

Цифровая трансформация экологического мониторинга оз. Хубсугул и Прихубсугуля

И. В. Бычков¹, Г. М. Ружников^{1,*}, Р. К. Федоров¹, А. К. Попова¹,
А. Будээбазар², Б. Балт³, Д. Ууганбаатар³

¹Институт динамики систем и теории управления им. В. М. Матросова СО РАН, 664033, Иркутск, Россия

²Академия наук Монголии, 14200, Улан-Батор, Монголия

³Институт математики и цифровых технологий АНМ, 13330, Улан-Батор, Монголия

*Контактный автор: Ружников Геннадий Михайлович, e-mail: rugnikov@icc.ru

Поступила 08 июня 2022 г., принята в печать 30 июня 2022 г.

Предложен подход цифровой трансформации экологического мониторинга оз. Хубсугул и его прилегающих территорий с использованием сервис-ориентированной парадигмы, инфраструктурного подхода, декларативных спецификаций, а также сквозных и Web-технологий сбора и обработки больших объемов тематических пространственно-временных данных.

Ключевые слова: экологический мониторинг, большие объемы пространственно-временных данных, цифровизация, геопортал.

Цитирование: Бычков И.В., Ружников Г.М., Федоров Р.К., Попова А.К., Будээбазар А., Балт Б., Ууганбаатар Д. Цифровая трансформация экологического мониторинга оз. Хубсугул и Прихубсугуля. Вычислительные технологии. 2022; 27(5):14–29. DOI:10.25743/ICT.2022.27.5.003.

Введение

Хубсугул — пресноводное озеро на севере Монголии, расположенное южнее хребта Мунку-Сардык, Восточный Саян. Возраст менее 6 млн лет, моложе Байкала, возраст которого оценивается приблизительно в 25 млн лет. Высота над уровнем моря 1645 м (высота оз. Байкал 456 м), длина 136 км, а наибольшая ширина 36.5 км, наибольшая глубина 262 м, т.е. это самое глубокое озеро в Монголии. Площадь водной поверхности 2760 кв. км. Объем водной массы 383.3 куб. км. Наибольшая температура воды на поверхности (у берега летом) +10... +14 °С. Наибольшая температура воздуха летом +10... +15 °С, зимой –20... –25 °С. Содержит 1–2 % мировых запасов пресной воды (в Центральной Азии это второе по величине озеро после Байкала). В 1992 г. был образован Хубсугульский национальный парк (838.1 тыс. га), который представляет собой уникальный природный комплекс Монголии.

В геологическом плане оз. Хубсугул является водоемом байкальского типа и расположено в одном разломе земной коры (Байкальской рифтовой зоне) с оз. Байкал и имеет схожие с ним серповидную форму и асимметричные подводные склоны котловины.

Вообще береговые ландшафты и природные условия территорий, на которых расположены озера, и условия их функционирования достаточно близки. Это обосновывает перспективность проведения совместных научных исследований для формирования их комплексного экологического мониторинга.

1. Экологический мониторинг

Экологический мониторинг природной территории представляет собой систему регулярных наблюдений в пространстве и во времени за состоянием окружающей среды и ее изменениями под воздействием природных и антропогенных факторов [1]. Такой мониторинг включает сбор данных о фактическом состоянии окружающей среды, обработку и анализ этих данных с выявлением динамики состояния и выработкой на основе научно обоснованных экологических прогнозов рекомендаций по развитию территорий. Для обеспечения унификации мониторинга разрабатывается регламентированный список параметров состояния окружающей среды, утверждаются требования к используемым средствам, приемам измерений, частоте отбора проб и методам исследований [2–4].

Следует отметить, что фундаментальные междисциплинарные научные исследования уникальных экологических систем, проводимые в мире и России, базируются на мониторинге, хранении и обработке больших объемов тематических научных данных и знаний, имеющих пространственно-временной характер, а также на использовании распределенных информационно-вычислительных технологий и их приложений, современных сетей передачи данных.

ЮНЕСКО создает глобальную систему наблюдения за океаном (Global Ocean Observing System, GOOS, <https://www.goosocean.org>). В рамках GOOS разрабатываются информационные системы, технологии наблюдений, системы научного анализа и прогнозирования. Система помогает координировать поток данных об основных переменных океана для формирования прогнозов климата, предупреждений о неблагоприятных ситуациях, планирования защиты устойчивого состояния океана.

ООН в рамках программы по окружающей среде (ЮНЕП) накопила более 15 000 единиц научных данных: методики и платформы данных в режиме реального времени, ключевые доклады, публикации, информационные бюллетени, интерактивные материалы. Они доступны через хранилище открытых данных, позволяющее искать и долговременно хранить информацию об окружающей среде. В Европе разрабатывается проект Цифровая Земля (Digital Earth, https://joint-research-centre.ec.europa.eu/scientific-activities-z/digital-earth_en) как концепция интерактивной цифровой копии всей планеты, которая может способствовать общему пониманию многочисленных отношений между природной средой и обществом. Задача Digital Earth заключается в том, чтобы соединить множество информационных систем сбора данных и участников на всех уровнях, от самого локального до глобального, для более четкого представления всей сложности функционирования нашей планеты. Ключевым строительным блоком для Digital Earth являются тематические информационные инфраструктуры, занимающиеся экологической и географической информацией (инфраструктуры пространственных данных).

Сервис Copernicus по изменению климата (Copernicus Climate Change Service, C3S, <https://climate.copernicus.eu>) направлен на улучшение планирования мер по смягчению последствий изменения климата и адаптации к ним, помощь в управлении чрезвычайными ситуациями, содействие приложениям в различных областях, таких как здравоохранение, сельское/лесное хозяйство, энергетика, транспорт и т. д. Наборы данных C3S включают в себя исторические климатические данные и оценки основных климатических переменных, полученные из наблюдений за Землей, анализа климата прошлых наблюдений, сезонных прогнозов, прогнозов изменения климата. Доступен онлайн-инструментарий, позволяющий пользователям создавать рабочие процессы и приложения, адаптированные к их потребностям.

