

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт динамики систем и теории управления
имени В.М. МАТРОСОВА
Сибирского отделения Российской академии наук**

МАТЕРИАЛЫ

**Выездного рабочего совещания участников проекта
«Фундаментальные исследования Байкальской природной
территории на основе системы взаимосвязанных базовых
методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы
экологического мониторинга окружающей среды»**

Белокуриха, 27 августа 2025 г.



Редакционная коллегия: Бычков И.В., Пестунов И.А., Фереферов Е.С.

Материалы Выездного рабочего совещания участников проекта «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды». г. Белокуриха, Россия, 27 августа 2025 г. – Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2025. – 81 с.

Сборник содержит тезисы докладов, представленных на выездном рабочем совещании участников проекта «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды» (г. Белокуриха, 27 августа 2025 г.). Совещание проводится с целью обсуждения и оценки полученных в рамках проекта результатов, корректировки дальнейших исследований и усиление координации работ консорциума исполнителей.

Организаторы совещания:

- Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
- Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий

Программный комитет:

- Академик И.В. Бычков (г. Иркутск) – председатель
- к.ф.-м.н. И.А. Пестунов (г. Новосибирск)
- к.т.н. Е.С. Фереферов (г. Иркутск)

Организационный комитет:

- Академик И.В. Бычков (г. Иркутск) – председатель
- д.т.н. Р.К. Фёдоров (г. Иркутск)
- к.ф.-м.н. И.А. Пестунов (г. Новосибирск)
- к.т.н. А.Е. Хмельнов (г. Иркутск)
- к.т.н. Е.С. Фереферов (г. Иркутск)
- Ю.В. Пестова (г. Иркутск)
- А.А. Кумачёв (г. Иркутск)

ОГЛАВЛЕНИЕ

И.В. Бычков, Р.К. Фёдоров, Е.С. Фереферов. Цифровая платформа междисциплинарных научных исследований.....	5
И.А. Пестунов, Е.А. Мамаш, А.А. Жирнов, О.А. Дубровская, А.С. Бельский, Ю.Н. Синявский, И.В. Шабальников, А.А. Иргит, А.Н. Мазяр. Спутниковый мониторинг поверхностного слоя озера Байкал: оценка ключевых параметров и анализ трендов	10
Р.К. Фёдоров, М.С. Климонов. Формирование композиций сервисов с учетом предпочтений пользователей.....	12
А.Б. Столбов. Интеграция открытых стандартов моделирования в цифровые сервисы исследования Байкальской природной территории	15
И.В. Бычков, М.Л. Воскобойников, А.Г. Феокистов, А.В. Еделев, О.Ю. Башарина, Д.Н. Карамов. Моделирование природно-технических систем: модели, алгоритмы, сервисы и приложения	17
И.В. Бычков, М.Л. Воскобойников, А.Г. Феокистов, М.А. Чекан, Д.С. Яковлев, М.Е. Боднюк, Е.П. Николаев, Е.А. Юмашев, Я.А. Еделев. Моделирование природно-технических систем: инструментальная поддержка	22
А.К. Попова. Применение вспомогательных данных для повышения точности классификации мультиспектральных спутниковых снимков	27
Ю.В. Пестова, О.А. Николайчук. Веб-приложение идентификации гарей на основе данных ДЗЗ и платформы Google Earth Engine	29
Д.П. Гладкочуб, А.В. Саньков, А.А. Добрынина, В.А. Саньков, А.А. Рыбченко. Комплексный мониторинг опасных геологических процессов Байкальской природной территории	32
М.Ю. Шиховцев, Е.В. Моложникова, В.В. Цыдыпов, Т.В. Ходжер, А.П. Федотов. Комплексный цифровой мониторинг атмосферы Байкальской природной территории. 36	
Н.Н. Воропай, О.В. Василенко. Микроклиматический мониторинг – основа междисциплинарных исследований	40
Е.А. Дюкарев. Модель гауссова процесса в сверхкраткосрочном ансамблевом прогнозе приземной температуры воздуха	43
Ю.В. Волков. Математическая модель изменчивости приземной температуры в форме квазигармонического колебания	46
А.В. Пененко, В.Ф. Рапута, Н.А. Каргаполова, А.А. Леженин, Э.А. Пьянова, А.В. Гочаков, П.Н. Антохин, Е.В. Русин, Р.А. Кузьминых, М.А. Акентьева, О.А. Сеницина, М.К. Емельянов, В.В. Пененко. Алгоритмы математического моделирования для обработки данных региональных систем экологического мониторинга	49
А.Е. Хмельнов, Т.Ф. Хмельнова. Использование контуров береговых линий со спутниковых изображений Sentinel-2 для построения моделей прибрежного рельефа..	54
Н.В. Абасов, Е.Н. Осипчук, В.С. Гасан, В.М. Бердников. Применение бассейнового подхода для моделирования расхода потенциальных водохранилищ на реках озера Байкал	58
У.С. Постникова, В.В. Москвичев, О.В. Тасейко, Н.А. Чернякова. Методический подход оценки комплексной защищенности Байкальского региона	61

О.В. Гагаринова, И.А. Белозерцева, М.Ю. Опекунова. Районирование территории ЦЭЗ БПТ в соответствии со средозащитными ландшафтно-гидрологическими условиями..	65
А.А. Лемперт, А.Л. Казаков, М.Л. Жарков. Математическая модель горно-перевального участка Транссибирской магистрали, прилегающего к озеру Байкал.....	68
Ф.А. Кожевников, М.Р. Конникова, А.А. Ангелуц. Оценка наличия вредных примесей в атмосфере с помощью анализа терагерцовых спектров поглощения с использованием методов машинного обучения	71
А.В. Верховзина. Цифровой мониторинг фиторазнообразия Байкальской природной территории	75
В.В. Парамонов, А.О. Шигаров. Извлечение табличных данных из докладов государственного экологического мониторинга Байкальской природной территории ...	78

ЦИФРОВАЯ ПЛАТФОРМА МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ*

И.В. Бычков, Р.К. Фёдоров, Е.С. Фереферов
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН,
г. Иркутск, Россия
fereferov@icc.ru

