V.V. Development of the Aqua MODIS NDSI fractional snow cover algorithm and validation results / V.V. Salomonson, I. Appel // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. — 2006. — Vol. 44. — № 7. — P. 1747–1756. — DOI: 10.1109/TGRS.2006.876029.
23. Hall D.K. Evaluation of MODIS and VIIRS cloud-gap-filled snow-cover products for production of an Earth science data record / D.K. Hall, G.A. Riggs, N.E. DiGirolamo [et al.] // *Hydrology and Earth System Sciences*. — 2019. — Vol. 23. — № 12. — P. 5227–5241. — DOI: 10.5194/hess-23-5227-2019.
24. ERA5 post-processed daily statistics on single levels from 1940 to present / C3S. — ECMWF, 2024. — URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/doi/10.24381/cds.4991cf48> (accessed: 28.12.2024).

Список литературы на английском языке / References in English

1. Newton A.M.W. Climate change and Northern Hemisphere lake and river ice phenology from 1931—2005 / A.M.W. Newton, D.J. Mullan // *The Cryosphere*. — 2021. — Vol. 15. — № 5. — P. 2211–2234. — DOI: 10.5194/tc-15-2211-2021.
2. Su L. Variation in Ice Phenology of Large Lakes over the Northern Hemisphere Based on Passive Microwave Remote Sensing Data / L. Su, T. Che, L. Dai // *Remote Sensing*. — 2021. — Vol. 13. — № 7. — P. 1389. — DOI: 10.3390/rs13071389.
3. Sharma S. Loss of Ice Cover, Shifting Phenology, and More Extreme Events in Northern Hemisphere Lakes / S. Sharma, D.C. Richardson, R.I. Woolway [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. — 2021. — Vol. 126. — № 10. — P. e2021JG006348. — DOI: 10.1029/2021JG006348.
4. Zhang S. Remote sensing of lake ice phenology in Alaska / S. Zhang, T.M. Pavelsky, C.D. Arp [et al.] // *Environmental Research Letters*. — 2021. — Vol. 16. — № 6. — P. 064007. — DOI: 10.1088/1748-9326/abf965.
5. Sun L. Analysis of Ice Phenology of Middle and Large Lakes on the Tibetan Plateau / L. Sun, B. Wang, Y. Ma [et al.] // *Sensors*. — 2023. — Vol. 23. — № 3. — P. 1661. — DOI: 10.3390/s23031661.
6. Zhang S. Remote Sensing of Lake Ice Phenology across a Range of Lakes Sizes, ME, USA / S. Zhang, T.M. Pavelsky // *Remote Sensing*. — 2019. — Vol. 11. — № 14. — P. 1718. — DOI: 10.3390/rs11141718.
7. Sojka M. Use of Landsat Satellite Images in the Assessment of the Variability in Ice Cover on Polish Lakes / M. Sojka, M. Ptak, S. Zhu // *Remote Sensing*. — 2023. — Vol. 15. — № 12. — P. 3030. — DOI: 10.3390/rs15123030.
8. Cai Y. Variations of Lake Ice Phenology on the Tibetan Plateau From 2001 to 2017 Based on MODIS Data / Y. Cai, C. Ke, X. Li [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. — 2019. — Vol. 124. — № 2. — P. 825–843. — DOI: 10.1029/2018JD028993.
9. Guo L. Uncertainty and Variation of Remotely Sensed Lake Ice Phenology across the Tibetan Plateau / L. Guo, Y. Wu, H. Zheng [et al.] // *Remote Sensing*. — 2018. — Vol. 10. — № 10. — P. 1534. — DOI: 10.3390/rs10101534.
10. Baklagin V.N. Sovershenstvovanie Metoda Deshifrirovaniya Kosmicheskikh Snimkov Bol'shikh Ozer Na Klassy "Voda"- "Led" [Improvement of the method of interpretation of space images of the Great Lakes into 'Water'-'Ice' classes] / V.N. Baklagin // *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education]. — 2015. — № 2–3. — P. 290. [in Russian]
11. Baklagin V.N. Influence of meteorological conditions on the formation of ice regime of the Lake Onega / V.N. Baklagin // *Ice and Snow*. — 2019. — Vol. 59. — № 4. — P. 546–556. — DOI: 10.15356/2076-6734-2019-4-413.