В Китае мониторинг проводят на основе ГИС и данных дистанционного зондирования Земли (используя собственные спутники экологического мониторинга Beijing-3, Gaofen-5, 7, 11), интегрированных с наземными наблюдениями. Например, в Шанхае развивают платформу мониторинга, охватывающую наблюдение за биоразнообразием, выбросами углерода, качеством воды, городскими тепловыми островами. Система включает в себя функции по сбору и обработке данных, поддержке принятия решений.

В России информационная система экологического мониторинга разработана для Черноморского побережья Кавказа (<https://www.rpatyphoon.ru/activities/ecomonitoring/ecomonitor-caucasus.php>). Она включает в себя измерение концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и поверхностных водах, метеорологических величин, отбор проб в почвах и снежном покрове, наблюдение за редкими и исчезающими видами растений и животных. Система позволяет давать оценку и прогноз загрязнений, чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

В Москве система экомониторинга (<https://mosecom.mos.ru>) охватывает наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха, воды, почв, зеленых насаждений, уровнем шума, опасными геологическими процессами. Проведение регулярных экологических обследований территории сочетается с установкой автоматических станций контроля, вся полученная информация сохраняется в Единый городской фонд данных. Данные мониторинга атмосферного воздуха выкладываются в открытом доступе, включая как оперативные измерения, так и архивные данные с 2008 г.

Для Камчатки создан портал экологического мониторинга (<https://eco.kamgov.ru>). На нем размещены данные по составу атмосферного воздуха, морской воде, поверхностным водам, радиационной обстановке, поставляемые региональными управлениями Росприроднадзора и Росгидромета, КамчатНИРО. На интерактивной карте портала отображены данные оперативного мониторинга и архивные данные с 2020 г.

В Красноярском крае развивают портал (<http://gis.krasn.ru>), который обеспечивает сбор данных о загрязнении атмосферного воздуха, метеорологической и климатической информации, данных гидрологических наблюдений, данных о состоянии лесов, биоразнообразии территории.

В Новосибирске в НГТУ НЭТИ создают программно-аппаратный комплекс дистанционного сбора информации о загрязнении атмосферы с автономных датчиков. Он позволяет как собирать данные, так и строить прогнозы зон распространения загрязнений, анализировать вклад каждого источника.

Ряд информационных систем экологического мониторинга создан в Томске (<https://ogbu.green.tsu.ru>): ГИС Мониторинг качества окружающей среды, лесные пожары, Красная книга, паводок, особо охраняемые природные территории, радиационная обстановка. Все системы находятся в открытом доступе, предоставляют интерактивную карту с данными наблюдений за различными экологическими параметрами, их сравнение с ПДК.

В Западной Сибири и на Урале разрабатывают проект по управлению водными ресурсами “Цифровой Обь-Иртышский бассейн”, призванный сформировать комплексную систему управления водными ресурсами с применением больших данных и технологии цифровых двойников. Целью проекта является цифровое моделирование сибирских рек для выявления факторов, влияющих на уровень техногенной нагрузки, фиксации нарушений природоохранного законодательства, а также для определения источников загрязнения и размера ущерба.

2. Проблемы экологии Монголии

К проблемам состояния экологии в Монголии можно отнести:

- экстремальные погодно-климатические изменения (стихийные бедствия): многоснежные зимы и штормы, сильные ветра, а также экстремальные температуры, таяние высокогорных ледников, деградацию вечной мерзлоты, наводнения, периоды засухи и увеличение транспирации растений;
- обезлесение из-за нерациональных методов лесозаготовок, пожаров, вредителей и болезней леса;
- деградацию земель и опустынивание из-за превращения плодородных земель в пустыни и потери растительного покрова. Установлено, что опустынивание вызвано не природными (изменение климата), а в основном (примерно 87 %) человеческими факторами. К таким антропогенным факторам относят чрезмерный выпас скота, эрозию почв, сельскохозяйственных угодий, пожары;
- утрату природного биоразнообразия, в том числе редких, исчезающих видов из-за растущего населения и спроса на природные ресурсы, которые влияют на такие виды деятельности, как сельское хозяйство, добыча полезных ископаемых, рыболовство и охота;
- загрязнение городского воздуха, которое происходит в городах Монголии от выбросов транспорта, теплоэлектростанций, промышленной деятельности и юрт. Транспортные средства ежегодно выбрасывают в воздух 70 т загрязняющих веществ;
- загрязнение вод Монголии, связанное с развитием горнодобывающей промышленности. Так, золотодобыча, составляющая 60 % промышленности, пережила значительный рост, который вызвал загрязнение рек. В свою очередь, медно-молибденовый горно-обогатительный комбинат в г. Эрдэнете использует воду из рек Селенга и Эрдэнетийн-Гол. Добыча полезных ископаемых стала причиной загрязнения более 28 рек и ручьев.

Загрязнение воды также связано со сбросом неочищенных и получищенных человеческих и промышленных отходов. Ежегодно более 120 млн м³ отходов утилизируется без очистки [5–7].

Почти все перечисленные выше экологические проблемы характерны для оз. Хубсугул и Прихубсугуля, для комплексных научных исследований которых в 1970 г. была создана «Советско-Монгольская комплексная Хубсугульская экспедиция».

3. Научный мониторинг экологии оз. Хубсугул и прилегающих к нему территорий

В органах власти и управления, а также институтах Монголии накоплены большие объемы уникальных данных о состоянии природной среды, полученные с использованием многолетних экспедиционных, маршрутных и стационарных исследований, дистанционного зондирования Земли. Все это позволяет использовать их в комплексном экологическом мониторинге и прогнозировании изменений, происходящих в основных типах экосистем оз. Хубсугул и Прихубсугуля под воздействием антропогенных факторов и аридизации климата, происходящих в последние годы.

Следует отметить направления научных исследований и проектов, в том числе международных, проводимых институтами Академии наук Монголии (АНМ).