Для поддержки проведения междисциплинарных исследований в ИДСТУ СО РАН разрабатывается цифровая платформа (ЦП) [1], которая объединяет исследователей научных институтов, сотрудников ведомственных организаций и обеспечивает им поддержку комплексного анализа разнородных данных, моделирования, прогнозирования и выработки рекомендаций. Современные подходы к созданию цифровых платформ [2, 3], как правило, базируются на использовании сервис-ориентированной архитектуры (СОА, англ. service-oriented architecture, SOA) [4]. Данная архитектура позволяет реализовать единую информационную среду, поддерживающую алгоритмизированные взаимовыгодные взаимоотношения значимого количества независимых участников какого-либо процесса (например, исследование биоразнообразия, эколого-геохимические исследования какой-либо территории). В рамках СОА каждый участник предоставляет результаты своей деятельности в виде сервисов, что позволяет мгновенно получать доступ к данным и методам обработки без необходимости согласования. СОА значительно ускоряет проведение исследований. Для унификации сервисов в цифровой платформе используется разрабатываемый Open Geospatial Consortium стандарт Web Processing Service (WPS) [5], регламентирующий протокол вызова сервиса и обмен метаданными. Цифровая платформа обеспечивает разработку и применение сервисов и их композиций, что повышает уровень автоматизации решения задач, начиная от ввода данных и заканчивая публикацией результатов.

В рамках создания цифровой платформы поддержки междисциплинарных исследований разработан ряд компонентов, поддерживающих алгоритмизированное взаимодействие участников платформы и, в том числе, обеспечивающих построение композиций сервисов.

Большое количество сервисов, используемых для решения различных задач, создает сложности с их обнаружением для повторного использования. Для решения этой проблемы в рамках цифровой платформы разработан каталог сервисов [6], реализующий следующие функции: регистрация сервисов данных, поиск сервисов данных, редактирование ключевых слов. Каталог создан с помощью фабрики сервисов ввода и редактирования пространственных данных, предоставляет программный и пользовательский интерфейс. Для каждого сервиса в каталоге хранятся метаданные в соответствии с ядром Dublin Core [7] и модель данных в виде структурной спецификации,

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Минобрнауки России на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»). научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

необходимые для последующего использования сервисов. Ключевые слова, которые входят в ядро метаданных, обеспечивают пользователю поиск необходимых сервисов.

Фабрика сервисов ввода и редактирования реляционных данных обеспечивает создание таблиц в БД и сервисов для работы с ними. Создаваемые сервисы предоставляют пользовательский интерфейс для ввода и редактирования разных по структуре пользовательских таблиц (CRUD) с поддержкой сложных типов данных, встречающихся в исследованиях (многоуровневые справочники, древовидные структуры). Сбор научных данных, таких как мониторинговые данные, часто осуществляется с помощью реляционных таблиц. Также с помощью реляционных таблиц могут передаваться входные параметры для вычислительных сервисов. Реляционные таблицы имеют определённую структуру данных, которая включает набор атрибутов, их типы и взаимосвязи. Разные исследовательские группы могут собирать аналогичные данные, но использовать разные схемы, что приводит к несовпадению схем данных с параметрами, необходимыми для вычислительных сервисов. В результате передача данных пользователями в вычислительный сервис без предварительной конвертации оказывается невозможной. Процесс конвертации является достаточно сложным и часто требует ручного вмешательства из-за различий в атрибутах и используемых справочниках. Значительно проще изначально собирать данные в рамках определенной схемы, чем проводить потом их конвертацию. Публикация схем данных в каталоге данных и структурных спецификаций позволяет унифицировать создание сервисов ввода данных и сервисов обработки.

Сервисы предоставляют программный интерфейс для обеспечения композиции с другими сервисами. Это дает возможность интегрировать данные сервисов в ЦП. Процесс создания сервисов автоматизирован, так как таблицы могут использоваться для автоматической публикации результатов вычислений. Работа сервисов основывается на модели таблицы. Модели таблиц упорядочены в виде иерархий, реализованы механизмы наследования и полиморфизма в терминах объектно-ориентированного подхода. Применение модели таблицы позволяет:

- 1) создавать таблицы, применяя готовые наборы атрибутов, что унифицирует разные наборы данных по структуре;
- 2) обобщать различные по структуре пользовательские таблицы, содержащие общую модель и унаследованные от нее другие модели;
- 3) создавать WPS-сервисы к моделям, а не к конкретным таблицам (применять их к любым таблицам, созданным по данной модели);
- 4) проводить анализ и создавать отчеты по пользовательским таблицам, созданным на основе общей модели.

Для имеющих пространственную привязку научных данных создаваемые сервисы позволяют поддержать работу с пространственными атрибутами: вводить, отображать на карте, выполнять пространственные операции и т. д. Создаваемые сервисы поддерживают стандарт WPS, что значительно повышает их интероперабельность, возможность создания композиций сервисов.

Большинство существующих CRUD систем реализует работу в один момент времени только с одной записью таблицы. В то же время многие сущности могут быть представлены в реляционной базе данных в нормализованном виде с помощью множества записей, находящихся в разных отношениях. Например, образец гербария представляет дерево записей, где в корне информация о месте, времени находки, а ветками являются виды растений, которые были найдены на этом месте. Информацию о таких сущностях удобнее для пользователя отображать и редактировать на одной форме (документе). Поэтому в создаваемых сервисах CRUD операции выполняются не на уровне записи, а на уровне документа. На программном уровне редактирование

документа проводится в рамках одной транзакции, что позволяет улучшить контроль корректности и непротиворечивости данных.

Сервисы ввода и редактирования данных могут использовать в качестве справочников базовые пространственные данные. В основе базовых пространственных данных (БПД) лежат готовые наборы цифровых данных, основным назначением которых является пространственная привязка различных тематических данных. Соответственно, обеспечивается их использование для создания новых данных, связывания с существующими данными и проведения анализа. В рамках среды созданы слои БПД, соответствующих уровням управления территориями в Российской Федерации: федеральные округа, регионы, районы.

Для связывания нового сервиса данных с таблицей-справочником, содержащим БПД, применяется специально разработанный элемент управления, который позволяет использовать различные её атрибуты, в том числе пространственные. При использовании пространственных атрибутов автоматически добавляется на карту слой, для которого можно применить различные стили с учетом значений атрибутов. Базовые пространственные данные могут использоваться для анализа данных. В рамках сервисов реализована фильтрация и группировка данных, используя административное деление.

Компонент «Фабрика сервисов отображения пространственных данных» обеспечивает создание WMS сервиса. На вход компонента можно подать растровый файл в формате GEOTIFF или таблицу, созданную с помощью сервисов ввода и редактирования данных, и стили отображения карты. Выделение стилей отображения в отдельный параметр позволяет использовать один и тоже стиль отображения для разных данных.

