

Интегрированная геоинформационная система для экологического мониторинга Обь-Иртышского речного бассейна

А. А. Донцов^{1,*}, И. А. Суторихин^{1,2}, В. В. Кириллов¹, О. В. Ловцкая¹

¹Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Барнаул, Россия

²Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, 630090, Новосибирск, Россия

*Контактный автор: Донцов Александр Андреевич, e-mail: alexdontsov@yandex.ru

Поступила 18 марта 2023 г., доработана 06 августа 2023 г., принята в печать 06 сентября 2023 г.

Показаны результаты разработки геоинформационной веб-системы, предназначенной для формирования единой научно обоснованной системы высокотехнологического комплексного экологического мониторинга (гидрологического, гидрохимического, гидробиологического) Обь-Иртышского речного бассейна и позволяющей оценивать экологическое состояние водных объектов с учетом изменяющегося климата и увеличения антропогенной нагрузки. Представлены архитектура геоинформационной системы, основные модули и компоненты, функциональные возможности и интерфейс пользователя. Рассмотрена структура проблемно-ориентированной базы данных, используемой для хранения и обработки информации в составе геоинформационной веб-системы.

Ключевые слова: геоинформационная система, спутниковые данные, базы данных, экспедиционные данные, экологический мониторинг, веб-технологии.

Цитирование: Донцов А.А., Суторихин И.А., Кириллов В.В., Ловцкая О.В. Интегрированная геоинформационная система для экологического мониторинга Обь-Иртышского речного бассейна. Вычислительные технологии. 2024; 29(2):69–78. DOI:10.25743/ICT.2024.29.2.006.

Введение

Проблемы сохранения и использования водных ресурсов интернациональны и становятся все более актуальными. Вместе с тем увеличивается число задач, связанных с достоверной и оперативной оценкой состояния параметров водных объектов, а также с предоставлением доступа к результатам измерений широкому кругу заинтересованных организаций и лиц, начиная с государственных структур и заканчивая общественными организациями. Поэтому является актуальной разработка модульных геоинформационных веб-систем, реализующих алгоритмы обработки, хранения и предоставления разноплановой информации о состоянии водных объектов [1, 2].

Теме разработки геоинформационных систем для решения различных научно-прикладных задач, связанных с экологическим мониторингом, посвящено довольно много работ, получены значимые результаты. Можно выделить работы коллективов Института космических исследований РАН [3], Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий [4] и Института вычислительного моделирования СО РАН [5]. В Институте динамики систем и теории управления СО РАН

созданы и разрабатываются специализированные геоинформационные системы (ГИС) для экологического мониторинга [1]. В Институте водных и экологических проблем СО РАН были разработаны ГИС для решения гидрологических и экологических задач внутриконтинентальных водных объектов [6, 7].

В работе показаны первые результаты создания геоинформационной веб-системы, предназначенной для формирования единой научно обоснованной системы высокотехнологического комплексного экологического мониторинга (гидрологического, гидрохимического, гидробиологического) Обь-Иртышского речного бассейна и позволяющей прогнозировать экологическое состояние водных объектов с учетом изменяющегося климата и увеличения антропогенной нагрузки (на примере Обской губы и Обь-Тазовской устьевой области).

На акватории Обской губы, ее берегах и территории водосборного бассейна работают, строятся и планируются к строительству крупнейшие в России и мире объекты добычи и транспортировки углеводородов. В заливе осуществляется круглогодичная навигация на полуостров Ямал в порт Сабетта, на полуостров Гыдан к Салмановскому причалу, на Мыс Каменный к Новопортовскому терминалу. Для расширения поставок углеводородного сырья из Ямало-Ненецкого автономного округа, уже определяющих значительную часть морских перевозок по Северному морскому пути, продолжается строительство новых танкеров-газовозов. Значительная, определяющая роль России в обеспечении углеводородным сырьем жителей Азии и Европы в настоящее время остается неизменной.