- Институт географии и геоэкологии АНМ:
 - природные условия Хангай-Хубсугульской горной области;
 - региональное изучение физической географии западной части Хубсугула;
 - биоразнообразие оз. Хубсугул и изменения в таянии вечной мерзлоты (международный проект);
 - качество воды и экологическое состояние притоков оз. Хубсугул;
 - ценность экосистемы национального парка оз. Хубсугул и расчета платы за экосистемные услуги;
 - влияние изменения климата на водные ресурсы (ледники, вечная мерзлота) Алтае-Саянского и Хангайского горных районов (международный проект);
 - влияние экосистем вечной мерзлоты на жизнь человека, влияние изменения климата на землепользование на примере Монголии (совместный проект с зарубежными странами);
 - пресноводные рыбы в оз. Хубсугул.
- Институт геологии АНМ:
 - новая геологическая история бассейна оз. Хубсугул и четвертичные изменения климата;
 - донные отложения оз. Хубсугул и древний климат;
 - комплексное изучение оз. Хубсугул (совместная монголо-российская программа);
 - бурение на оз. Хубсугул и бурение впадины Дархад (совместные проекты Япония — Россия — Корея — Монголия);
 - геохимия донных отложений оз. Хубсугул и палеоклиматические реконструкции;
 - разработка методического обеспечения на базе ICP-MS для выявления климаточувствительных элементов в осадках оз. Хубсугул.
- Институт астрономии и геофизики АНМ (ИАиГ АНМ):
 - установка 26 сейсмических широкополосных станций в районах оз. Хубсугул и Дархад для определения глубинных структур района (200 × 200 км) (совместно с Лехайским университетом);
 - установка 21.09.2021 в местности Халуун-Уурт вблизи оз. Хубсугул станции — сейсмометр Guralp CMG-3ESPC (120 с, 100 Гц) и сейсмоприбор Guralp Minimus. Данные со станции постоянно регистрируются в ИАиГ АНМ;
 - установка передвижной сеймостанции в составе четырех постов для изучения сейсмической активности и активного образования трещин. С помощью InSAR обнаружена 30-сантиметровая просадка на берегу оз. Хубсугул.
- Ботанический Сад-Институт АНМ:
 - исследование высших грибов Прихубсугулья, где сосредоточены 75 видов (12% от всех видов Монголии);
 - исследование мхов Прихубсугулья. Собрано 2940 образцов мха. При обработке этих материалов определено 52 семейства, 144 рода и 315 видов. Впервые отмечены 34 вида для флоры Монголии;
 - комплексные стационарные исследования водно-болотных экосистем Прихубсугулья (проводились совместно с учеными и студентами Монгольского государственного университета, Университета образования, Университета Канавава Японии).

4. Гидрологическая и гидрогеологическая изученность бассейна оз. Хубсугул

В период 1970–1990 гг. проводились работы Советско-Монгольской (с 1989 г. Российско-Монгольской) комплексной Хубсугульской экспедиции ученых и студентов Монгольского государственного (национального) и Иркутского государственного университетов. Опубликован ряд серийных выпусков научных статей “Природные условия и ресурсы Прихубсугулья”, тематических карт.

В рамках НИР “Природные условия и ресурсы Прихубсугулья” участниками экспедиции выполнены исследования:

- постоянное наблюдение за режимом поверхностных и подземных вод в бассейнах р. Ханх гол, Хороо гол, Тойн гол, частично Джиглиг гол;
- гидрографическое описание водотоков, впадающих в оз. Хубсугул;
- описание и исследование источников, связанных с различными типами подземных вод;
- измерение расходов воды и уклонов водной поверхности рек, впадающих в оз. Хубсугул, определение мутности воды;
- гидрохимические исследования поверхностных, атмосферных и подземных вод;
- гидрологические наблюдения за оз. Хубсугул (уровень вод, температура воды, прозрачность);
- составлен водный баланс оз. Хубсугул за 1971–1991 гг.;
- определены морфометрические характеристики рек, впадающих в оз. Хубсугул;
- определены среднегодовой сток рек, впадающих в оз. Хубсугул, и их подземные составляющие.

Созданы следующие тематические карты:

- средний годовой речной сток (М 1:2 000 000);
- густота речной сети Прихубсугулья (М 1:2 000 000);
- гидрогеологические условия Прихубсугулья (М 1:1 000 000).

В гидрологических исследованиях акцент сделан на постоянное ведение наблюдений в репрезентативных (типичных) бассейнах, использование метода К.П. Воскресенского (расчленение гидрографа стока репрезентативных рек), индикационный метод определения среднегодового стока рек, а также на картографических методах и др. [8].

Сотрудниками Монгольского государственного (национального) университета и учеными Америки и Японии в рамках проекта ЭКОБИОМ (1995–1998 гг.) проводились совместные междисциплинарные исследования южной части оз. Хубсугул по направлениям:

- влияние метеорологических условий на проживание населения Прихубсугулья;
- химический состав воды оз. Хубсугул;
- исследование растительного покрова Прихубсугулья;
- экологический мониторинг воды рек, впадающих в оз. Хубсугул.

В результате совместных экспедиций и исследований (в 1971–1991 гг.) научных сотрудников Монгольского государственного (национального) и Иркутского государственного университетов сформирована обширная база гидрометеоданных стационарных станций наблюдения. Эти показатели измеряются по кварталам каждые 6 ч в сутки на шести стационарных и 26 мобильных станциях.

Кроме того, с участием немецких специалистов подготовлены тематические базы данных государственного мониторинга (лес, водные ресурсы, атмосфера) территорий

(аймак, сумон) Монголии в формате международных стандартов геоинформационных систем.

Научные исследования экологических проблем основных типов экосистем Монголии позволили обосновать актуальность перевода мониторинга на новый технологический уклад — цифровую трансформацию для оценки и прогнозирования изменений, происходящих на оз. Хубсугул и в Прихубсугулье под воздействием антропогенных факторов и аридизации климата.

5. Цифровая трансформация

Цифровая трансформация является ведущим трендом мирового технологического развития, это связано с прорывом в развитии цифровых технологий и использованием пространственно-временных данных, увеличением мощностей вычислительных кластеров, созданием сетей 5G, интернета вещей (IoT), облачных вычислений.

Трансформация запускает системный подход к использованию цифровых технологий и информационно-вычислительных ресурсов, а также к внедрению киберфизических систем, замене физических или аналоговых ресурсов цифровыми. При этом базовым становится принцип “все как услуга”, причем услуга, ориентированная на комплексное использование цифровых информационно-вычислительных ресурсов (в том числе государственных) с учетом требований интероперабельности и безопасности.