- Mapserver – проводит на стороне сервера генерацию изображений слоев карт в соответствии со стандартом WMS.
- MapCache – проводит кэширование и обеспечивает скоростной доступ к картам.

Формирование легенды производится в браузере с помощью специального редактора стилей. Легенда формируется для каждого слоя отдельно и хранится в формате JSON. Формат хранения стилей SLD поддерживается только частично в связи с низкой скоростью отображения карт при его использовании. В соответствии со стандартом WMS стили указываются в виде ссылки в URL адресе. Поэтому Mapserver должен для каждого тайла (фрагмента карты) выполнить его загрузку на сервер, что значительно увеличивает время отрисовки слоя. Для отображения слоев с помощью Mapserver стили в формате JSON конвертируются в файл настроек карты (map файл).

Компонент «Фабрика сервисов отображения пространственных данных» автоматизирует и упрощает создание сервисов, позволяя вывести результаты расчетов на карту.

Фабрика сервисов отображения диаграмм и графиков предназначена для создания сервисов отображения графиков на основе реляционных данных, предоставляемых сервисами ввода и редактирования. В результате работы сервиса формируется ресурс с графиком, доступный по ссылке. Сервис имеет программный интерфейс, включенный в каталог сервисов. Программный интерфейс разработан таким образом, чтобы можно было создавать однотипные графики для разных данных. Например, диаграмма отображения частоты событий по годам может создаваться для данных регистрации укусов клещей или находок инвазивных растений. Способ отображения данных задается специальной моделью. Данные и модель отображения графика передаются сервису по разным параметрам, что позволяет для одной модели использовать разные данные или для одной таблицы разные способы отображения данных. Для создания модели отображения данных разработан редактор.

Поддерживается 5 видов диаграмм: линейный, столбчатый, временной ряд, круговой, XY зависимость.

В модели указывается вид графика, стили отображения, способ загрузки данных. Данные могут загружаться динамически в момент отрисовки графика, либо данные являются статичными и сохраняются в момент создания графика. Для динамически загружаемых данных в момент отображения пользователь должен иметь доступ к данным таблицы.

В качестве примера использования фабрики можно привести таблицу регистрации укусов иксодовых клещей. Для представленных данных создана диаграмма, отображающая распределение регистрации укусов клещами по годам (рис. 1). Первоначально данные в таблице сгруппированы и отфильтрованы, а затем переданы в редактор модели.

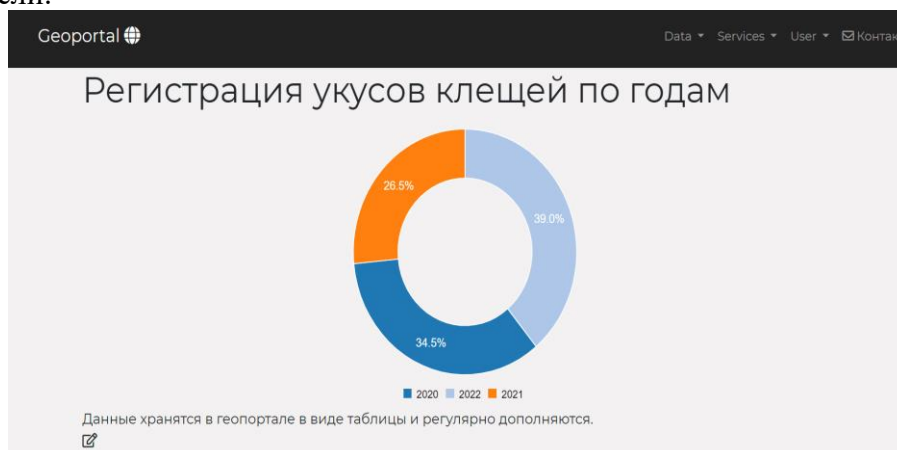


Рис. 1. Круговая диаграмма распределения регистрации укусов клещами по годам.

Сервис импорта реляционных данных предназначен для импорта реляционных данных из файлов различных форматов, поддерживаемых библиотекой GDAL/OGR [8]. Также поддержан импорт из широко распространенного формата CSV. Производится приведение данных к определенной модели и их нормализация к существующим справочникам. Для формата CSV модуль производит разбор файла, извлекает названия атрибутов и данные. Есть возможность указать кодировку импортируемых данных и используемый разделитель. Реализован механизм сопоставления схем результирующей импортируемой таблиц. Реализован ряд функций конвертации, которые может задать пользователь при импорте значений в целевую структуру:

1) Copy – производит копирование без обработки значения из указанного атрибута импортируемой таблицы в атрибут результирующей таблицы. Если атрибут результирующей таблицы является ссылкой на таблицу-справочник, то выполняется поиск соответствующего значения и берется значение первичного ключа;

2) CopyDate – производит конвертацию даты из текстового формата в формат базы данных. Производится распознавание используемого формата даты импортируемого атрибута. Если формат не распознан, то пользователь может указать его вручную;

3) CopyValue – используется для того, чтобы при загрузке в указанном атрибуте всех импортируемых записей было присвоено значение – константа;

4) CopyPoint – используется для определения атрибута типа «Точка» (геокодирование). На входе метода указывается два атрибута, содержащие широту и долготу точки;

5) Geocoding – производит геокодирование адреса, т. е. определение координат точечного объекта по адресу на основе сервиса OSM [9].

Разработанные компоненты позволили создать более 200 сервисов и ряд прикладных ЦП поддержки междисциплинарных исследований ученых из институтов разных профилей: «Оценка активности иксодовых клещей», «Гербарий Сибирского института физиологии и биохимии растений СО РАН», «Атлас развития Байкальского региона», «Районирование сейсмической опасности больших литосферных блоков Прибайкалья и Монголии», «Моделирование динамики лесных ресурсов», «Классификация земной поверхности по ДДЗЗ» (рис. 2), «Обработки данных о загрязнении атмосферы со спутника Sentinel-5P», «Анализ и прогнозирование риска (опасности) лесного пожара на основе информации о классе пожароопасности лесов, метеословий и других факторов».

