

Геоинформатика. 2024. № 4. С. 29–38.
Geoinformatika. 2024;(4):29–38.

Применение ГИС-технологий

Научная статья
 УДК 551.34:551.58
<https://doi.org/10.47148/1609-364X-2024-4-29-38>

Система прогнозирования динамики озер Российской Арктики по спутниковым снимкам на основе NextGIS Web

© 2024 г. — Ю.М. Полищук^{1, а)}, Е.С. Сокол^{1, б)}, А.А. Тогачев^{1, в)}, В.Ю. Полищук^{2, д)}, М.А. Куприянов^{1, е)}, А.В. Мельников^{1, ф)}

¹ Югорский НИИ информационных технологий; Ханты-Мансийск, Россия

² Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН; Томск, Россия

^{а)}yupolishchuk@gmail.com, ^{б)}eugen137@gmail.com, ^{в)}togachevaa@uriit.ru, ^{д)}liquid_metal@mail.ru,

^{е)}kupriyanovma@uriit.ru, ^{ф)}MelnikovAV@uriit.ru

Аннотация: Статья посвящена важной геоэкологической проблеме прогнозирования динамики термокарстовых озер Российской Арктики как интенсивных источников природной эмиссии парниковых газов, которая рассматривается в качестве одного из факторов современных климатических изменений. Целью работы явилось рассмотрение вопросов разработки системы прогнозирования динамики площадей озер с использованием алгоритмов энтропийно-рандомизированного машинного обучения и средств геоинформационной системы NextGIS Web. Рассмотрены ключевые этапы обработки информации для прогнозирования динамики озер. В качестве ретроспективной информации для прогнозирования используются данные дистанционных измерений площадей термокарстовых озер в арктической зоне России, полученные по спутниковым снимкам Landsat за период нескольких последних десятилетий, и климатические данные, определенные путем реанализа метеоданных за тот же период. Система реализована на основе геоинформационной системы NextGIS Web, позволяющей включать прикладные программы рандомизированного моделирования с использованием языка Python.

Ключевые слова: *машинное обучение; геоинформационная система; рандомизированное моделирование; прогнозирование; информационная технология; динамика термокарстовых озер; климатические изменения.*

Для цитирования: Полищук Ю.М., Сокол Е.С., Тогачев А.А., Полищук В.Ю., Куприянов М.А., Мельников А.В. Система прогнозирования динамики озер Российской Арктики по спутниковым снимкам на основе NextGIS Web // Геоинформатика. — 2024. — № 4. — С. 29–38. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2024-4-29-38>.

Application of GIS-technologies

Original article

System for forecasting the lake dynamics in Russian Arctic using satellite images based on NextGIS Web

© 2024 — Yu.M. Polishchuk^{1, а)}, E.S. Sokol^{1, б)}, A.A. Togachev^{1, в)}, V.Yu. Polishchuk^{2, д)}, M.A. Kupriyanov^{1, е)}, A.V. Melnikov^{1, ф)}

¹ Ugra Research Institute of Information Technologies; Khanty-Mansiysk, Russia

² Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS; Tomsk, Russia

^{а)}plotnikova-as-cepl@yandex.ru, ^{б)}khamedov.vladimir@mail.ru, ^{в)}lena.arkhiptseva@mail.ru, ^{д)}podols_kate@mail.ru,

^{е)}narykovaanna@yandex.ru, ^{ф)}poxpox@mail.ru

Abstract: The article discusses the important geoecological problem of predicting the dynamics of thermokarst lakes in the Russian Arctic as intensive sources of natural greenhouse gas emissions, which is considered as one of the factors of current climate change. The purpose of the work is to consider the development of a system for forecasting the dynamics of lake areas using entropy-randomized machine learning algorithms and tools of the NextGIS Web geographic information system. The procedure for processing information to predict the dynamics of lakes is considered. Data from remote measurements of the areas of thermokarst lakes in the Arctic zone of Russia, obtained from Landsat satellite images over the past several decades, and climate data determined by reanalysis of meteorological data for the same period are used as retrospective information for forecasting. The system is implemented on the basis of the NextGIS Web geographic information system, which allows the inclusion of randomized modeling applications using the Python language.

Key words: *machine learning; geoinformation system; randomized modeling; forecasting; information technology; thermokarst lake dynamics; climate change.*

For citation: Polishchuk Yu.M., Sokol E.S., Togachev A.A., Polishchuk V.Yu., Kupriyanov M.A., Melnikov A.V. System for forecasting the lake dynamics in Russian Arctic using satellite images based on NextGIS Web. *Geoinformatika*. 2024;(4):29–38. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2024-4-29-38>. In Russ.

Введение

Повышение глобальной температуры на планете в условиях продолжающегося потепления климата требует разработки эффективных мер по ограничению ожидаемого роста среднегодовой температуры Земли в ближайшие десятилетия. Для разработки таких мер необходимы достоверные прогнозы объемов эмиссии парниковых газов, основанные на реальных данных о пространственно-временной динамике полей термокарстовых озер как важных источников эмиссии природного метана и углекислого газа на территории российских регионов. Наибольший вклад в глобальную эмиссию парниковых газов вносят территории арктических регионов, что подтверждают результаты многочисленных экспериментальных исследований в разных северных регионах, например [1–3].

Так как, согласно [4], глубина термокарстовых озер независимо от их размеров приблизительно одинакова, объемы озерной эмиссии парниковых газов в атмосферу на отдельной территории определяются суммарной площадью озер на этой территории. Поэтому важной с точки зрения прогнозирования объемов озерной эмиссии парниковых газов в атмосферу является информация в виде временных рядов данных о площади термокарстовых озер на территориях различных регионов Арктики, которую вследствие труднодоступности арктических территорий получают в настоящее время по спутниковым снимкам. В последние годы дистанционные исследования динамики площадей термокарстовых озер с использованием спутниковых снимков проведены в Сибири, на Аляске, в Скандинавии и в других северных регионах [5–8].