Анализ ретроспективных и современных данных позволяет установить особенности пространственно-временной организации экотональных экосистем Обской губы и Обь-Тазовской устьевой области, определить соотношение глобальных, зональных, региональных и локальных, природных и антропогенных факторов их формирования и функционирования. Значительные размеры, мелководность, слабая проточность и ярко выраженная многофакториальная неоднородность по пространству и времени физических, химических и биологических характеристик Обской губы при существующем и планируемом значительном увеличении объемов добычи и переработки углеводородов, а также соответствующем развитии водно-транспортной системы определяют необходимость оптимизации экологического мониторинга Обской губы и Обь-Тазовской устьевой области в целом. В связи с этим актуальна разработка геоинформационной системы, реализующей агрегацию тематических данных, обработку и предоставление их широкому кругу организаций и лиц, связанных с экологическим мониторингом [8].

1. Информационная основа и база данных ГИС

В информационную систему были включены следующие данные.

1. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. В настоящее время используются данные космических аппаратов Sentinel-2 и Landsat-8, которые получены из открытых архивов спутниковой информации ESA (European space agency) и USGS (United States geological survey). В дальнейшем планируется разработка программных модулей для работы с российскими космическими аппаратами.
2. Результаты контактных измерений гидрологических, гидрохимических и гидробиологических характеристик Нижней Оби, полученные в ИВЭП СО РАН при экспедиционных исследованиях в различные сезоны 2015, 2020–2022 гг. совместно с Тюменским государственным университетом.

3. Результаты математического моделирования температурного и ледового режимов, солености воды в Обской губе, в том числе в подледный период.
4. Разномасштабные векторные и растровые топографические и тематические карты.

При построении базы данных использованы модель данных CUASHI HIS и стандартизированная структура реляционной базы данных, предложенная Консорциумом университетов по развитию гидрологии для хранения и описания точечных наблюдений [9]. Эта модель данных достаточно универсальна и может быть использована для организации хранения, поиска и извлечения информации, собранной множеством организаций для решения задач комплексного экологического мониторинга [9, 10]. Схема такой базы с единой расширяемой системой справочников позволяет собрать и объединить наиболее важные данные по предметной области исследования и использовать их для последующих анализа, расчетов, отображения результатов. На рис. 1 показана общая модель базы данных ГИС, которая предназначена для хранения результатов точечных измерений.

Стандартизированная структура данных облегчает анализ информации из различных источников как для одного, так и для различных объектов исследования. Данные контактных измерений, в общем случае, имеют следующие основные характеристики:

- место проведения наблюдения (пространство);
- дата и время проведения наблюдения (время);
- тип и значение наблюдаемой переменной (идентификатор и значение).

Помимо этих характеристик существует много других отличительных признаков, сопровождающих данные контактных измерений. Многие из дополнительных атрибутов уточняют основные характеристики. Главными элементами такой схемы являются таблица фактов и множество таблиц измерений. Таблица фактов, как правило, содержит сведения об объектах или событиях, совокупность которых будет в дальнейшем анализироваться. Таблицы измерений содержат неизменяемые либо редко изменяемые дан-



Рис. 1. Модель базы данных ГИС

Fig. 1. GIS database model

ные. Таблицы измерений также содержат как минимум одно описательное поле и, как правило, целочисленное ключевое поле для однозначной идентификации рассматриваемого параметра. Каждая таблица измерений должна находиться с таблицей фактов в отношении “один ко многим”.

Для реализации базы данных ГИС используется СУБД PostgreSQL [11]. Это свободно распространяемая реляционная СУБД с открытым кодом, поддерживающая большую часть стандарта SQL и предлагающая множество дополнительных сервисов. Модуль PostGIS добавляет PostgreSQL поддержку пространственных объектов. PostGIS фактически представляет собой пространственное расширение PostgreSQL-сервера, что позволяет использовать его как пространственную базу данных для ГИС [12].

2. Программная реализация и описание ГИС

Геоинформационная система разработана с применением свободно распространяемых базовых программных продуктов с открытым исходным кодом, которые предназначены для работы с пространственными данными. Серверная часть ГИС основана на компонентах веб-платформы Symfony, которая позволяет реализовывать модульные приложения на языке программирования PHP [13]. Для работы с системой разработан веб-интерфейс, который можно разделить на две части:

- публичный раздел для посетителей веб-ресурса;
- панель администратора, через которую осуществляется управление данными, загруженными в систему, и вычислительными процессами.