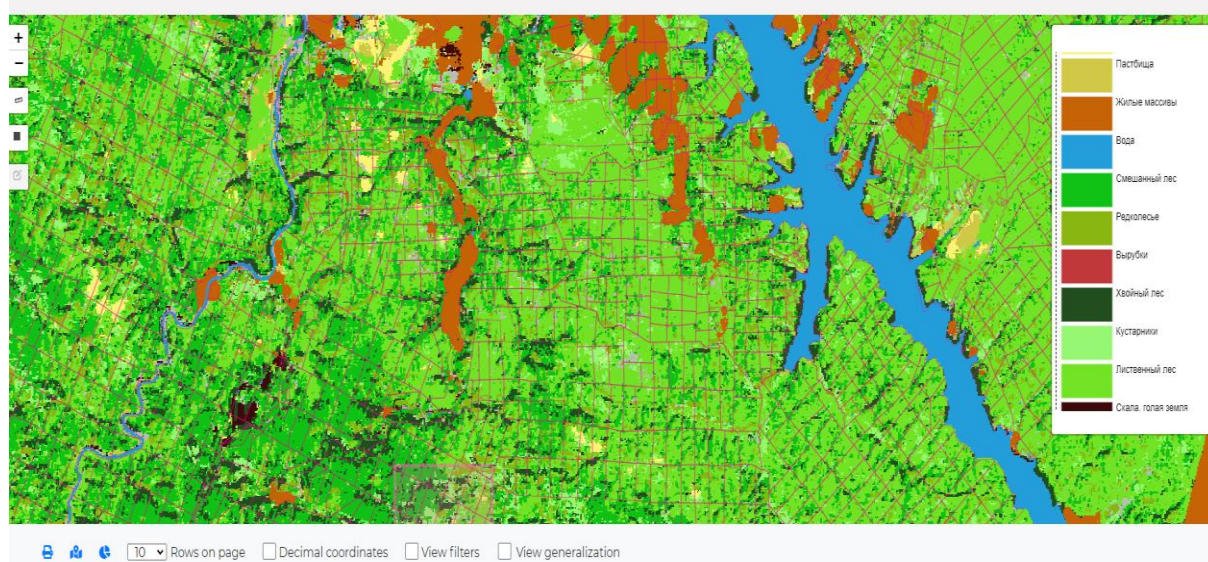


Рис. 2 Пример классификации земной поверхности.

Разработанные компоненты и сервисы стали основой Цифровой платформы мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории, разрабатываемой в рамках крупного научного проекта «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды».

1. Бычков И.В., Гладкочуб Д.П., Ружников Г.М. и др. Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории. 2022. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2022. 345 с.
2. De Reuver M., Sørensen C. and Basole R.C. The digital platform: A research agenda // J. of Information Technology. 2018. Vol. 33, № 2. P. 124–35
3. Осипов Ю.М., Юдина Т.Н., Гелисханов И.З. Цифровая платформа как институт эпохи технологического прорыва // Экономические стратегии. 2018. Т. 20, № 5(155). С. 22–29.
4. Bih J. Service oriented architecture (SOA) a new paradigm to implement dynamic e-business solutions // Ubiquity. 2006. Vol. 4. P. 1–17.
5. Schut P. OpenGIS® Web Processing Service // Open Geospatial Consortium. 2007. № 6. P. 1–3.
6. Garofalakis J., Panagis Y., Sakopoulos E., Tsakalidis A. Contemporary web service discovery mechanisms. // Journal of Web Engineering. 2006. Vol. 5, № 3. P. 265–290.
7. DCMI: DCMI Metadata Terms [Электронный ресурс] <https://www.dublincore.org/specifications/dublin-core/dcmi-terms/> (02.06.2025).
8. GDAL – GDAL documentation [Электронный ресурс] <https://gdal.org/index.html> (02.06.2025)
9. Overview – Nominatim Manual [Электронный ресурс] <https://nominatim.org/release-docs/develop/api/Overview/> (02.06.2025).

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОЗЕРА БАЙКАЛ: ОЦЕНКА КЛЮЧЕВЫХ ПАРАМЕТРОВ И АНАЛИЗ ТРЕНДОВ*

И.А. Пестунов^{1,2,3}, Е.А. Мамаш¹, А.А. Жирнов¹, О.А. Дубровская¹, А.С. Бельский¹,
Ю.Н. Синявский¹, И.В. Шабальников¹, А.А. Иргит², А.Н. Мазяр²

¹Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

³Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН, г. Иркутск, Россия

pestunov@ict.nsc.ru

В последние годы для оценки состояния и исследования внутренних водоемов в различных регионах земного шара стали все активнее применяться методы спутникового дистанционного зондирования. Это обусловлено тем, что традиционные методы определения гидрологических, гидробиологических и температурных характеристик поверхностного слоя, основанные на измерениях *in situ*, носят точечный характер и часто не обеспечивают получение репрезентативных данных для таких сложных и динамичных экосистем, как, например, озера. Кроме того, эти методы имеют логистические ограничения и требуют существенных финансовых и временных ресурсов для применения.

Спутниковое дистанционное зондирование является практически незаменимым инструментом для исследования крупных внутренних водоёмов, таких как озеро Байкал, площадь акватории которого составляет 31,7 тыс. км² [1–6]. Использование спутниковых данных дает возможность одновременно наблюдать за состоянием всего озера в комплексе и оперативно получать пространственно-временную информацию о процессах, протекающих в его поверхностном слое, что невозможно при использовании только традиционных методов наблюдений.

В данном докладе представлены результаты валидации продуктов MODIS/(Terra+Aqua) и TIRS/Landsat для оценки температуры поверхностного слоя Байкала на основе экспедиционных данных, собранных ЛИИ СО РАН в период с 2021 по 2024 годы. Показана пригодность этих спутниковых продуктов для анализа температуры поверхностного слоя, приведены соответствующие статистические оценки. На основе анализа многолетних трендов выявлено значимое потепление поверхности озера, наиболее выраженное в центральной и северной частях в период открытой воды (июнь–ноябрь).

Также представлены результаты исследований по оценке возможностей спутниковых данных различного разрешения для определения содержания хлорофилла-а в озере Байкал. Проведены сравнительный анализ и валидация пяти глобальных и тридцати двух региональных алгоритмов оценки концентрации хлорофилла-а. Используются данные сенсоров MODIS/(Terra+Aqua), MSI/Sentinel-2 и OLCI/Sentinel-3, сопоставленные с 324 экспедиционными измерениями ЛИИ СО РАН (2021–2023 гг.) и ФИЦ ИнБЮМ (2018–2019 гг.). Статистический анализ показал, что наилучшую точность для Байкала демонстрируют океанические алгоритмы OC3 (для данных MODIS) и OC2E

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Минобрнауки России на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

(для данных Sentinel-2/3). На основе этих результатов для мониторинга пространственно-временной динамики хлорофилла-а рекомендовано применение алгоритма ОСЗ к данным MODIS и ОС2Е к данным Sentinel-2/3.