Первым этапом проведения цифровой трансформации является создание цифровой экосистемы (ЦЭС) как партнерства участников, осуществляющих постоянное взаимодействие принадлежащих им цифровых платформ, прикладных интернет-сервисов, аналитических систем, информационных систем и сервисов разработки новых услуг.

Цифровая экосистема, как открытая площадка, интегрирует работу участников, каждый из которых устанавливает отношения с другими на основе их цифровых платформ (ЦП, digital platforms), предлагая свои сильные направления деятельности, услуги и отдавая на аутсорсинг непрофильные [9]. Такое партнерство, охватывающее широкий спектр функций участников, позволяет получать синергетический эффект от внедрения услуг, делает системные компоненты доступными в качестве сервисов. Участники ЦЭС, поддерживаемой цифровой платформой, получают новые формы организации научных исследований и принятия управленческих решений.

Цифровая платформа, как система алгоритмизированных взаимоотношений участников мониторинга, аккумулирует в себе необходимые новейшие технологии хранения цифровых пространственно-временных данных, предоставляя пользователям открытый доступ к информации (данным), сервисам их обработки и, самое главное, к информационным ресурсам участников ЦЭС.

По уровню обработки информации выделяют базовые типы цифровых платформ: инструментальную, инфраструктурную и прикладную, которые могут образовывать иерархию [10–13].

Инструментальная цифровая платформа (ИЦП) содержит инструментальное программное обеспечение поддержки доступа участников к разработке и отладке прикладных информационных и программно-аппаратных средств путем предоставления типовых функций, интерфейсов сервисов обработки пространственно-временных данных. Это позволяет сократить сроки создания сервисов и их отладки.

Методология разработки программного обеспечения инструментальной цифровой платформы базируется на комплексном применении современных сервис-ориентированных и сквозных технологий, распределенном хранении, обработке данных, использовании декларативных спецификаций и интеллектуализации с использованием методов и технологий глубокого обучения. Декларативные спецификации обеспечивают компактность, выразительность и предметную ориентированность, включая возможность интерпретации трансформационными и другими процедурами. Использование сервис-ориентированной архитектуры позволяет проводить полноценный учет распределенных информационных ресурсов в сочетании с легкостью тестирования, масштабируемостью и возможностью повторного использования создаваемых сервисов.

Инструментальная цифровая платформа включает инструменты:

- для разработки WPS-сервисов и их композиций обработки данных, реализующих стандарты интероперабельности программного обеспечения;
- для создания сервисов обмена, предоставления, сбора данных;
- для развертывания геопорталов, поддерживающих доступ к тематическим данным и сервисам.

Информационная среда ИЦП включает геопорталы, сервисы получения и обработки пространственно-временных тематических данных на основе открытых стандартов. Сервисы могут быть реализованы на различных операционных системах, средах разработки и т. д. Применение механизмов виртуализации решает проблему совместимости сервисов. Ввиду многообразия данных и сервисов их обработки могут создаваться тематические геопорталы, интегрирующие данные, сервисы и упрощающие работу пользователей.

Инструментальная цифровая платформа содержит инструменты создания типовых геопорталов и сервисов в облачной среде центра обработки данных (ЦОД) (рис. 1). Применяются заранее сконфигурированные шаблоны виртуальных машин. Имеются шаблоны с системами ZOO-Project, 52° North Web Processing Service, упрощающие реализацию стандарта WPS.

Геопортал включает инструменты создания сервисов данных и их композиций. Сервисы данных предназначены для организации ввода, редактирования реляционных данных с пространственной привязкой и предоставления данных на основе REST. Пользователь определяет структуру данных, способы отображения и права доступа. Реализована регламентированная передача данных для обработки WPS-сервисами. В рамках геопортала можно создавать новые WPS-сервисы путем композиции существующих сервисов, используя язык JavaScript или JSON спецификации DAG.

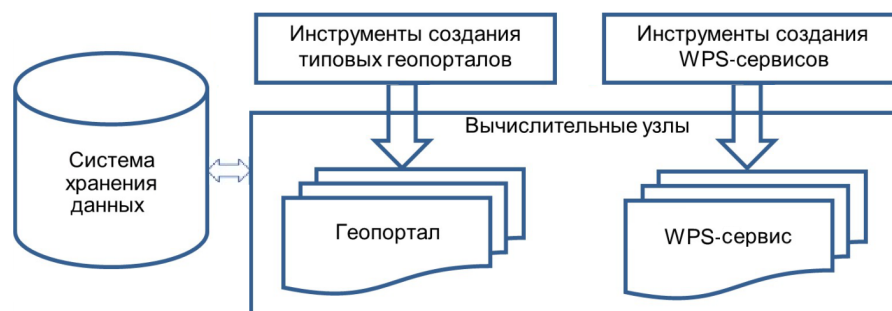


Рис. 1. Центр обработки данных

Fig. 1. Data center

Инструментальная цифровая платформа обеспечивает масштабирование информационно-вычислительных ресурсов и ресурсов хранения и обработки данных центров коллективного пользования с учетом роста числа задач и объемов данных мониторинга.

Инфраструктурная цифровая платформа (ИнЦП) содержит источники данных и средства их технологической обработки, что позволяет строить необходимые прикладные сервисы. Методология создания ИнЦП включает средства доставки, хранения пространственно-временных данных и их обработки на основе цифровых сервис-ориентированных и сквозных технологий, декларативных спецификаций и интеллектуализации (с использованием методов и технологий глубокого обучения), а также инфраструктуру развертывания ИЦП и средства разработки и интеграции прикладных платформ.

Инструментальная и инфраструктурная цифровые платформы включают:

- каталог сервисов обработки, поддерживающих обмен между участниками информацией о существующих сервисах;
- каталог сервисов данных, обеспечивающий обмен информацией о существующих сервисах предоставления данных между участниками;
- базовые пространственные данные, обеспечивающие единые справочники и классификаторы;
- базовые пространственные сервисы, обеспечивающие работу ИЦП и ИнЦП;
- масштабируемые вычислительные ресурсы, предназначенные для выполнения сервисов;
- систему планирования и выполнения сервисов на распределенных вычислительных ресурсах;
- сервисы публикации данных в виде карт и диаграмм.