Работа ГИС состоит из двух основных блоков — работа со спутниковыми данными и с данными контактных измерений. На стороне сервера для визуализации пространственных данных в виде карт используется картографическая система GeoServer, которая помимо веб-интерфейса имеет развитый программный интерфейс, позволяющий автоматизировать процессы, связанные с загрузкой и отображением данных [14].

При разработке архитектуры информационной системы использован паттерн API Gateway. Этот паттерн программирования основан на применении специального шлюза, который находится между клиентским приложением (веб-интерфейсом) и вычислительными модулями, обеспечивая единую точку входа для клиента. Применение этого паттерна сокращает число вызовов, обеспечивает независимость клиента от протоколов, используемых в программных сервисах (REST, AMQP, gRPC и др.), и обеспечивает централизованное управление сквозной функциональностью. На рис. 2 показана структурная схема паттерна API Gateway [15].

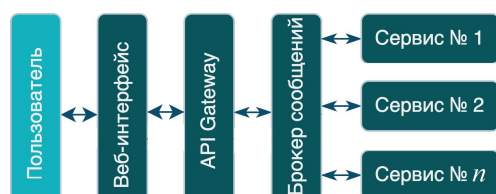


Рис. 2. Схема архитектурного паттерна API Gateway

Fig. 2. API Gateway architectural pattern diagram

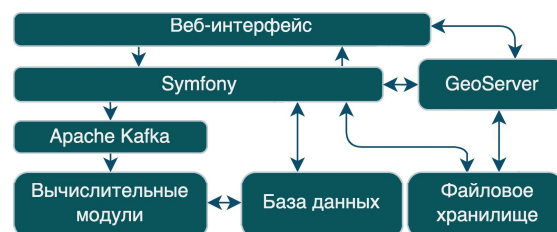


Рис. 3. Общая схема ГИС

Fig. 3. General GIS diagram

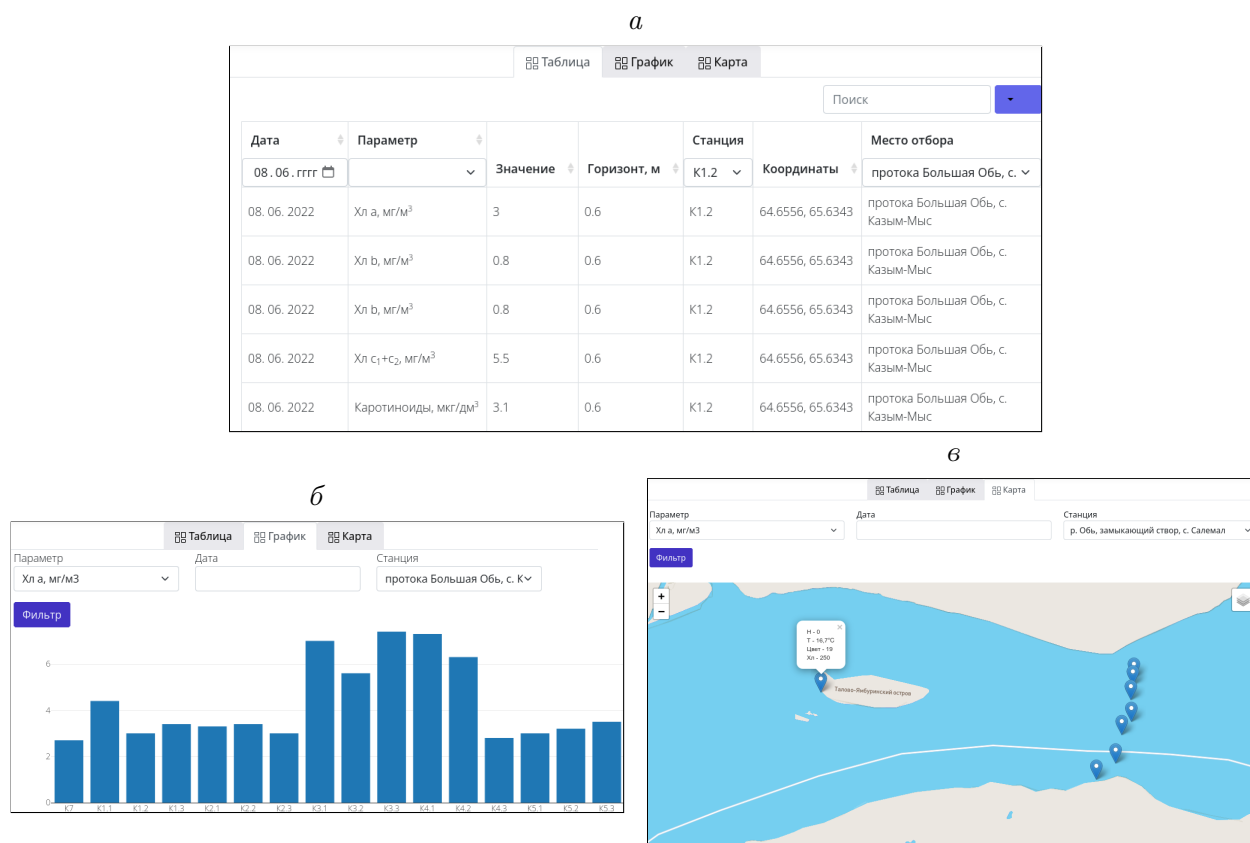


Рис. 4. Примеры интерфейса ГИС. Визуализация экспедиционных данных в виде таблицы (а), графика (б) и маркеров на карте (в)

Fig. 4. Examples of GIS interface. Visualization of expedition data in the form of a table (а), a graph (б), and markers on a map (в)

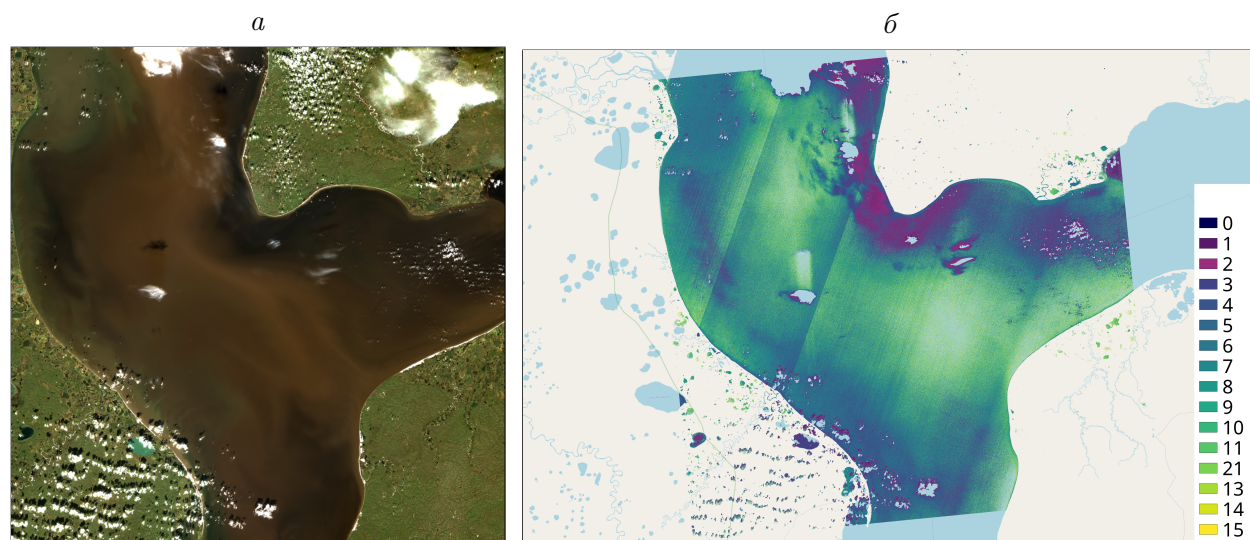


Рис. 5. Комбинация каналов космического аппарата Sentinel-2 — естественные цвета (а), результат определения концентрации хлорофилла “а” в поверхностном слое по данным Sentinel-2 (мг/м³), 24.08.2022 (б)