Результаты работы легли в основу информационной системы «Байкал», разрабатываемой в ФИЦ ИВТ. В системе реализованы инструменты для визуализации и обработки спутниковых данных и материалов экспедиций, относящихся к поверхностному слою озера.

1. Болданова Е.В. Оценка трофности озера Байкал с использованием дистанционного зондирования // Географический вестник. 2022. Т. 61, № 2. С. 73–89.
2. Сутырина Е.Н. Изучение внутренних водоёмов и водосборов с применением данных дистанционного зондирования Земли. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014. 133 с.
3. Сутырина Е.Н. Особенности температурного режима оз. Байкал по данным радиометра AVHRR // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 5. С. 121–130. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-121-130.
4. Bolgrien D.W., Granin N.G., Levin L. Surface Temperature Dynamics of Lake Baikal Observed from AVHRR Images // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 1995. Vol. 61, № 2. P. 111–116.
5. Heim B., Oberhaensli H., Fietz S. et al. 2005. Variation in Lake Baikal's phytoplankton distribution and fluvial input assessed by SeaWiFS satellite data // Global and Planetary Change. Vol. 46. Is. 1–4. P. 9–27.
6. Mogilev N.Y., Gnatovskiy R.Y. Satellite imagery in the study of Lake Baykal surface temperatures // Mapping Sciences and Remote Sensing. 2003. Vol. 40. № 1. P. 41–50. DOI: 10.2747/0749-3878.40.1.41.

ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИЙ СЕРВИСОВ С УЧЕТОМ ПРЕДПОЧТЕНИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ*

Р.К. Фёдоров, М.С. Климонов

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН,
г. Иркутск, Россия
fedorov@icc.ru

Большое количество сервисов и сложность их взаимодействия является существенным сдерживающим фактором развития сервис-ориентированной архитектуры. Разработанный метод позволяет создавать композиции сервисов с учетом индивидуальных пользовательских рекомендаций. Рекомендации сервисов производятся на основе анализа истории вызовов сервисов.

В современном мире в рамках Сервис-ориентированной архитектуры (СОА) [1] активно растет количество сервисов, реализующих предоставление, обработку и публикацию данных. Например, это сервисы предоставления данных дистанционного зондирования Земли, обработки пространственных данных, расшифровки генома и т. д. Созданные сервисы значительно упрощают решение многих задач. Часто за ними скрываются большие массивы данных, вычислительные ресурсы, которые трудно развернуть для выполнения нерегулярных вычислений. В области обработки ПД определены и активно используются стандарты Open Geospatial Consortium (OGC) [2]. Наличие большого количества сервисов, с одной стороны, увеличивает возможности исследователей, а с другой – значительно усложняет поиск нужных сервисов для решения конкретной задачи. Применение сервиса в рамках СОА почти всегда приводит к композиции сервисов, т. е. к объединению сервисов предоставления данных, вычислительных сервисов и публикации [3]. Множество используемых сервисов значительно отличается в зависимости тематики исследований каждого пользователя. Например, у ботаников и географов они могут вообще не пересекаться или только в отдельных взятых сервисах. Поэтому является важным при работе в СОА учитывать не только техническую возможность применения сервиса и ее композицию с другими сервисами, но и личные пользовательские предпочтения.

Обозначим множество пользователей $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ и множество сервисов $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$. В рамках геопортала ИДСТУ СО РАН [4] производится сбор статистики применения сервисов. Таким образом, информация о поведении пользователя в информационной системе выражается количеством вызовов c_{ij} сервиса s_j пользователем u_i .

Рекомендательная система для выбора веб-сервисов должна ранжировать сервисы с учетом пользовательских предпочтений. Таким образом, решение проблемы формулируется как построение функции оценки релевантности сервисов для пользователя:

$$r(u_i, s_j) \rightarrow [0, 1], \quad (1)$$

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

где $u_i \in U$, $s_j \in S$, значение функции, равное 0, обозначает, что сервис не соответствует нуждам пользователя, а 1 – наоборот. Чем больше значение функции, тем большей релевантностью обладает сервис для выбранного пользователя.

Важно учитывать, что иногда сервисы ориентированы на определенные предметные области или же могут быть универсальными и использоваться в разных предметных областях. Предполагается, что при использовании специалистом нового сервиса его можно рекомендовать другим специалистам из этой же области или коллегам из других областей, но работающим над похожими задачами или имеющим общие области интереса. Возникает подзадача определения близости пользователей

$$d(u_i, u_g) \rightarrow [0, \infty),$$

где d – функция, определяющая расстояние между пользователями (близость). Значение функции, равное 0, характеризует полное совпадение области интересов, тогда как увеличение значения указывает на их расхождение. Близость пользователей можно оценить на основе статистики их взаимодействия с сервисами. Совпадение множества используемых сервисов с учетом частоты вызовов свидетельствует о схожести исследовательских интересов.

На основе метода [4] производится определение возможности передачи данных между сервисами, т. е. возможности создания композиции сервисов.