Инструментальная и инфраструктурная цифровые платформы включают систему алгоритмизированных взаимоотношений в единой информационной среде (геопортального типа), модели и технологические разработки, пакеты цифровых технологий в области обработки больших объемов пространственно-временных данных.

Развитие сервис-ориентированного подхода и компонентов инфраструктуры пространственных данных, а также центра обработки данных позволяет упростить применение систем моделирования за счет предоставления программного и пользовательского интерфейса, реализации получения данных мониторинга и т. д.

Инфраструктурные и прикладные цифровые платформы, обладая единой информационной средой взаимодействия участников и подключенными источниками данных и сервисов, обеспечивают снижение транзакционных издержек.

Прикладная цифровая платформа (ПЦП) оперирует обработанными тематическими данными отдельного участника ЦЭС или их группы, поддерживает алгоритмический обмен услугами (сервисами) между ними с использованием единой информационной среды и информационно-технологической инфраструктуры. Эффект достигается за счет объединения множества потоков данных и услуг (сервисов) в рамках информационной среды. Прикладная цифровая платформа включает геопортал, сервисы предоставления данных, тематические WPS-сервисы.

Основным компонентом цифровой платформы является геопортал (рис. 2), предоставляющий участникам ЦЭС пространственно-временные тематические данные и сервисы их обработки на основе открытых стандартов OGC и Web-сервисов, которые позволяют унифицировать описание информационных процессов, включая исходные данные и результаты, а также доступ к ним и их выполнение. По определению геопортал

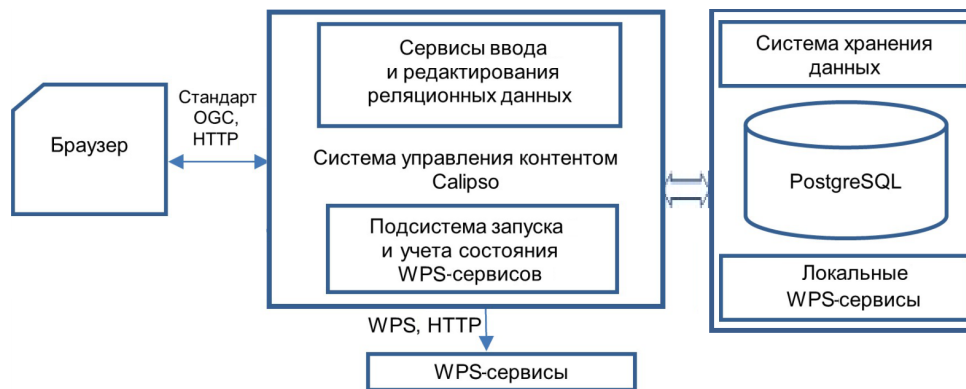


Рис. 2. Структура геопортала

Fig. 2. Geoportal structure

является общей точкой доступа участников к информационным ресурсам цифровой платформы и технологиям их обработки [14, 15].

Геопортал включает следующие компоненты:

- систему управления контентом, реализующую функции работы с пользователями, верстки Web-страниц и т. д.;
- базу данных PostgreSQL (с расширением для обработки пространственных данных PostGIS), предназначенную для хранения пользовательских данных;
- систему хранения данных для программно-аппаратного обеспечения хранения пользовательских данных;
- сервисы ввода и редактирования реляционных данных, позволяющие создавать пользователям собственные таблицы с пространственными атрибутами, просматривать и редактировать данные в виде таблиц, карт;
- подсистему запуска и учета состояния выполнения WPS-сервисов, осуществляющую управление, планирование, создание композиций, выполнение WPS-сервисов;
- WPS-сервисы, содержащие алгоритмы обработки и анализа пространственно-временных данных (могут находиться локально и удаленно).

Каждому пользователю предоставляется схема базы данных, в которой он может создавать таблицы. СУБД может функционировать на каждой виртуальной машине геопорталов или на общей СУБД. Все рассмотренные компоненты архитектуры функционируют в рамках облачной среды [16].

6. Методология организации цифрового экологического мониторинга оз. Хубсугул и Прихубсугулья

В институтах Академии наук Монголии, вузах, органах власти и управления накоплены уникальные данные и знания о состоянии экологии страны, полученные при проведении многолетних экспедиционных, стационарных исследований, дистанционного зондирования Земли, для обработки которых используются их программно-аппаратные комплексы и телекоммуникационная инфраструктура.

Пространственно-временной характер, распределенность данных мониторинга оз. Хубсугул и прилегающих к нему территорий обуславливают необходимость применения стандартов Open Geospatial Consortium (OGC), основ инфраструктуры пространственных данных (ИПД) интеграционного типа, сервис-ориентированной парадигмы, а также внедрения сквозных технологий, больших данных и телекоммуникационной

инфраструктуры для организации взаимодействия участников. Это суммарно показывает актуальность проведения цифровой трансформации экологического мониторинга оз. Хубсугул и прилегающих к нему территорий для комплексной оценки и прогнозирования изменений от воздействий антропогенных факторов и аридизации климата, происходящих в последние годы.

Цифровая трансформация экологического мониторинга оз. Хубсугул и его прилегающих территорий предполагает создание цифровой экосистемы (ЦЭС) участников, осуществляющих постоянное взаимодействие на основе их цифровых платформ и информационных ресурсов. Так как по определению ЦЭС строится вокруг какого-либо массового процесса, в качестве такого процесса можно рассматривать ведение цифрового экологического мониторинга оз. Хубсугул и Прихубсугуля, где в качестве участников ЦЭС планируются быть Институт географии и геоэкологии МАН, Институт астрономии и геофизики МАН, Институт математики и цифровых технологий МАН, Монгольский государственный университет, Университет науки и технологий, Сельскохозяйственный университет, Университет медицинских наук, а также водное агентство Министерства окружающей среды и туризма.

Цифровая экосистема, охватывая широкий спектр функций участников цифрового мониторинга оз. Хубсугул и его прилегающих территорий, позволяет создать синергетический эффект от интеграции и внедрения их услуг, сделать системные компоненты доступными в качестве сервисов. В дальнейшем планируется подключить к ЦЭС уполномоченные территориальные органы власти и управления Монголии, а также институты СО РАН.