Fig. 5. Combination of Sentinel-2 satellite channels — natural colors (а), the result of determining the concentration of chlorophyll “а” in the surface layer according to Sentinel-2 data (mg/m³), 24.08.2022 (б)

Программный слой, основанный на компонентах платформы Symfony, выступает в качестве шлюза, выполняющего обработку запросов пользователей, авторизацию, разграничение доступа к данным и функциям ГИС. С помощью программного брокера сообщений Apache Kafka происходит обмен данными между веб-системой и вычислительными модулями [16]. На рис. 3 показана общая схема функционирования ГИС. В качестве хранилища спутниковых данных используется облачное объектное хранилище файлов S3. Такой подход позволяет гибко реализовывать масштабирование, разграничение доступа к данным. При этом существует довольно много программных библиотек, реализующих функции работы с файловыми хранилищами S3.

Веб-интерфейс ГИС реализован на основе платформы Bootstrap. Это свободный набор инструментов для создания сайтов и веб-приложений, который включает HTML- и CSS-шаблоны оформления для веб-форм, кнопок, меток, блоков навигации и прочих компонентов веб-интерфейса, в том числе JavaScript-расширения. Bootstrap позволяет создавать пользовательские интерфейсы, которые корректно отображаются на экранах разных устройств (компьютеров, планшетов, телефонов и т. д.). Одним из ключевых компонентов веб-интерфейса является карта, которая формируется на основе библиотеки Leaflet [17]. Это JavaScript-библиотека для создания браузерных и адаптированных под мобильные устройства интерактивных карт.

На рис. 4 приведены примеры визуализации экспедиционных данных при помощи веб-интерфейса ГИС. На рис. 4, *а* представлены данные в виде таблицы; при этом реализована фильтрация данных по дате, измеряемому параметру, станции, месту сбора. Реализован экспорт данных в форматы CSV, Excel, JSON. Аналогичным образом реализовано отображение данных в виде графика и интерактивной карты.

В состав вычислительных модулей ГИС (см. рис. 3) включены инструменты для обработки спутниковых данных, реализованные на языке программирования Python и основанные на компонентах программных пакетов ESA SNAP (Sentinel application platform) и ACOLITE [18, 19]. В настоящее время ГИС содержит модули для вычисления следующих параметров:

- концентрация хлорофилла “а”, мг/м³;
- концентрация взвешенного вещества, г/м³;
- первые оптические глубины, м.

Как показано на рис. 3, вычислительные модули получают задания на обработку данных при помощи брокера сообщений. Указываются путь к файлам спутниковых снимков на сервере ГИС и алгоритм обработки. Исходя из этих параметров запускается процесс вычислений, результаты которых сохраняются в облачное хранилище S3 или в файловой системе сервера (зависит от настроек) и затем доступны пользователям ГИС.

В качестве примера на рис. 5, *б* показаны результаты вычисления концентрации хлорофилла “а” по данным космического аппарата Sentinel-2, которые получены при помощи вычислительного модуля, разработанного на основе компонента *chl_o2* из программного пакета ACOLITE. На рис. 5, *а* — комбинация каналов естественных цветов.

Определение концентрации хлорофилла “а” — один из способов оценки интенсивности цветения воды. Этот параметр позволяет получить объективную информацию об интенсивности фотосинтеза и биомассе фитопланктона, а также характеристиках качества поверхностного слоя воды [7].

Заключение

Показаны результаты разработки геоинформационной веб-системы, предназначенной для формирования единой научно обоснованной системы комплексного экологического мониторинга Обь-Иртышского речного бассейна. Агрегация в рамках ГИС результатов обработки спутниковых данных и экспедиционных измерений позволяет предоставлять разноплановую информацию о состоянии водных объектов.