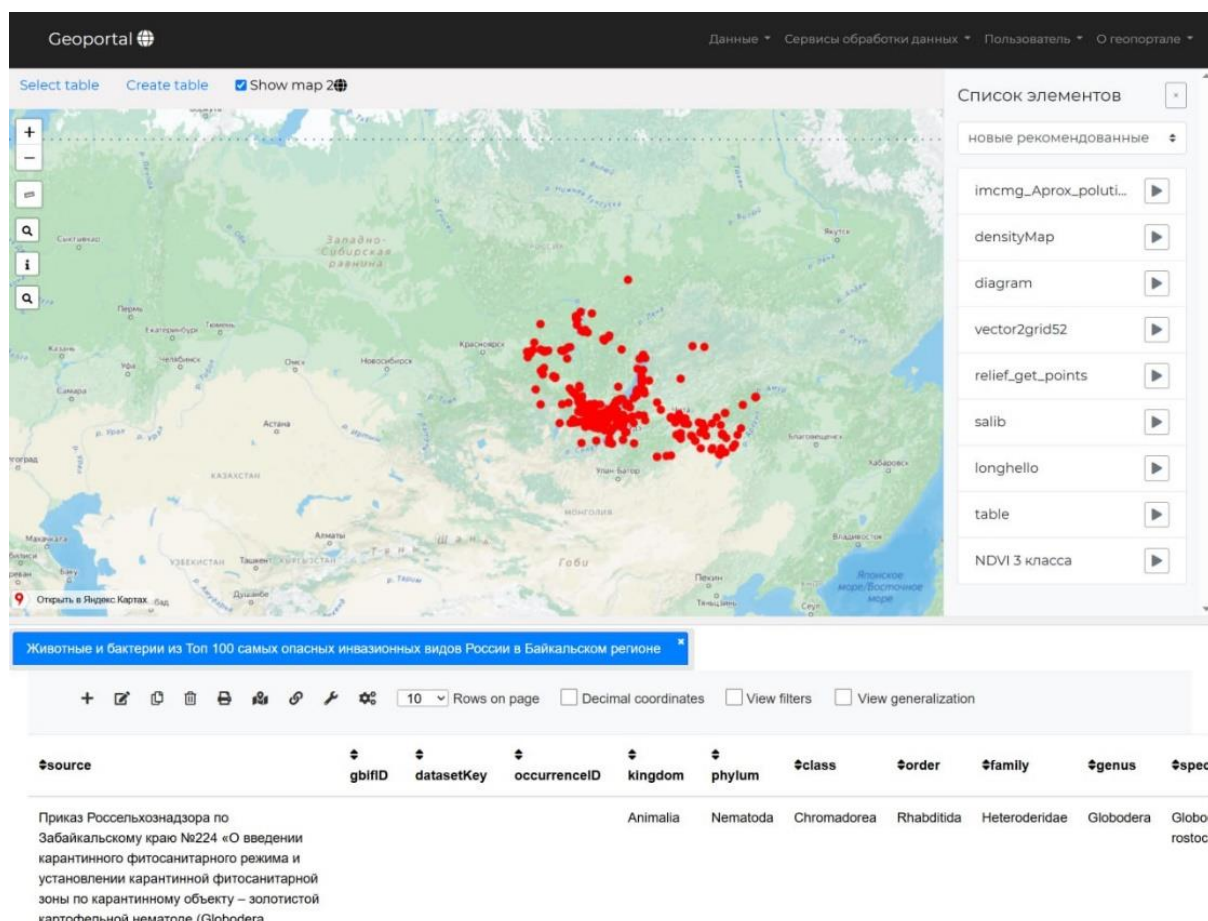


Рис. 1. Вывод сервисов для обработки данных

Для текущего пользователя и сервиса выполняются следующие шаги:

Шаг 1. Оценка близости пользователей.

Шаг 2. Формирование списка сервисов, с которыми возможна композиция.

Шаг 3. Вычисление для каждого сервиса из списка, полученного на шаге 2, функции оценки релевантности сервисов для пользователя и их сортировка (рис. 1. Вывод релевантных сервисов).

Большое количество сервисов и сложность их взаимодействия является существенным сдерживающим фактором развития сервис-ориентированной архитектуры. Разработанный метод позволяет создавать композиции сервисов с учетом индивидуальных пользовательских рекомендаций. Рекомендации сервисов производятся на основе анализа истории вызовов сервисов. Преимуществом метода является возможность распространения информации о сервисах среди специалистов, близких по предметной области.

1. Bih J. Service oriented architecture (SOA) a new paradigm to implement dynamic e-business solutions // Ubiquity. 2006. Vol. 4. P. 1–17. DOI: 10.1145/1162511.1159403.
2. Schut P. OpenGIS ® Web Processing Service // Open Geospatial Consortium. 2007. № 6. P. 1-3.
3. Edmond D., ter Hofstede A. Service composition for electronic commerce // Proc. of the Pacific Asia Conf. on Information Systems (PACIS-2000). Hong Kong, 2000.
4. Фёдоров Р.К. Метод композиции сервисов обработки пространственных данных // Матер. VI Междунар. семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенных сред (ICCS-DE 2024). 2024. С. 160-168. DOI: 10.47350/ICCS-DE.2024.25.

ИНТЕГРАЦИЯ ОТКРЫТЫХ СТАНДАРТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЦИФРОВЫЕ СЕРВИСЫ ИССЛЕДОВАНИЯ БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ*

А.Б. Столбов

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН,
г. Иркутск, Россия
stolboff@icc.ru

Современные исследования проблем окружающей среды характеризуются высокой сложностью ввиду необходимости учитывать разнообразные природные и антропогенные процессы, а также их взаимосвязи. При создании цифровых сервисов встает задача интеграции разнородных источников данных, моделей и вычислительных инструментов. Ключевая проблема заключается в отсутствии унифицированных решений, позволяющих обеспечить совместимость моделей и воспроизводимость расчетов в разных вычислительных средах. Одним из перспективных подходов к решению данной задачи является использование открытых стандартов моделирования. Под этим понимается разработка и применение общедоступных форматов и интерфейсов, которые задают единые правила описания данных, параметров и вычислительных процессов.

Идея открытых стандартов моделирования тесно связана с концепцией комплексного моделирования окружающей среды (в зарубежных источниках известная как IEM – Integrated Environmental Modeling [1, 2]), которая предполагает совместное использование моделей различных компонентов природной среды для построения комплексных прогнозов. Основные положения IEM включают:

- интеграцию моделей разного уровня детализации (от локальных до глобальных);
- использование единых соглашений при описании данных и параметров;
- обеспечение воспроизводимости расчетов и обмена результатами между научными группами;
- многовариантный сценарный анализ с учётом расширяемого множества воздействующих факторов;
- возможность применения результатов сценарного моделирования в практике управления реальными объектами.

Использование открытых стандартов моделирования позволяет сократить затраты на интеграцию и даёт возможность масштабирования сервисов – от локальных задач анализа отдельных бассейнов до региональных сценариев оценки антропогенной нагрузки, так как обеспечивает техническую основу для реализации концепции IEM, в частности:

- форматы данных, такие как NetCDF, позволяют хранить многомерные массивы экологических и климатических данных с описанием метаданных по соглашениям CF-conventions;
- интерфейсы взаимодействия, такие как BMI [3] или OpenMI [4], задают минимальный набор методов для инициализации модели, управления процессом вычислений и доступа к переменным состояния.

Направлениями научного поиска в этой области на данный момент являются

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

обеспечение семантической значимости элементов комплексных моделей [5]; разработка информационной системы для формирования банка моделей-компонентов [6]; интеграция соответствующих вычислительных средств в ИТ-инфраструктуру [7].