В свою очередь, создание цифровой платформы экологического мониторинга оз. Хубсугул и Прихубсугуля позволит аккумулировать в себе необходимые технологии для хранения цифровых пространственно-временных данных, предоставляя пользователям открытый доступ к информации, сервисам обработки данных.

Функции цифровой платформы мониторинга оз. Хубсугул и его прибрежной территории позволят:

- формировать динамическое обновление и анализ цифровых профилей участников;
- обеспечивать доступ всех участников к структурированной информации о состоянии экологии оз. Хубсугул и Прихубсугуля;
- аккумулировать в себе необходимые модели, информационные технологии, услуги и предоставлять всем участникам пространственно-временные данные мониторинга оз. Хубсугул и Прихубсугуля, а также сервисы их обработки;
- объединять несколько услуг (в том числе удаленных), предоставляемых разными участниками цифровой платформы, и привлекать сторонних в качестве партнеров, которые могут быть одновременно потребителями и поставщиками услуг;
- сокращать издержки при организации взаимодействия участников, повышать прозрачность и контроль за принимаемыми решениями и предоставленными услугами.

Проведенные учеными Монголии исследования экологического мониторинга оз. Хубсугул и Прихубсугуля позволили определить первоочередные направления цифровой трансформации мониторинга озера и прилегающих к нему территорий [17]:

- формирование основ цифровых экосистем и платформ экологического мониторинга (инфраструктурной и прикладной);
- разработка основ цифрового мониторинга экстремальных природных явлений оз. Хубсугул и его прибрежной территории;

- создание цифрового мониторинга гидрологических режимов водоемов Прихубсугулья;
- разработка основ оценки экологических рисков состояния растительного покрова Прихубсугулья.

Это подчеркивает научную значимость проведения междисциплинарных научных исследований по разработке цифровых платформ экологического мониторинга оз. Хубсугул с использованием сквозных технологий и их наполнению математическими и информационными моделями отдельных процессов в целом, дополненных инструментами сбора и анализа пространственно-временных данных экологического мониторинга территорий, в том числе данных дистанционного зондирования Земли и данных с наземных сенсорных сетей и систем.

Итак, цифровая трансформация экологического мониторинга оз. Хубсугул и прилегающих к нему территорий позволит [18, 19]:

- внедрить современные формы организации цифрового мониторинга с привлечением учреждений научно-образовательного комплекса, бизнеса и населения;
- привлечь и подключить новых участников мониторинга за счет оперативного формирования и актуализации данных, сервисов и услуг;
- внедрить киберфизические системы и датчики в оборудование, осуществить переход на цифровые данные и способы их передачи;
- сформировать динамически изменяющийся цифровой профиль, содержащий исторические и актуальные данные о состоянии озера и прилегающих территорий, основанные на большом объеме накопленных пространственно-временных данных;
- организовать непрерывный (24/12/365) интеграционный мониторинг оз. Хубсугул и прилегающих к нему территорий и сформировать большие объемы разноформатных, тематических, пространственно-временных данных;
- внедрить современное оборудование мониторинга, использующее интеллектуальные робототехнические и информационно-телекоммуникационные системы;
- расширить спектр оказываемых услуг за счет эффективного применения технологий дистанционного зондирования Земли, ГЛОНАСС-GPS, лидарных съемок;
- внедрить передовые цифровые технологии: “сквозные” (Big Data, искусственный интеллект и др.), информационного моделирования, интеллектуального (когнитивного) анализа данных и прогнозирования рисков и т. д.;
- внедрить методологию создания сети распределенных центров обработки и хранения пространственно-временных данных большого объема и различных форматов (в том числе слабо структурированных);
- сократить сроки на принятие решений при оценке оперативной ситуации, предотвращении и снижении негативных последствий от экологических катастроф.

В комплексных научных исследованиях по цифровой трансформации экологического мониторинга окружающей среды оз. Хубсугул и Прихубсугулья с российской стороны планируется участие Лимнологического института СО РАН, Института земной коры СО РАН, Сибирского института физиологии и биохимии растений СО РАН, Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Института динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН.

За научно-технологическую основу цифровой трансформации экологического мониторинга оз. Хубсугул и его прибрежной территории взяты результаты крупного научного проекта Минобрнауки России “Фундаментальные основы, методы и технологии

цифрового мониторинга и прогнозирования экологической ситуации на Байкальской природной территории” [20, 21], который выполняют ученые 14 институтов Сибирского отделения РАН из Иркутска, Новосибирска, Томска, Улан-Удэ и Ангарска. Основным исполнителем и координатором проекта выступает Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН.

В качестве информационно-вычислительных и телекоммуникационных компонентов поддержки цифровой трансформации могут использоваться центры коллективного пользования ИДСТУ СО РАН “Интегрированная информационно-вычислительная сеть Иркутского научно-образовательного комплекса” и “Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН”, а также для высокопроизводительных расчетов, глубокого машинного обучения сеть из четырех мощных серверов с GPU.

На первом этапе организации научных исследований в феврале текущего года подписано соглашение о научном сотрудничестве между Институтом динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН и Институтом математики и цифровых технологий Академии наук Монголии. Таким образом, совместные работы ученых России и Монголии по цифровой трансформации экологического мониторинга оз. Хубсугул и прилегающих к нему территорий позволят внедрить современные методы и технологии в научные исследования экологических процессов, происходящих на трансграничных территориях.

Благодарности. Работа поддержана грантом № 075-15-2020-787 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект “Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории”).