Приведены архитектура ГИС, ее основные модули и компоненты, функциональные возможности и интерфейс пользователя. Рассмотрена структура проблемно-ориентированной базы данных, используемой для хранения и обработки информации.

Результаты работы иллюстрируют возможности разрабатываемой ГИС при организации комплексного мониторинга экологического состояния водных объектов Субарктики, реализации экологической политики, образовательной и просветительной деятельности для решения важных социально-экономических и экологических проблем, в том числе в рамках Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности до 2035 г.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВЭП СО РАН при финансовой поддержке Российского центра освоения Арктики (г. Салехард, Россия).

Список литературы

- [1] Бычков И.В., Фереферов Е.С. Цифровые технологии мониторинга и прогнозирования экологической обстановки в Сибири. Вестник Российской академии наук. 2022; 92(4):315–323. DOI:10.31857/S086958732204003X.
- [2] Безматерных Д.М., Пузанов А.В., Папина Т.С., Кириллов В.В., Рыбкина И.Д., Ловцкая О.В., Кузник Я.Э. Перспективы совершенствования технологии экологического мониторинга поверхностных вод Обь-Иртышского бассейна. Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2020; 57(2):49–58. DOI:10.24411/2410-1192-2020-15704.
- [3] Лаврова О.Ю., Лупян Е.А., Митягина М.И., Уваров И.А. Информационная система See the Sea: текущие возможности и перспективы развития. Информационные технологии в дистанционном зондировании Земли — RORSE 2018. Электронный сборник статей 16-й конференции, Москва, 12–16 ноября 2018 года. М.: Институт космических исследований Российской академии наук; 2018: 367–373. DOI:10.21046/rorse2018.367.
- [4] Шокин Ю.И., Пестунов И.А., Смирнов В.В., Синявский Ю.Н., Скачкова А.П., Дубров И.С., Левин В.А., Алексанин А.И., Алексанина М.Г., Бабяк П.В., Громов А.В., Недолужко И.В. Распределенная информационная система сбора, хранения и обработки спутниковых данных для мониторинга территорий Сибири и Дальнего Востока. Журнал СФУ. Техника и технологии. 2008; (4):291–314.
- [5] Якубайлик О.Э., Кадочников А.А., Токарев А.В. Геоинформационная веб-система и приборно-измерительное обеспечение оперативной оценки загрязнения атмосферы. Автометрия. 2018; 54(3):39–46.
- [6] Зиновьев А.Т., Ловцкая О.В., Балдаков Н.А., Дьяченко А.В. Геоинформационное обеспечение для решения гидрологических задач. Вычислительные технологии. 2014; 19(3):14–26.

- [7] **Донцов А.А., Суторихин И.А.** Специализированная геоинформационная система автоматизированного мониторинга рек и водоемов. *Вычислительные технологии*. 2017; 22(5):39–46.
- [8] **Kirillov V.V., Kovalevskaya N.M., Semchukov A.N. et al.** Study of current state and Arctic ecotone ecosystems dynamics due to natural and anthropogenic factors in the Kara Sea Bay — Gulf of Ob and it's catchment. *Taiwan-Russia Bilateral Symposium: 2018 Interdisciplinary Research for Biophysics, Life Sciences and Biomedicine*, Taipei, November 7–8, 2018:35–36.
- [9] **Maidment D.R.** CUAHSI hydrologic information system: overview of version 1.1. Consortium of Univ. for the Advancement of Hydrologic Science, Inc, 2008: 96. Available at: <http://his.cuahsi.org/documents/HISOverview.pdf> (accessed at March 10, 2023).
- [10] **Бугаец А.Н., Гарцман Б.И., Краснопеев С.А., Бугаец Н.Д.** Опыт обработки информации модернизированной гидрологической сети с использованием системы управления данными CUAHSI HIS ODM. *Метеорология и гидрология*. 2013; (5):91–101.
- [11] PostgreSQL. Available at: <https://www.postgresql.org> (accessed at March 10, 2023).
- [12] Spatial and geographic objects for PostgreSQL. Available at: <https://postgis.net> (accessed at March 10, 2023).
- [13] Symfony framework. Available at: <https://symfony.ru> (accessed at March 10, 2023).
- [14] GeoServer. Available at: <https://geoserver.org> (accessed at March 10, 2023).
- [15] **Amaral M., Polo J., Carrera D., Steinder M.** Performance evaluation of microservices architectures using containers. *IEEE 14th International Symposium on Network Computing and Applications (NCA)*. IEEE; 2015: 27–34.
- [16] Apache Kafka. Available at: <https://kafka.apache.org> (accessed at March 10, 2023).
- [17] Leaflet — a JavaScript library for interactive maps. Available at: <https://github.com/Leaflet/Leaflet> (accessed at March 10, 2023).
- [18] **Brockmann C., Doerer R., Peters M., Kerstin S., Embacher S., Ruescas A.** Evolution of the C2RCC neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters. *Living Planet Symposium*. 2016; (740):54–60.
- [19] ACOLITE. Available at: <https://github.com/acolite/acolite> (accessed at March 10, 2023).