Для прогнозирования динамики площадей термокарстовых озер в Арктике могут использоваться разные подходы, в частности, основанные на статистических моделях, например регрессионная и авторегрессионная модели. С использованием геомитационного подхода в [9] получены прогнозные оценки изменения размеров озер в зоне мерзлоты Западной Сибири. Перспективным для разработки эффективной модели прогнозирования объемов накопления парниковых газов в арктических озерах, по мнению авторов статьи, представляется подход, основанный на методах рандомизированного машинного обучения [10, 11]. В [12] разработан алгоритм энтропийно-рандомизированного моделирования динамики площадей озер с использованием временных рядов данных о площади озер, о среднегодовой температуре воздуха и годовой сумме осадков, получаемых за период нескольких последних десятилетий на определенной территории. Как показал опыт использования разработанного в [12] энтропийно-рандомизированного алгоритма для прогнозирования динамики площадей термокарстовых озер на примере арктической территории Западной Сибири, такой подход позволяет получать состоятельные и эффективные прогноз-

ные оценки динамики площадей озер при достаточно ограниченных по объему ретроспективных данных, что крайне важно в задачах прогнозирования динамики площадей термокарстовых озер.

В работе [12] прогнозные оценки динамики площадей озер на территории мерзлоты Западной Сибири были получены средствами MATLAB R2019a. С использованием таких средств получение прогнозных оценок обширной арктической зоны, которая в условиях России протянулась от Кольского полуострова до Чукотки с чрезвычайно широким разнообразием природных и климатических условий, превращается в достаточно трудоемкую задачу. С целью повышения оперативности возникает необходимость разработки системы рандомизированного прогнозирования в идеологии информационно-моделирующих систем [13], позволяющих интегрировать разнородную информацию о площадях озер и климатических параметрах на основе применения современных геоинформационных систем и ГИС-технологий. В настоящее время такие системы, ориентированные на прогнозирование динамики термокарстовых озер на арктических территориях с использованием процедур энтропийно-рандомизированного моделирования, как в нашей стране, так и в мире отсутствуют.

В связи с изложенным целью работы явилось рассмотрение вопросов создания системы прогнозирования пространственно-временной динамики озерных полей на арктических территориях с использованием рандомизированного подхода, ориентированного на применение ретроспективных данных о климатических параметрах и данных о площадях термокарстовых озер, получаемых по космическим снимкам.

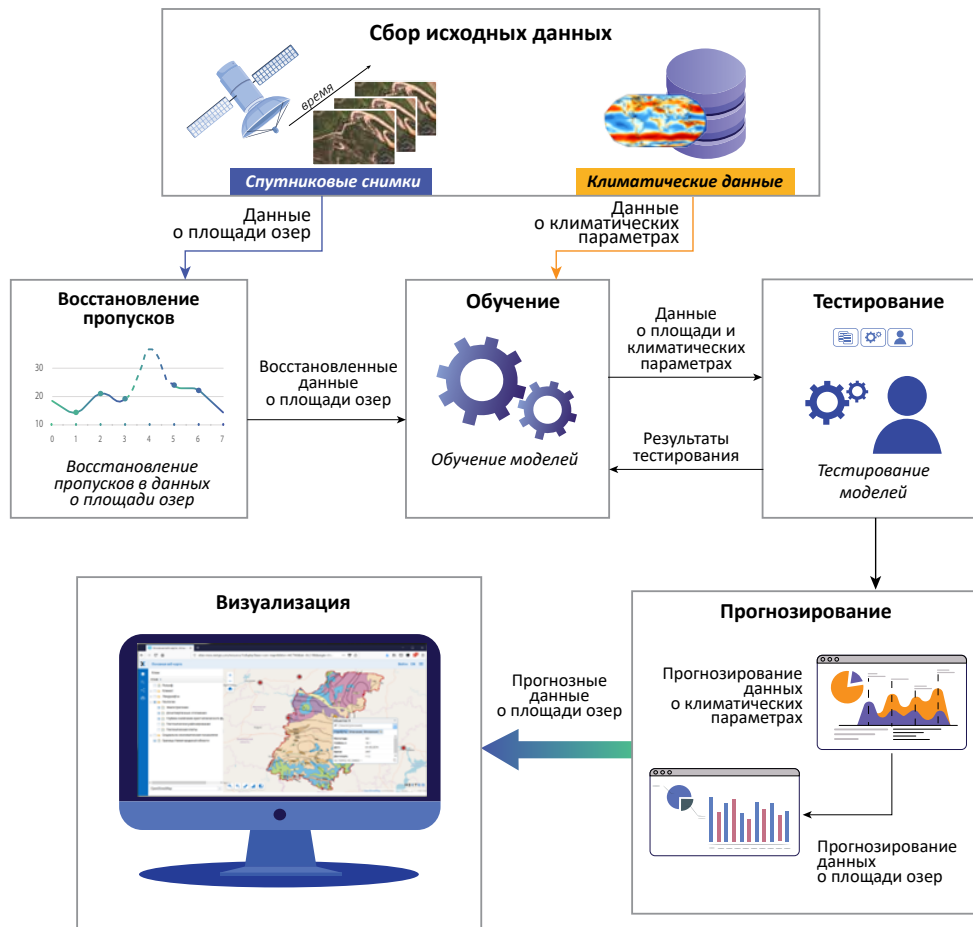
Обобщенная схема обработки данных для прогнозирования динамики площадей озер

Схема на рис. 1 представляет последовательность ключевых этапов обработки данных для прогнозирования динамики площадей озер. Ниже приведена краткая характеристика отдельных этапов схемы обработки данных.