В рамках цифровой платформы геопортала ИДСТУ СО РАН [8] для Байкальской природной территории разрабатываются сервисы, обеспечивающие поэтапный сценарный анализа: от подготовки исходных геоданных до визуализации результатов расчётов.

Основные типы сервисов включают:

- сервисы предобработки данных: формирование цифровых моделей рельефа, обработка данных дистанционного зондирования, выделение водосборных бассейнов и расчет направлений стока;

- сервисы конвертации и агрегации: перевод подготовленных данных в форматы NetCDF с учетом соглашений CF, обеспечение согласованности структур данных для разных моделей;

- сервисы взаимодействия с моделями по BMI: реализация функций управления моделями и доступа к переменным.

В качестве иллюстративного примера применена гидрологическая модель MOSART-WM [9], поддерживающая BMI. На её основе реализован прототип сервиса, обеспечивающего: загрузку данных рельефа в формате NetCDF, настройку параметров модели, выполнение расчетов и визуализацию результатов.

1. Argent R. An overview of model integration for environmental applications - Components, frameworks and semantics // *Environmental Modelling & Software*. 2004. Vol. 19, № 3. P. 219–234. DOI: 10.1016/S1364-8152(03)00150-6.
2. Iwanaga T., Wang H.H., Hamilton S.H., et al. Socio-technical scales in socio-environmental modeling: Managing a system-of-systems modeling approach, *Environmental Modelling & Software* 135 (2021).
3. Tucker G.E., Hutton E.W.H., Piper M.D., et al, CSDMS: a community platform for numerical modeling of Earth surface processes, 2022. DOI:10.5194/gmd-15-1413-2022.
4. Harpham Q., Hughes A., Moore R.V. Introductory Overview: The OpenMI 2.0 Standard for Integrating Numerical Models, *Environmental Modelling & Software* 122 (2019) 1–13. doi:10.1016/j.envsoft.2019.104549.
5. Лемперт А.А., Столбов А.Б., Козлов В.В. Использование онтологического подхода для интеллектуальной поддержки сценарного моделирования водных объектов Приангарья, *Информационные и математические технологии в науке и управлении* 19 (2020) 14–24.
6. Столбов А.Б. Разработка информационной системы о математических моделях окружающей среды, поддерживающих открытые стандарты моделирования. Материалы VI Международного семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенные сред (ICCS-DE 2024), 1-5 июля, 2024, Иркутск, Россия. Иркутск: Изд-во ИДСТУ СО РАН, 2024. С. 34-38.
7. Столбов А.Б. Разработка веб-сервисов для комплексного исследования окружающей среды на основе открытых стандартов моделирования. Материалы VII Международного семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенные сред (ICCS-DE 2025), 7-11 июля, 2025, Иркутск, Россия. Иркутск: Изд-во ИДСТУ СО РАН, 2025. С. 128-132.
8. Feoktistov A., Gorsky S., Kostromin R., Fedorov R., Bychkov I. Integration of web processing services with workflow-based scientific applications for solving environmental monitoring problems, *ISPRS International J. of Geo-Information* (2022). Vol. 11, № 1 DOI: 10.3390/ijgi11010008
9. Thurber et al. Mosartwmpy: A Python implementation of the MOSART-WM coupled hydrologic routing and water management model, *J. of Open Source Software* 6 (2021) 3221. <https://doi.org/10.21105/joss.03221>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ: МОДЕЛИ, АЛГОРИТМЫ, СЕРВИСЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ *

И.В. Бычков¹, М.Л. Воскобойников¹, А.Г. Феоктистов¹, А.В. Еделев^{1,2},
О.Ю. Башарина^{1,3}, Д.Н. Карамов^{1,4}

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

² Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

³ Уральский государственный экономический университет, г. Екатеринбург, Россия

⁴ Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

agf@icc.ru

Введение. В рамках исследования обсуждается опыт разработки и применения моделей, алгоритмического и программного обеспечения (ПО), научных сервисов и приложений исследования функционирования и развития (моделирования, структурно-параметрической оптимизации, экологической и технико-экономической оценки) природно-технических систем (ПТС) [1], расположенных в пределах Байкальской природной территории (БПТ). Особое внимание уделено энергетическим комплексам, отказы элементов которых могут приводить к значительному снижению поставок электроэнергии и тепла конечным потребителям и негативному воздействию на БПТ [2]. Такие комплексы составляют важный класс ПТС.

Локальные энергетические комплексы (ЛЭК) (рис. 1), например, микросети, обеспечивают более высокие надежность и эффективность энергоснабжения потребителей по сравнению с традиционными системами энергетики. Такие комплексы чрезвычайно востребованы для энергоснабжения удаленных и труднодоступных территорий. К сожалению, область исследования их проектирования, эксплуатации и развития в рамках охраняемых природных территорий недостаточна изучена. В этой связи решение задачи исследования функционирования и развития ЛЭК имеет очевидную актуальность и практическую значимость для изучения и сохранения природных территорий Иркутского региона и Бурятии. Полученные результаты могут быть использованы при выполнении следующих работ: оценки инвестиционной привлекательности проектов энергоснабжения, использующих возобновляемые источники энергии (ВИЭ), с учетом частичной компенсации капитальных затрат органами власти; прогнозирования потенциальной генерации ВИЭ для имеющихся энергетических систем и комплексов, расположенных на БПТ; предпроектной технико-экономической оценки проектов энергоснабжения инфраструктурных объектов, расположенных на БПТ; разработки и исполнения законодательства по сохранению озера Байкал и его экологическому оздоровлению, включая повышение экономической эффективности инфраструктурных объектов и снижение негативного антропогенного воздействия на окружающую среду.

Научная новизна состоит в обеспечении эффективного междисциплинарного решения задачи комплексного исследования функционирования и развития ЛЭК на

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды», рег. № 124052100088-3).

основе крупномасштабных научных экспериментов в высокопроизводительной сервис-ориентированной вычислительной среде с использованием больших массивов тематических пространственно-распределенных данных.