Список литературы

- [1] Федеральный закон “Об охране окружающей среды” от 10.01.2002 № 7-ФЗ. Адрес доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823. (дата обращения 29.05.2022)
- [2] Постановление Правительства РФ от 9 августа 2013 г. № 681 “О государственном экологическом мониторинге и государственном фонде данных государственного экологического мониторинга”. Адрес доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_150638. (дата обращения 29.05.2022)
- [3] Федеральный закон “Об охране озера Байкал” № 94-ФЗ от 1 мая 1999 г. Собрание законодательства Российской Федерации. 1999; (18):2220. Адрес доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_22964. (дата обращения 29.05.2022)
- [4] Постановление Правительства РФ от 2 февраля 2015 г. № 85 “Об утверждении Положения о государственном экологическом мониторинге уникальной экологической системы озера Байкал”. Адрес доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_174820/92d969e26a4326c5d02fa79b8f9cf4994ee5633b. (дата обращения 29.05.2022)
- [5] Постановление Правительства Российской Федерации от 2 марта 2019 г. № 234 “О системе управления реализацией национальной программы “Цифровая экономика Российской Федерации”. Адрес доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_319701. (дата обращения 29.05.2022).
- [6] Баяраа У., Казеннов В.В. Экологические проблемы некоторых районов Монголии и трансграничных территорий. Экология урбанизированных территорий. 2011; (3):65–69.

-
- [7] **Бандандорж Ц., Одончимэг Д., Удвалцэцэг Г.** Обзорная информация социально-экономической обстановки бассейна реки Селенги на территории Монголии. Селенга река без границ. 2002; 6–7.
- [8] **Неронов В.М., Миланова Е.В., Жигж С.** Охраняемые территории МНР: состояние и перспективы развития. Природные условия, растительный покров и животный мир Монголии. 1988; 113–127.
- [9] Экосистемы Монголии: распространение и современное состояние. М.: Наука; 1995: 224.
- [10] **Johnson N., Druckenmiller M.L., Danielsen F., Pulsifer P.L.** The use of digital platforms for community-based monitoring. *Bioscience*. 2021; 71(5):452–466. DOI:10.1093/biosci/biaa162.
- [11] **Constantinides P., Henfridsson O., Parker G.G.** Introduction — platforms and infrastructures in the digital age. *Information Systems Research*. 2018; 29(2):381–400. DOI:10.1287/isre.2018.0794.
- [12] **Hein A., Schreieck M., Riasanow T., Setzke D.S., Wiesche M., Bohm M., Krcmar H.** Digital platform ecosystems. *Electronic Markets*. 2020; (30):87–98. DOI:10.1007/s12525-019-00377-4.
- [13] **De Reuver M., Sorensen C., Basole R.C.** The digital platform: a research agenda. *Journal of Information Technology*. 2018; (33):124–135.
- [14] **Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Hmelnov A.E., Fedorov R.F., Madzhara T.I., Popova A.K.** Digital monitoring of lake Baikal and its coastal area. *CEUR Workshop Proceedings*. 2019; (2463):13–23.
- [15] **Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K., Popova A.K.** An approach to digital environmental monitoring of forest resources of the Baikal Natural Territory. *Proceedings of the “International Conference and Early Career Scientists School on Environmental Observations, Modeling and Information Systems. Selected Papers”*. Tomsk; 2020: 328–329. (In Russ.)
- [16] **Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K., Khmelnov A.E., Popova A.K.** Digital environmental monitoring technology Baikal Natural Territory. *Proceedings of the 3rd Scientific-Practical Workshop “Information Technologies: Algorithms, Models, Systems (ITAMS 2020)”*. 2020; (2677):1–7.
- [17] **Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K., Popova A.K.** A platform approach to the organization of digital forest monitoring of the Baikal Natural Territory. *IOP Conference Series: Earth Environmental Science*. 2020; (611):012056. DOI:10.1088/1755-1315/611/1/012056.
- [18] **Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K., Khmelnov A.E., Popova A.K.** Organization of digital monitoring of the Baikal Natural Territory. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; (629):012067. DOI:10.1088/1755-1315/629/1/012067.
- [19] **Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K., Popova A.K.** Digital platform for forest resources monitoring in the Baikal Natural Territory. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; (1864):012111. DOI:10.1088/1742-6596/1864/1/012111.
- [20] **Avramenko Y.V., Popova A.K., Fedorov R.K.** Cloud service of Geoportal ISDCT SB RAS for machine learning. *Proceedings of the 4th Scientific-Practical Workshop “Information Technologies: Algorithms, Models, Systems”*. 2021; (2984):6–10.
- [21] **Бычков И.В., Ружников Г.М., Федоров Р.К., Попова А.К., Авраменко Ю.В.** Классификация космоснимков Sentinel-2 Байкальской природной территории. *Компьютерная оптика*. 2022; 46(1):90–96. DOI:10.18287/2412-6179-CO-1022.
-

Digital transformation of the environmental monitoring for Lake Khubsugul and Prikhubsugulye

BYCHKOV IGOR V.¹, RUZHNIKOV GENNADY M.^{1,*}, FEDOROV ROMAN K.¹,
POPOVA ANASTASIA K.¹, BUDIBAZAR AVID², BALT BATGEREL³,
UGANBAATAR DULAMRCHAGA³

¹Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS, 664033, Irkutsk, Russia

²Academy of Sciences of Mongolia, 14200, Ulaanbaatar, Mongolia

³Institute of Mathematics and Digital Technologies, 13330, Ulaanbaatar, Mongolia

*Corresponding author: Ruzhnikov Gennady M., e-mail: rugnikov@icc.ru

Received June 08, 2022, accepted June 30, 2022.

Abstract

An approach of digital transformation of ecological monitoring of Lake Khubsugul and its adjacent territories using a service-oriented paradigm, infrastructure approach, declarative specifications, as well as end-to-end and Web technologies for collecting and processing large volumes of thematic spatial and temporal data is proposed. The review of existing digital environmental monitoring systems in Russia and in the world is presented. We describe the problems of Mongolian ecology, hydrological and hydrogeological knowledge of the Lake Khubsugul basin along with the characteristics of the existing scientific monitoring of Lake Khubsugul and its adjacent territories.

Keywords: environmental monitoring, large volumes of spatio-temporal data, digitalization, geoportal.

Citation: Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K., Popova A.K., Budibazar A., Balt B., Uganbaatar D. Digital transformation of the environmental monitoring for Lake Khubsugul and Prikhubsugulye. Computational Technologies. 2022; 27(5):14–29. DOI:10.25743/ICT.2022.27.5.003. (In Russ.)

Acknowledgements. The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the grant № 075-15-2020-787 for implementation of Major scientific projects on priority areas of scientific and technological development (the project “Fundamentals, methods and technologies for digital monitoring and forecasting of the environmental situation on the Baikal natural territory”).