Сбор исходных данных представляет этап получения исторических (ретроспективных) данных о площади озер и климатических параметрах в объеме, необходимом для прогнозирования динамики озер на территориях разных арктических регионов России. Исторические данные для прогнозирования динамики озер представляют собой временные ряды данных о средних (по территории исследуемого региона) значениях площадей озер, о среднегодовых значениях температуры воздуха и годовых сумм осадков, полученных за период нескольких последних десятилетий. Временные ряды данных о площадях озер являются результатами дистанционных измерений по космическим снимкам летнего периода, когда озера освобождают-

Рис. 1. Обобщенная схема обработки данных для прогнозирования

Fig. 1. Generalized diagram of the data processing for prediction



ся от снежно-ледового покрова. Временные ряды данных о среднегодовой температуре и годовой сумме осадков на территории каждого арктического региона получают с использованием системы реанализа ERA-5 (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=overview>).

Для задач рандомизированного прогнозирования динамики площадей термокарстовых озер Российской Арктики исторические данные о площадях озер основаны на результатах измерения площадей озер по спутниковым изображениям Landsat за период 1985–2021 гг. Вопросы получения этих данных по спутниковым снимкам Landsat рассматриваются в [5] на примере территории Таймырской тундры. Особенностью данных о площадях озер является наличие пропусков во временных рядах этих данных, вызванных отсутствием в некоторые годы безоблачных спутниковых снимков. Ввиду большого числа пасмурных дней в летний период на северных территориях удается получить достаточно ограниченный набор безоблачных снимков, пригодных для определения площадей озер, что и

является причиной возникновения пропущенных значений во временных рядах данных о площади озер в отдельные годы.

В таблице представлен фрагмент массива данных о площади озер S , среднегодовой температуре T и годовой сумме осадков R на территории Западной Сибири, иллюстрирующий наличие пропущенных значений во временных рядах данных о площади озер.

Восстановление пропусков в данных о площадях озер является необходимой процедурой для прогнозирования динамики площади озер. Существуют различные методы восстановления пропусков в массивах данных, например Multivariate imputer [14]. Однако для восстановления пропущенных значений временного ряда данных о площадях озер, число пропусков в которых может составлять значительную долю имеющихся измеренных значений, наиболее перспективным, как показано в [15], оказался подход, основанный на рандомизированном моделировании, который позволяет восстанавливать пропуски во временных рядах площадей озер с использованием данных о климатических

Таблица. Фрагмент таблицы данных о площади озер, температуре и осадках

Table. Fragment of a table of data on lake area, temperature and precipitation

Данные/Data	Годы/Years						
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
S, га	62,36	–	62,31	–	–	–	66,96
T, °C	–2	–2,06	–0,48	–1,8	0,44	–2,78	0,14
R, мм	430,2	520,15	429,2	338,4	343,9	222	325,4

параметрах (температура и осадки), полученных за тот же период наблюдений.

Обучение моделей — это процесс «настройки» параметров модели на основе исторических данных о площадях термокарстовых озер и климатических параметрах на территории разных арктических регионов с использованием энтропийно-рандомизированных алгоритмов [12]. В случае рандомизированного прогнозирования обучение прогнозных моделей предполагает, согласно [10, 12], определение функций плотности распределения вероятностей (ПРВ) случайных параметров моделей рандомизированного прогнозирования. Более подробно эти вопросы рассмотрены в [12].

Тестирование моделей — этап, основной целью которого, согласно [12], является оценка достоверности построенных рандомизированных прогнозных моделей для определения возможности их практического применения для задач прогнозирования динамики размеров озер на разных арктических территориях. На этом этапе модели тестируются на независимом наборе данных, не использовавшихся на этапе обучения модели, что позволяет получить объективную оценку прогнозных способностей моделей. При тестировании моделей рандомизированного прогнозирования могут применяться различные метрики, позволяющие оценивать их точностные характеристики. Наиболее часто используются такие метрики, как средняя абсолютная ошибка (MAE), средняя квадратичная ошибка (MSE), корень из средней квадратичной ошибки (RMSE). В нашем случае рандомизированного прогнозирования в качестве метрики тестирования выступает средняя квадратичная ошибка MSE. Если результаты тестирования удовлетворяют требованиям точности, происходит переход на этап прогнозирования, в противном случае модель возвращается на дообучение.

На этапе **прогнозирования** в рамках рандомизированного подхода генерируются значения случайных параметров моделей в соответствии с функциями плотности распределения вероятностей ПРВ, определенными на этапе обучения моделей. Этот процесс выполняется с помощью процедуры Монте-Карло. На его основе формируется семейство возможных траекторий. В качестве прогнозного сценария используется средняя траектория, полученная путем усреднения семейства возможных траекторий. Отметим, что в рамках рандомизированного подхода этап прогнозирования состоит из двух подэтапов. На первом из них выполняется прогнозирование значений климатических параметров в прогнозный период, которые необходимы для получения прогнозных значений площади озер на втором подэтапе.

Визуализация полученных результатов, представляющая собой финальный этап работы системы прогнозирования динамики площадей озер, выполняется с использованием средств геоинформационной системы NextGIS Web. Для наглядного представления прогнозных оценок используется построение графиков временных рядов исторических данных о площадях озер и климатических параметрах на основе исторических данных и прогнозных значений. На этом этапе проводится дополнительная валидация полученных прогнозных значений.

Реализация системы прогнозирования

Представленная в статье система рандомизированного прогнозирования (СРП), реализующая схему обработки данных на рис. 1, создана на основе современного подхода к разработке программного обеспечения — микросервисной архитектуры [16]. На рис. 2 изображена схема взаимодействия компонентов СРП. Ниже приводится краткое описание компонентов системы и рассматриваются вопросы их реализации.