Integrated geoinformation system for environmental monitoring of the Ob-Irtysh river basin

A. A. DONTSOV^{1,*}, I. A. SUTORIKHIN^{1,2}, V. V. KIRILLOV¹, O. V. LOVTSKAYA¹

¹Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 656038, Barnaul, Russia

²Federal Research Center for Information and Computational Technologies, 630090, Novosibirsk, Russia

*Corresponding author: Alexander A. Dontsov, e-mail: alexdontsov@yandex.ru

Received March 18, 2023, revised August 06, 2023, accepted September 06, 2023.

Abstract

The results of the development of a geographic information web system (GIS) are presented, designed to form a unified scientifically based system of high-tech integrated environmental monito-

ring (hydrological, hydrochemical, hydrobiological) of the Ob-Irtysh river basin. It allows assessing the ecological state of water bodies and accounting for the climate change and the increasing anthropogenic load.

The architecture of a geoinformation system based on a service approach is presented. When implementing a GIS, the API-Gateway programming pattern was used. The system provides the main modules and components of the GIS, its functionality and user interface designed to display expeditionary data.

The structure of a problem-oriented database used for storing and processing information as part of a geoinformation web system is considered. The database was built using the CUASHI HIS data model and a standardized relational database structure proposed by the Consortium of Universities for the Development of Hydrology to store and describe point observations. This data model is quite universal and can be used to organize the storage, search and retrieval of information collected by many organizations to solve the problems of integrated environmental monitoring. The layout of such database with a single expandable system of directories allows collecting and combining the most important data on the subject area of research and use the data for subsequent analysis, calculations, and display of results.

The obtained results are applicable for organization of integrated monitoring of the ecological state of Subarctic water bodies, the implementation of environmental policy, educational and educational activities and solving important socio-economic and environmental problems, arising within the framework of the Strategy for the Development of the Arctic Zone of the Russian Federation and ensuring national security until 2035.

The developed GIS provides diverse information about the state of water bodies. Software interfaces allows receiving data from various measuring instruments and complexes, as well as downloading the results of expeditionary work with the help of web interface.

Keywords: GIS, satellite data, databases, expeditionary data, environmental monitoring, web technologies.

Citation: Dontsov A.A., Sutorikhin I.A., Kirillov V.V., Lovtskaya O.V. Integrated geoinformation system for environmental monitoring of the Ob-Irtysh river basin. Computational Technologies. 2024; 29(2):69–78. DOI:10.25743/ICT.2024.29.2.006. (In Russ.)

Acknowledgements. The work is carried out within the framework of the State task of the IWEF SB RAS with the financial support of the Russian Center for the Development of the Arctic (Salekhard, Russia).