References

1. Federal’nyy zakon “Ob okhrane okruzhayushchey sredy” ot 10.01.2002 No. 7-FZ [Federal Law “On Environmental Protection” dated 10.01.2002 No. 7-FZ]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823. (accessed at May 29, 2022) (In Russ.)
2. Postanovlenie Pravitel’sтва RF ot 9 avgusta 2013 g. “O gosudarstvennom ekologicheskom monitoringe i gosudarstvennom fonde dannykh gosudarstvennogo ekologicheskogo monitoringa” No. 681 [Decree of the Government of the Russian Federation of August 9, 2013 No. 681 “On state environmental monitoring and the state data fund of state environmental monitoring”]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_150638. (accessed at May 29, 2022) (In Russ.)
3. Federal’nyy zakon “Ob okhrane ozera Baykal” No. 94-FZ ot 1 maya 1999 g. Sobranie akonodatel’sтва Rossiyskoy Federatsii [Federal Law “On the Protection of Lake Baikal” No. 94-FZ dated May 1, 1999. Collection of Legislation of the Russian Federation]. 1999; (18):2220. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_22964. (accessed at May 29, 2022) (In Russ.)

4. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 2 fevralya 2015 g. No. 85 "Ob utverzhdenii Polozheniya o gosudarstvennom ekologicheskom monitoringe unikal'noy ekologicheskoy sistemy ozera Baykal" [Decree of the Government of the Russian Federation of February 2, 2015 No. 85 "On approval of the Regulations on state environmental monitoring of the unique ecological system of Lake Baikal"]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_174820/92d969e26a4326c5d02fa79b8f9cf4994ee5633b. (accessed at May 29, 2022) (In Russ.)
5. Postanovlenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 2 marta 2019 g. No. 234 "O sisteme upravleniya realizatsiyey natsional'noy programmy "Tsifrovaya ekonomika Rossiyskoy Federatsii" [Decree of the Government of the Russian Federation of March 2, 2019 No. 234 "On the management system for the implementation of the national program "Digital Economy of the Russian Federation"]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_319701. (accessed at May 29, 2022) (In Russ.)
6. **Bayaraa U., Kazennov V.V.** Environmental problems of certain Mongolian regions and its transboundary territories. *Ekologiya Urbanizirovannykh Territoriy* [Ecology of Urban Areas]. 2011; (3):65–69. (In Russ.)
7. **Bandandorzh Ts., Odonchimeg D., Udvaltsetseg G.** Obzornaya informatsiya sotsial'no-ekonomicheskoy obstanovki basseyna reki Selengi na territorii Mongolii [Overview of the socio-economic situation in the Selenga river basin in Mongolia]. *Selenga Reka Bez Granits*. 2002; 6–7. (In Russ.)
8. **Neronov V.M., Milanova E.V., Zhigzh S.** Okhranyaemye territorii MNR: sostoyanie i perspektivy razvitiya [Protected areas of the Mongolian People's Republic: state and development prospects]. *Prirodnyye Usloviya, Rastitel'nyy Pokrov i Zhivotnyy Mir Mongolii*. 1988; 113–127. (In Russ.)
9. *Ekosistemy Mongolii: rasprostraneniye i sovremennoye sostoyaniye* [Ecosystems of Mongolia: distribution and current state]. Moscow: Nauka; 1995: 224. (In Russ.)
10. **Johnson N., Druckenmiller M.L., Danielsen F., Pulsifer P.L.** The use of digital platforms for community-based monitoring. *Bioscience*. 2021; 71(5):452–466. DOI:10.1093/biosci/biaa162.
11. **Constantinides P., Henfridsson O., Parker G.G.** Introduction — platforms and infrastructures in the digital age. *Information Systems Research*. 2018; 29(2):381–400. DOI:10.1287/isre.2018.0794.
12. **Hein A., Schrieck M., Riasanow T., Setzke D.S., Wiesche M., Bohm M., Krcmar H.** Digital platform ecosystems. *Electronic Markets*. 2020; (30):87–98. DOI:10.1007/s12525-019-00377-4.
13. **De Reuver M., Sorensen C., Basole R.C.** The digital platform: a research agenda. *Journal of Information Technology*. 2018; (33):124–135.
14. **Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Hmelnov A.E., Fedorov R.F., Madzhara T.I., Popova A.K.** Digital monitoring of lake Baikal and its coastal area. *CEUR Workshop Proceedings*. 2019; (2463):13–23.
15. **Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K., Popova A.K.** An approach to digital environmental monitoring of forest resources of the Baikal Natural Territory. *Proceedings of the "International Conference and Early Career Scientists School on Environmental Observations, Modeling and Information Systems. Selected Papers"*. Tomsk; 2020: 328–329. (In Russ.)
16. **Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K., Khmelnov A.E., Popova A.K.** Digital environmental monitoring technology Baikal Natural Territory. *Proceedings of the 3rd Scientific-Practical Workshop "Information Technologies: Algorithms, Models, Systems (ITAMS 2020)"*. 2020; (2677):1–7.
17. **Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K., Popova A.K.** A platform approach to the organization of digital forest monitoring of the Baikal Natural Territory. *IOP Conference Series: Earth Environmental Science*. 2020; (611):012056. DOI:10.1088/1755-1315/611/1/012056.
18. **Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K., Khmelnov A.E., Popova A.K.** Organization of digital monitoring of the Baikal Natural Territory. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; (629):012067. DOI:10.1088/1755-1315/629/1/012067.
19. **Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K., Popova A.K.** Digital platform for forest resources monitoring in the Baikal Natural Territory. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; (1864):012111. DOI:10.1088/1742-6596/1864/1/012111.
20. **Avramenko Y.V., Popova A.K., Fedorov R.K.** Cloud service of Geoportal ISDCT SB RAS for machine learning. *Proceedings of the 4th Scientific-Practical Workshop "Information Technologies: Algorithms, Models, Systems"*. 2021; (2984):6–10.
21. **Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K., Popova A.K., Avramenko Y.V.** Classification of Sentinel-2 satellite images of the Baikal Natural Territory. *Computer Optics*. 2022; 46(1):90–96. DOI:10.18287/2412-6179-CO-1022. (In Russ.)