Рис. 2. Схема взаимодействия компонентов СРП

Fig. 2. Scheme of interaction between the components of randomized prediction system (RPS)



Интерфейс пользователя, реализованный на основе серверной геоинформационной системы NextGIS Web [17], предоставляет широкий спектр функций для работы с геоданными, в том числе создание и отображение цифровых карт, взаимодействие с внешними программами, визуализация данных в виде графиков, загрузка данных о площадях озер и климатических параметрах в удобных для пользователя форматах. Некоторые из перечисленных функций, отсутствовавшие в штатной версии NextGIS Web, были осуществлены в процессе разработки СРП в ее *адаптированной (к задачам СРП) версии*. Система NextGIS Web, используя сервер базы данных Postgre, обеспечивает связь с остальными компонентами СРП (*вычислительными узлами и др.*) посредством API (от англ. Application programming interface), который на рис. 2 и далее в тексте называется *программным интерфейсом*.

Сервер базы данных на основе PostgreSQL [18] и расширения PostGIS [19] служит для хранения геоданных, предоставляя возможности для пространственного анализа и обработки данных. Это ядро системы хранения данных СРП, удовлетворяющее требованиям к эффективности и безопасности.

Вычислительные узлы (ВУ) СРП, представляющие собой автономно исполняемые пакеты программного обеспечения, предназначены для реализации **модулей прогнозирования и подготовки данных**. Для обеспечения их функционирования в схему на рис. 2 включены следующие компоненты СРП:

- *программный интерфейс* связи с NextGIS Web для обмена данными, необходимыми для прогнозирования. Это ключевой элемент СРП, обеспечивающий взаимодействие между пользовательским интерфейсом и другими компонентами системы прогнозирования;

- *сервис управления задачами* для вычислительных узлов, обеспечивающий реализацию алгоритма прогнозирования динамики площадей озер и распределение задач между ВУ;

- *система управления очередью сообщений* ApacheKafka [20] используется для передачи сообщений между компонентами СРП. Наличие открытого исходного кода позволяет гибко настраивать и интегрировать систему в рамках разработанной архитектуры;

- *службная база данных* с нереляционной структурой, созданная на основе MongoDB [21] и предназначенная для хранения параметров задач и временных данных, используемых в процессе прогнозирования. Обеспечивает гибкое управление данными с целью повышения производительности выполнения задач прогнозирования.

Отметим особенности реализации СРП. Все вычислительные компоненты реализованы на языке программирования Python 3.10. Интерфейс пользователя, созданный на основе NextGIS Web для приема, обработки и визуализации данных СРП, полученных с помощью программного интерфейса, реализован с использованием библиотеки React на языке программирования JavaScript.

Ниже приводятся примеры визуализации исторических данных о площадях озер и климатических параметрах и результатов прогнозирования динамики площадей озер на разных территориях Российской Арктики с использованием средств разработанной СРП. На рис. 3 представлена для иллюстрации цифровая карта, созданная в СРП средствами NextGIS Web, отображающая графики временных рядов данных о площадях озер и температуре воздуха на территориях двух арктических регионов — в Таймырской и Северо-Восточной тундрах. На рис. 3А представлены графики временных рядов данных о площади озер и среднегодовой температуры (выделены красным и зеленым цветом соответственно) на территориях Таймыра (верхняя пара) и Северо-Восточной тундры (нижняя пара). На рис. 3В представлен фрагмент картосхемы размещения исследованных территорий Российской Арктики. На картосхеме стрелками указаны территории Таймырской и Северо-Восточной (север Якутии) тундры, к которым относятся упоминаемые выше данные на рис. 3А.

На рис. 4 приведены цифровые карты, созданные средствами СРП, демонстрирующие результаты прогнозирования динамики площадей озер на

территориях Кольской и Гыданской тундр. В левых частях рисунков (см. рис. 4) красным цветом отображены исторические данные за период 1985–2021 гг., а вишневым цветом — прогнозные данные о площадях озер за период 2022–2036 гг., полученные средствами СРП. Справа на рисунках представлены фрагменты картосхемы, показывающие размещение соответствующих территорий Кольской и Гыданской арктических тундр. Как видно из рис. 4, прогнозные данные на обеих территориях показывают тенденцию сокращения в среднем площадей озер.

Заключение

Рассмотрены вопросы создания системы прогнозирования динамики полей термокарстовых озер как источников выбросов парниковых газов в условиях современных климатических изменений на территории арктической зоны России с использованием рандомизированного подхода. Описаны ключевые этапы обработки данных для прогнозирования системы рандомизированного прогнозирования, ориентированной на использование алгоритмов энтропийно-рандомизированного моделирования, позволяющих вычислять прогнозные оценки пространственно-временной динамики

Рис. 3. Пример визуализации средствами NextGIS Web исторических данных для прогноза (А) и картосхема размещения исследованных территорий в Российской Арктике (В)

Fig. 3. An example of visualization using NextGIS Web of historical data for forecasting (A) and a map diagram of the location of the territories under study in Russian Arctic (B)