References

1. **Bychkov I.V., Fereferov E.S.** Digital technologies for monitoring and forecasting the environmental situation in Siberia. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2022; 92(4):315–323. DOI:10.31857/S086958732204003X. (In Russ.)
2. **Bezmaternykh D.M., Puzanov A.V., Papina T.S., Kirillov V.V., Rybkina I.D., Lovtskaya O.V., Kuznyak Ya.E.** Prospects for improving the technology of environmental monitoring of surface waters in the Ob-Irtysh basin. Bulletin of the Altay Branch of the Russian Geographical Society. 2020; 57(2):49–58. DOI:10.24411/2410-1192-2020-15704. (In Russ.)
3. **Lavrova O.Yu., Lupyan E.A., Mityagina M.I., Uvarov I.A.** See the Sea information system. Current capabilities and prospects of development. Information Technologies in Remote Sensing of the Earth – RORSE 2018. Electronic Collection of aArticles of the 16th Conference, Moscow, November 12–16, 2018. Moscow: Institute of Space Research of the Russian Academy of Sciences; 2018: 367–373. DOI:10.21046/rorse2018.367. (In Russ.)
4. **Shokin Yu.I., Pestunov I.A., Smirnov V.V., Sinyavskiy Yu.N., Skachkova A.P., Dubrov I.S., Levin V.A., Aleksanin A.I., Aleksanina M.G., Babyak P.V., Gromov A.V., Nedoluzhko I.V.** The distributed informational system of satellite data collecting, storage and processing for Siberia and the Far East territories monitoring. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2008; (4):291–314. (In Russ.)

5. **Yakubailik O.E., Kadochnikov A.A., Tokarev A.V.** Geoinformation web system and instrumentation for operational assessment of the atmosphere. *Autometry*. 2018; 54(3):39–46. (In Russ.)
6. **Zinoviev A.T., Lovtskaya O.V., Baldakov N.A., D'yachenko A.V.** Geoinformation support for hydrologic problems. *Computational Technologies*. 2014; 19(3):14–26. (In Russ.)
7. **Dontsov A.A., Sutorikhin I.A.** Specialized geoinformation system for automated monitoring of rivers and reservoirs. *Computational Technologies*. 2017; 22(5):39–46. (In Russ.)
8. **Kirillov V.V., Kovalevskaya N.M., Semchukov A.N. et al.** Study of current state and Arctic ecotone ecosystems dynamics due to natural and anthropogenic factors in the Kara Sea Bay — Gulf of Ob and it's catchment. *Taiwan-Russia Bilateral Symposium: 2018 Interdisciplinary Research for Biophysics, Life Sciences and Biomedicine*, Taipei, November 7–8, 2018:35–36.
9. **Maidment D.R.** CUAHSI hydrologic information system: overview of version 1.1. Consortium of Univ. for the Advancement of Hydrologic Science, Inc, 2008: 96. Available at: <http://his.cuahsi.org/documents/HISOverview.pdf> (accessed at March 10, 2023).
10. **Bugaets A.N., Gartsman B.I., Krasnopeev S.A., Bugaets N.D.** Information processing experience of modernized hydrological network using CUAHSI HIS ODM data management system. *Meteorology and Hydrology*. 2013; (5):91–101. (In Russ.)
11. PostgreSQL. Available at: <https://www.postgresql.org> (accessed at March 10, 2023).
12. Spatial and geographic objects for PostgreSQL. Available at: <https://postgis.net> (accessed at March 10, 2023).
13. Symfony framework. Available at: <https://symfony.ru> (accessed at March 10, 2023).
14. GeoServer. Available at: <https://geoserver.org> (accessed at March 10, 2023).
15. **Amaral M., Polo J., Carrera D., Steinder M.** Performance evaluation of microservices architectures using containers. *IEEE 14th International Symposium on Network Computing and Applications (NCA)*. IEEE; 2015: 27–34.
16. Apache Kafka. Available at: <https://kafka.apache.org> (accessed at March 10, 2023).
17. Leaflet — a JavaScript library for interactive maps. Available at: <https://github.com/Leaflet/Leaflet> (accessed at March 10, 2023).
18. **Brockmann C., Doerer R., Peters M., Kerstin S., Embacher S., Ruescas A.** Evolution of the C2RCC neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters. *Living Planet Symposium*. 2016; (740):54–60.
19. ACOLITE. Available at: <https://github.com/acolite/acolite> (accessed at March 10, 2023).