12. Pointner G. The role of lake size and local phenomena for monitoring ground-fast lake ice / G. Pointner, A. Bartsch, B.C. Forbes [et al.] // *International Journal of Remote Sensing*. — 2019. — Vol. 40. — № 3. — P. 832–858. — DOI: 10.1080/01431161.2018.1519281.
13. Liu C. Fine-Resolution Mapping of Pan-Arctic Lake Ice-Off Phenology Based on Dense Sentinel-2 Time Series Data / C. Liu, H. Huang, F. Hui [et al.] // *Remote Sensing*. — 2021. — Vol. 13. — № 14. — P. 2742. — DOI: 10.3390/rs13142742.
14. Wang X. Continuous Loss of Global Lake Ice Across Two Centuries Revealed by Satellite Observations and Numerical Modeling / X. Wang, L. Feng, W. Qi [et al.] // *Geophysical Research Letters*. — 2022. — Vol. 49. — № 12. — P. e2022GL099022. — DOI: 10.1029/2022GL099022.
15. MODIS-based Daily Lake Ice Extent and Coverage dataset for Tibetan Plateau / Y. Qiu, P. Xie, M. Leppäranta [et al.] // *Big Earth Data*. — 2019. — Vol. 3. — № 2. — P. 170–185. — DOI: 10.1080/20964471.2019.1631729.
16. Huo P. Monitoring Ice Phenology in Lake Wetlands Based on Optical Satellite Data: A Case Study of Wuliangsu Lake / P. Huo, P. Lu, B. Cheng [et al.] // *Water*. — 2022. — Vol. 14. Monitoring Ice Phenology in Lake Wetlands Based on Optical Satellite Data. — № 20. — P. 3307. — DOI: 10.3390/w14203307.
17. Zhang X. An Automatic Method to Detect Lake Ice Phenology Using MODIS Daily Temperature Imagery / X. Zhang, K. Wang, G. Kirillin // *Remote Sensing*. — 2021. — Vol. 13. — № 14. — P. 2711. — DOI: 10.3390/rs13142711.
18. Wang X. High-Resolution Mapping of Ice Cover Changes in Over 33,000 Lakes Across the North Temperate Zone / X. Wang, L. Feng, L. Gibson [et al.] // *Geophysical Research Letters*. — 2021. — Vol. 48. — № 18. — P. e2021GL095614. — DOI: 10.1029/2021GL095614.
19. Kupriaynov M.A. The Modelling Study of Area Measurement Accuracy Using Remote Sensing Techniques / M.A. Kupriaynov, G.A. Kochergin, Y.M. Polishchuk // *Yugra State University Bulletin*. — 2018. — Vol. 14. — № 3. — P. 25–34. — DOI: 10.17816/byusu2018025-34.
20. Feyisa G.L. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery / G.L. Feyisa, H. Meilby, R. Fensholt [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. — 2014. — Vol. 140. Automated Water Extraction Index. — P. 23–35. — DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.029.
21. Hall D. MODIS/Terra CGF Snow Cover Daily L3 Global 500m SIN Grid, Version 61 / D. Hall, G. Riggs. — NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2020. — URL: <https://nsidc.org/data/MOD10A1F/versions/61> (accessed: 15.11.2024).
22. Salomonson V.V. Development of the Aqua MODIS NDSI fractional snow cover algorithm and validation results / V.V. Salomonson, I. Appel // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. — 2006. — Vol. 44. — № 7. — P. 1747–1756. — DOI: 10.1109/TGRS.2006.876029.
23. Hall D.K. Evaluation of MODIS and VIIRS cloud-gap-filled snow-cover products for production of an Earth science data record / D.K. Hall, G.A. Riggs, N.E. DiGirolamo [et al.] // *Hydrology and Earth System Sciences*. — 2019. — Vol. 23. — № 12. — P. 5227–5241. — DOI: 10.5194/hess-23-5227-2019.
24. ERA5 post-processed daily statistics on single levels from 1940 to present / C3S. — ECMWF, 2024. — URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/doi/10.24381/cds.4991cf48> (accessed: 28.12.2024).