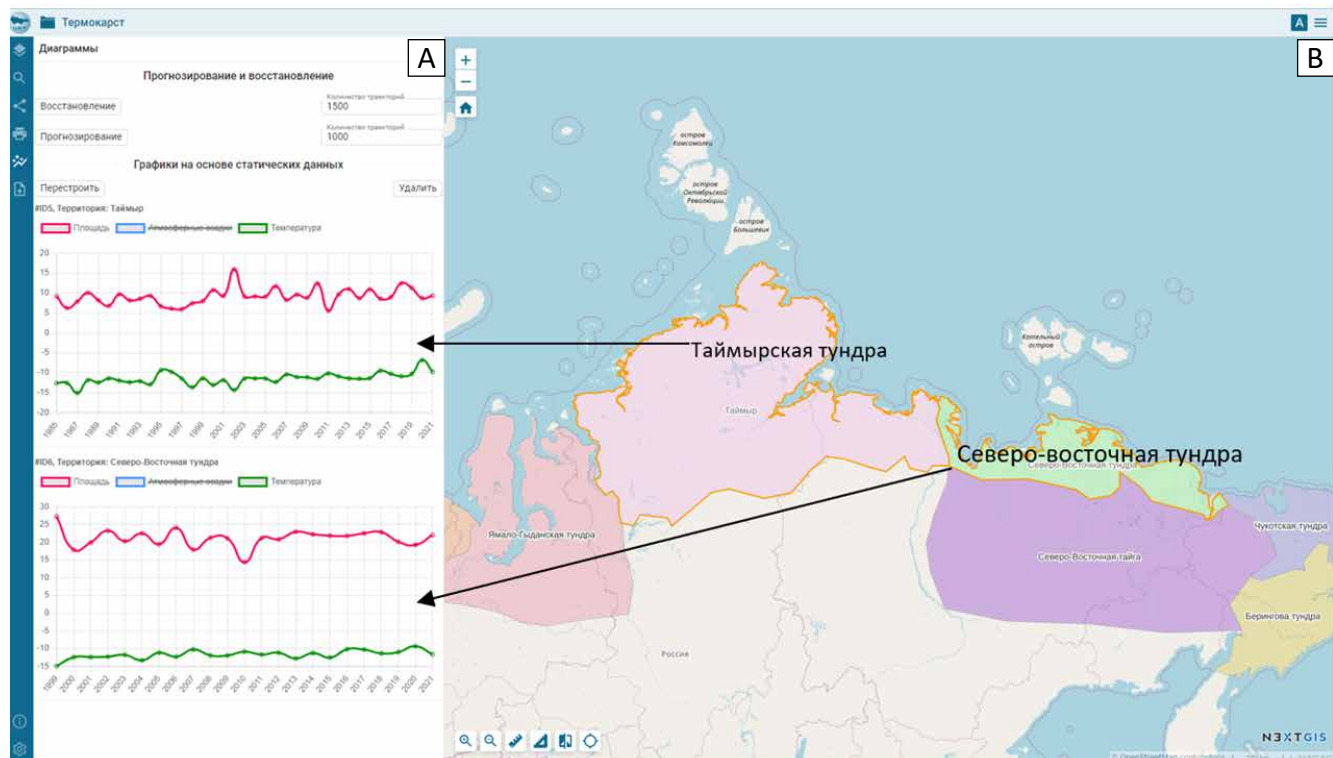
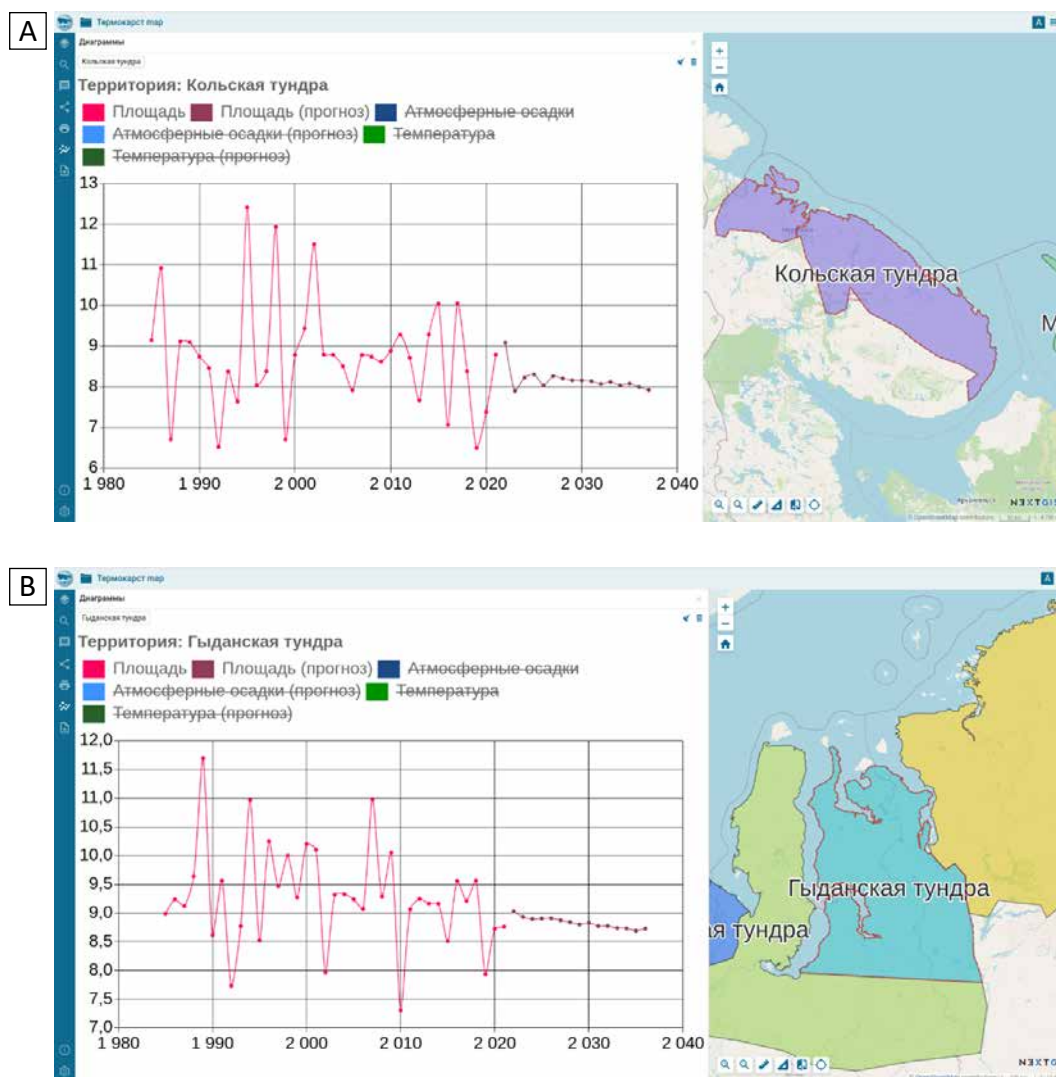


Рис. 4. Примеры визуализации средствами NextGIS Web исторических данных и результатов прогнозирования динамики средней площади озер Кольской (А) и Гыданской (В) тундр на период до 2036 г.

Fig. 4. Examples of NextGIS Web visualisation of historical data and results of forecasting the dynamics of the average area of lakes in the Kola (A) and Gydan (B) tundras for the period up to 2036



площадей термокарстовых озер с использованием данных о площадях озер и климатических параметрах на территории разных регионов Российской Арктики.

Разработанная СРП реализована на основе современной веб-геоинформационной системы NextGIS Web, позволяющей включать прикладные программы энтропийно-рандомизированного моделирования на языке Python. Сервер базы данных в составе СРП, основанный на PostgreSQL, служит для хранения геоданных, предоставляя широкий спектр возможностей для пространственного ана-

лиза и обработки данных. Используемые для прогнозирования данные в виде временных рядов средних значений площади термокарстовых озер арктической зоны, загружаемые в базу данных СРП, основаны на дистанционных измерениях площадей озер по космическим снимкам Landsat последних десятилетий. Оперативно формируемые с помощью представленной в статье СРП прогнозные оценки динамики площадей озер на арктических территориях могут быть использованы при прогнозировании вклада эмиссии парниковых газов из озер Российской Арктики в глобальный парниковый эффект.

Работа проводилась при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда по проекту № 22-11-20023.

Список источников

1. Zabelina S.A., Shirokova L.S., Klimov S.I., Chupakov A.V., Lim A.G., Polishchuk Yu.M., Polishchuk V.Yu., Bogdanov A.N., Muratov I.N., Guerin F., Karlsson J., Pokrovsky O.S. Carbon Emission from Thermokarst Lakes in NE European Tundra // *Limnology and Oceanography*. –2021. – Vol. 66. – Iss. S1: Biogeochemistry and ecology across Arctic aquatic ecosystems in the face of change. – P. S216–S230. DOI: 10.1002/lno.11560.
2. Anthony K.W., Schneider von Deimling T., Nitze I., Frohling S., Emond A., Daanen R., Anthony P., Lindgren P., Jones B., Grosse G. 21st-century modeled permafrost carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes // *Nature Communications*. – 2018. – Vol. 9. – 3262. DOI: 10.1038/s41467-018-05738-9.
3. Голубятников Л.Л., Маммарелла И. Потоки метана в атмосферу из озер Фенноскандии // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2018. – Т. 54. – № 6. – С. 672–683. DOI: 10.1134/S000235151806007X.
4. Polishchuk Y.M., Bogdanov A.N., Muratov I.N., Polishchuk V.Y., Lim A., Manasypov R.M., Shirokova L.S., Pokrovsky O.S. Minor contribution of small thaw ponds to the pools of carbon and methane in the inland waters of the permafrost-affected part of the Western Siberian lowland // *Environmental Research Letters*. – 2018. – Vol. 13. – No. 4. – 045002. DOI: 10.1088/1748-9326/aab046.
5. Полищук В.Ю., Куприянов М.А., Полищук Ю.М. Анализ взаимосвязи изменений климата и динамики термокарстовых озер в арктической зоне Таймыра // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2021. – Т. 18. – № 5. – С. 193–200. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-193-200.
6. Викторов А.С., Капралова В.Н., Орлов Т.В., Трапезникова О.Н., Архипова М.В., Березин П.В., Зверев А.В., Панченко Е.Н., Садков С.А. Закономерности распределения размеров термокарстовых озер // *Доклады Академии наук*. – 2017. – Т. 474. – № 5. – С. 625–627. DOI: 10.7868/S0869565217170212.
7. 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.
8. Кравцова В.И., Быстрова А.Г. Изменение размеров термокарстовых озер в различных районах России за последние 30 лет // *Криосфера Земли*. – 2009. – Т. 13. – № 2. – С. 16–26.
9. Polishchuk V.Yu., Polishchuk Yu.M. Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost // *Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems* / Ed. O. Pokrovsky. – New York : Nova Science Publishers, 2014. – P. 205–234. DOI: 10.978-94-007-4569-8.
10. Попков Ю.С., Попков А.Ю., Дубнов Ю.А. Рандомизированное машинное обучение при ограниченных объемах данных. – М.: URSS; ЛЕНАНД, 2019. – 314 с.
11. Popkov Yu.S., Popkov A.Yu. New Methods of entropy-robust estimation for randomized models under limited data // *Entropy*. – 2014. – Vol. 16. – No. 2. – pp. 675–698. DOI: 10.3390/e16020675.
12. Дубнов Ю.А., Попков А.Ю., Полищук В.Ю., Сокол Е.С., Мельников А.В., Полищук Ю.М., Попков Ю.С. Алгоритмы рандомизированного машинного обучения для прогнозирования эволюции площади термокарстовых озер в зонах вечной мерзлоты // *Автоматика и телемеханика*. – 2023. – № 1. – С. 98–120. DOI: 10.31857/S0005231023010051.
13. Полищук Ю.М., Силич В.А., Татарников В.А., Ходашинский И.А., Ципилева Т.А. Региональные экологические информационно-моделирующие системы. – Новосибирск: Наука, 1993. – 129 с.
14. Buck S.F. A method of estimation of missing values in multivariate data suitable for use with an electronic computer // *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*. – 1960. – Vol. 22. – Iss. 2. – pp. 302–306. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1960.tb00375.x.
15. Dubnov Yu.A., Polishchuk V.Yu., Popkov Yu.S., Polishchuk Yu.M., Mel'nikov A.V., Sokol E.S. Entropy-randomized method for the reconstruction of missing data // *Automation and Remote Control*. – 2021. – Vol. 82. – No. 4. – P. 670–686. DOI: 10.1134/S0005117921040056.
16. Ричардсон К. Микросервисы. Паттерны разработки и рефакторинга. – СПб.: Питер, 2019. – 542 с.
17. Документация NextGIS Web [Электронный ресурс] / NextGIS. – 2011–2024. – Режим доступа: https://docs.nextgis.ru/docs_ngweb/source/toc.html#nextgis-web (дата обращения 09.10.2024).
18. PostgreSQL: Документация [Электронный ресурс] / Postgres Pro. – Режим доступа: <https://postgrespro.ru/docs/postgresql> (дата обращения 09.10.2024).
19. PostGIS Documentation [Электронный ресурс] / PostGIS PSC & OSGeo. – 2023. – Режим доступа: <https://postgis.net/documentation/> (дата обращения 09.10.2024).
20. Kafka 3.8 Documentation [Электронный ресурс] / Apache Software Foundation. – 2024. – Режим доступа: <https://kafka.apache.org/documentation/> (дата обращения 09.10.2024).
21. MongoDB Manual [Электронный ресурс] / MongoDB. – Available at: <https://www.mongodb.com/docs/manual/> (дата обращения 09.10.2024).

References

1. Zabelina S.A., Shirokova L.S., Klimov S.I., Chupakov A.V., Lim A.G., Polishchuk Yu.M., Polishchuk V.Yu., Bogdanov A.N., Muratov I.N., Guerin F., Karlsson J., Pokrovsky O.S. Carbon Emission from Thermokarst Lakes in NE European Tundra. *Limnology and Oceanography*. 2021;66(S1):S216–S230. DOI: 10.1002/lno.11560.
2. Anthony K.W., Schneider von Deimling T., Nitze I., Frohling S., Emond A., Daanen R., Anthony P., Lindgren P., Jones B., Grosse G. 21st-century modeled permafrost carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes. *Nature Communications*. 2018;9:3262. DOI: 10.1038/s41467-018-05738-9.
3. Golubyatnikov L.L., Mammarella I. Methane fluxes into atmosphere from Fennoscandian lakes. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2018;54(6):570–580. DOI: 10.1134/S0001433818060075.

4. Polishchuk Y.M., Bogdanov A.N., Muratov I.N., Polishchuk V.Y., Lim A., Manasyrov R.M., Shirokova L.S., Pokrovsky O.S. Minor contribution of small thaw ponds to the pools of carbon and methane in the inland waters of the permafrost-affected part of the Western Siberian lowland. *Environmental Research Letters*. 2018;13(4):045002. DOI: 10.1088/1748-9326/aab046.
5. Polishchuk V.Yu., Kupriyanov M.A., Polishchuk Yu.M. Analysis of interrelation of climatic change and dynamics of thermokarst lakes in the Arctic zone of Taymyr. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2021;18(5):193–200. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-193-200.
6. Viktorov A.S., Kapralova V.N., Orlov T.V., Trapeznikova O.N., Arkhipova M.V., Berezin P.V., Zverev A.V., Panchenko E.N., Sadkov S.A. Consistent patterns of the size distribution of thermokarst lakes. *Doklady Earth Sciences*. 2017;474(2):692-694. DOI: 10.1134/S1028334X17060162.
7. Webb E.E., Liljedahl A.K. Diminishing lake area across the northern permafrost zone. *Nature Geoscience*. 2023;16:202-209. DOI: 10.1038/s41561-023-01128-z.
8. Kravtsova V.I., Bystrova A.G. Changes in thermokarst lake size in different regions of Russia for the last 30 years. *Kriosfera Zemli*. 2009;13(2):16–26.
9. Polishchuk V.Yu., Polishchuk Yu.M. Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. In: *Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems*. O. Pokrovsky, ed. New York: Nova Science Publishers; 2014. pp. 205–234. DOI: 10.978-94-007-4569-8.
10. Popkov Yu.S., Popkov A.Yu., Dubnov Yu.A. Randomizirovannoe mashinnoe obuchenie pri ogranichennykh ob'emakh dannykh [Randomized machine learning with limited data]. Moscow: URSS; LENAND; 2019. 310 p.
11. Popkov Yu.S., Popkov A.Yu. New Methods of entropy-robust estimation for randomized models under limited data. *Entropy*. 2014;16(2):675–698. DOI: 10.3390/e16020675.
12. Dubnov Yu.A., Popkov A.Yu., Polishchuk V.Yu., Sokol E.S., Mel'nikov A.V., Polishchuk Yu.M., Popkov Yu.S. Algoritmy randomizirovannogo mashinnogo obucheniya dlya prognozirovaniya ehvolyutsii ploshchadi termokarstovykh ozer v zonakh vechnoi merzloty [Randomized machine learning algorithms to forecast the evolution of thermokarst lakes area in permafrost zones]. *Avtomatika i telemekhanika*. 2023;(1):98–120.
13. Polishchuk Yu.M., Silich V.A., Tatarnikov V.A., Khodashinskii I.A., Tsipileva T.A. Regional'nye ehkologicheskie informatsionno-modeliruyushchie sistemy [Regional environmental information modeling systems]. Novosibirsk: Nauka, 1993. 129 p.
14. Buck S.F. A method of Estimation of Missing Values in Multivariate Data suitable for use with an Electronic Computer. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*. 1960;22(2):302–306. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1960.tb00375.x.
15. Dubnov Yu.A., Polishchuk V.Yu., Popkov Yu.S., Polishchuk Yu.M., Mel'nikov A.V., Sokol E.S. Entropy-randomized method for the reconstruction of missing data. *Automation and Remote Control*. 2021;82(4):670–686. DOI: 10.1134/S0005117921040056.
16. Richardson Ch. *Microservices patterns. With examples in Java*. Shelter Island: Manning; 2019.
17. *NextGIS* Web documentation. 2011-2024. Available at: https://docs.nextgis.com/docs_ngweb/source/toc.html (accessed 09.10.2024).
18. *PostgreSQL*: Documentation. Available at: <https://postgrespro.com/docs/postgresql> (accessed 09.10.2024).
19. *PostGIS* Documentation. 2023. Available at: <https://postgis.net/documentation/> (accessed 09.10.2024).
20. *Kafka* 3.8 Documentation. 2024. Available at: <https://kafka.apache.org/documentation/> (accessed 09.10.2024).
21. *MongoDB* Manual. Available at: <https://www.mongodb.com/docs/manual/> (accessed 09.10.2024).

Статья поступила в редакцию 10.06.2024 г., одобрена после рецензирования 25.09.2024 г., принята к публикации 27.11.2024 г.
The article was submitted 10.06.2024; approved after reviewing 25.09.2024; accepted for publication 27.11.2024.

Информация об авторах

Полищук Юрий Михайлович

Доктор физико-математических наук, профессор
Главный научный сотрудник
Югорский научно-исследовательский институт
информационных технологий (ЮНИИТ)
628011 Ханты-Мансийск, ул. Мира, д. 151
e-mail: yupolishchuk@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4944-4919
Scopus Author ID: 6701744203
ResearcherID: D-5649-2014
SPIN-код: 5753-1636
AuthorID: 61393

Information about authors

Yury M. Polishchuk

Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor
Chef Researcher
Ugra Research Institute of Information Technologies
151, Mira str., Khanty-Mansiysk, 628011, Russia
e-mail: yupolishchuk@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4944-4919
Scopus Author ID: 6701744203
ResearcherID: D-5649-2014
SPIN-код: 5753-1636
AuthorID: 61393

Сокол Евгений Сергеевич

Начальник отдела
Югорский научно-исследовательский институт
информационных технологий (ЮНИИТ)
628011 Ханты-Мансийск, ул. Мира, д. 151
e-mail: eugen137@gmail.com
ORCID: 0009-0009-8308-154X
Scopus Author ID: 57221465588
SPIN-код: 3718-8990
AuthorID: 1083410

Тогачев Александр Алексеевич

Главный специалист
Югорский научно-исследовательский институт
информационных технологий (ЮНИИТ)
628011 Ханты-Мансийск, ул. Мира, д. 151
e-mail: togachevaa@uriit.ru
ORCID: 0009-0009-3670-1275

Полищук Владимир Юрьевич

Кандидат технических наук, научный сотрудник
Институт мониторинга климатических
и экологических систем СО РАН
634055 Томск, Академический пр-кт, д. 10/3
e-mail: liquid_metal@mail.ru
ORCID: 0000-0002-2058-1725
Scopus Author ID: 56985630500
SPIN-код: 5501-2030
AuthorID: 674827

Куприянов Матвей Андреевич

Главный специалист
Югорский научно-исследовательский институт
информационных технологий (ЮНИИТ)
628011 Ханты-Мансийск, ул. Мира, д. 151
e-mail: kupriyanovma@uriit.ru
ORCID: 0000-0002-9476-2887
Scopus Author ID: 57197843804
ResearcherID: AAB-8176-2019
SPIN-код: 4352-8178
AuthorID: 818841

Мельников Андрей Витальевич

Доктор технических наук, профессор
Директор
Югорский научно-исследовательский институт
информационных технологий (ЮНИИТ)
628011 Ханты-Мансийск, ул. Мира, д. 151
e-mail: MelnikovAV@uriit.ru
ORCID: 0000-0002-1073-7108
ResearcherID: N-8822-2013
Scopus Author ID: 57209782911
SPIN-код: 8813-6794
AuthorID: 179248

Eugeniy S. Sokol

Leading Specialist
Ugra Research Institute of Information Technologies
151, Mira str., Khanty-Mansiysk, 628011, Russia
e-mail: eugen137@gmail.com
ORCID: 0009-0009-8308-154X
Scopus Author ID: 57221465588
SPIN-код: 3718-899
AuthorID: 1083410

Aleksandr A. Togachev

Leading Specialist
Ugra Research Institute of Information Technologies
151, Mira str., Khanty-Mansiysk, 628011, Russia
e-mail: togachevaa@uriit.ru
ORCID: 0009-0009-3670-1275

Vladimir Y. Polishchuk

Candidate of Technical Sciences, Researcher
Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IMCES SB RAS)
10/3, Akademicheskyy ave, Tomsk, 634055, Russia
e-mail: liquid_metal@mail.ru
ORCID: 0000-0002-2058-1725
Scopus Author ID: 56985630500
SPIN-код: 5501-2030
AuthorID: 674827

Matvey A. Kupriyanov

Leading Specialist
Ugra Research Institute of Information Technologies
151, Mira str., Khanty-Mansiysk, 628011, Russia
e-mail: kupriyanovma@uriit.ru
ORCID: 0000-0002-9476-2887
Scopus Author ID: 57197843804
ResearcherID: AAB-8176-2019
SPIN-код: 4352-8178
AuthorID: 818841

Andrey V. Melnikov

Doctor of Technical Sciences, Professor
Head of Institute
Ugra Research Institute of Information Technologies
151, Mira str., Khanty-Mansiysk, 628011, Russia
e-mail: MelnikovAV@uriit.ru
ORCID: 0000-0002-1073-7108
ResearcherID: N-8822-2013
Scopus Author ID: 57209782911
SPIN-код: 8813-6794
AuthorID: 179248