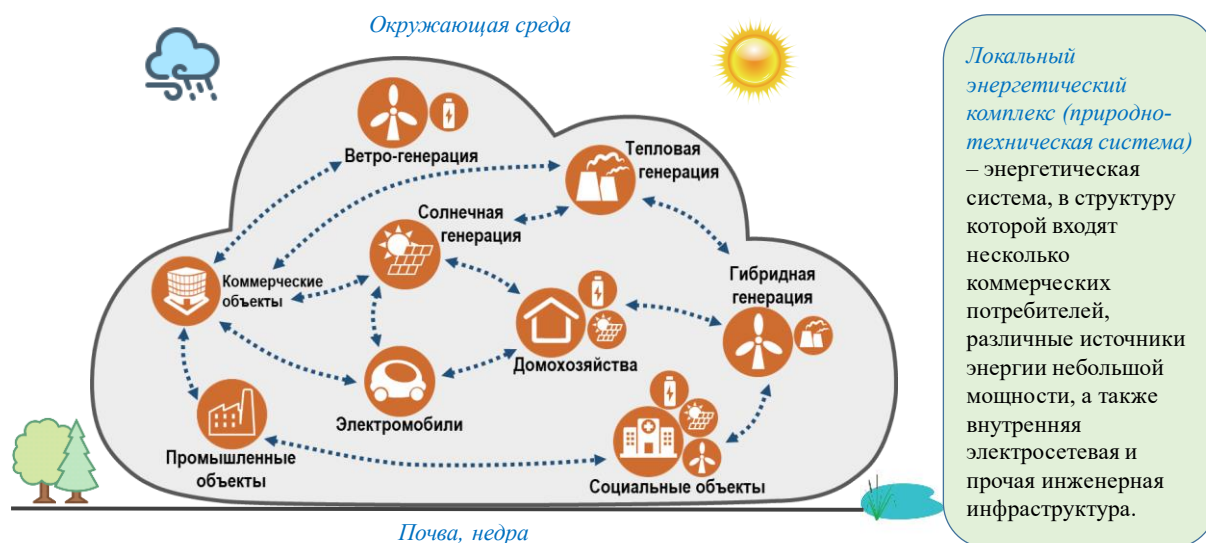


Рис. 1. ЛЭК

Методы и средства. Общая схема моделирования ЛЭК [3], уточненная в рамках данной работы, представлена на рис. 2. Блоки, реализующие модели, прикладное ПО, научные сервисы и приложения для исследования функционирования и развития ЛЭК выделены зеленым цветом.

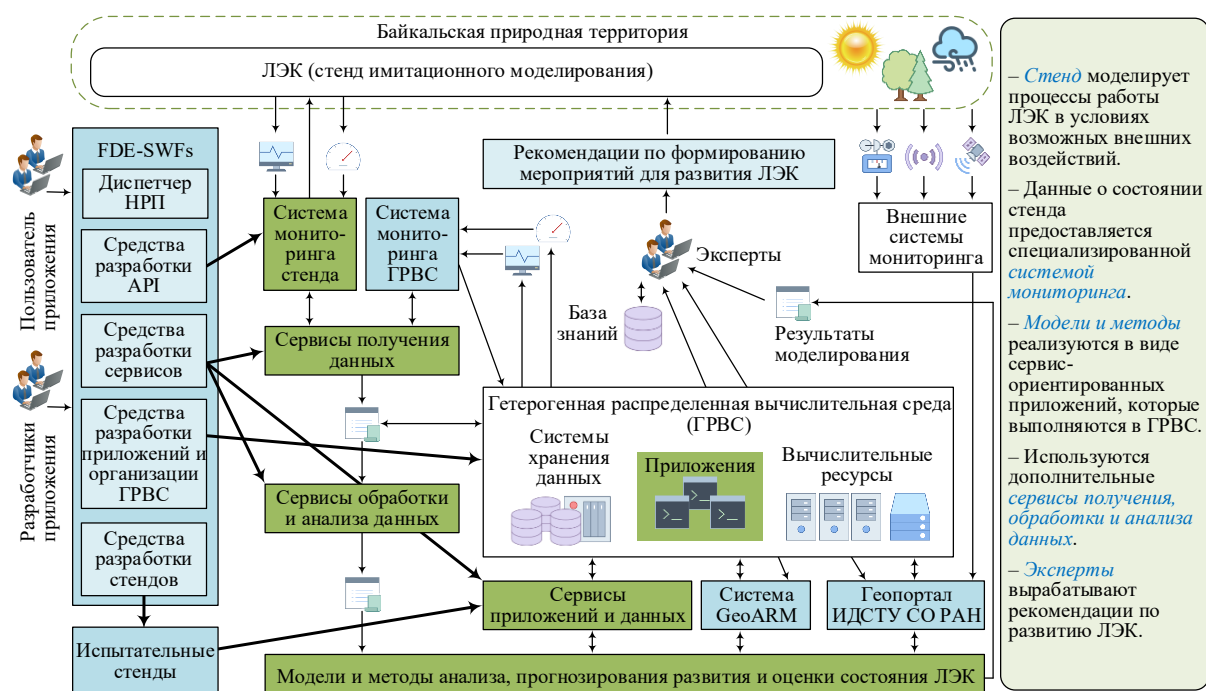


Рис. 2. Общая схема моделирования ЛЭК

В рамках данной схемы стенд имитационного моделирования ЛЭК (рис. 3) может использоваться в качестве физической модели комплекса [4]. Он размещен в технопарке Иркутского национального исследовательского технического университета [5] и применяется для моделирования наиболее значимых процессов работы ЛЭК с учетом возможных отказов его элементов из-за различных внешних воздействий. Параметры его

работы собираются системой мониторинга и передаются оператору стенда и пользователям приложений (специалистам в предметной области). Результаты моделирования ЛЭК отправляются экспертам, которые могут дополнительно использовать средства системы GeoARM [6] и геопортала ИДСТУ СО РАН [7] для их дальнейшего анализа.

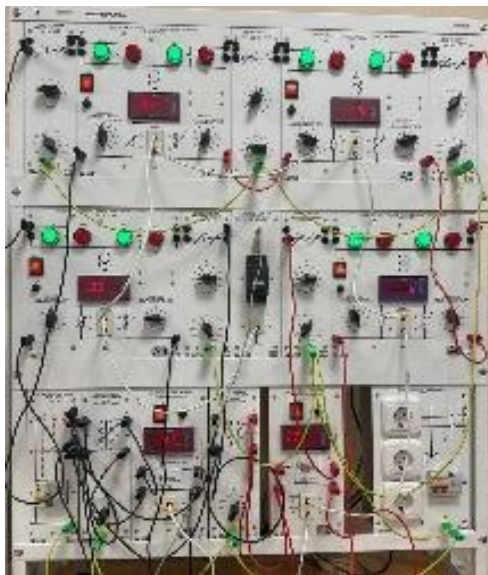


Рис. 3. Стенд имитационного моделирования

Модели и прикладное ПО для исследования функционирования и развития ЛЭК реализуются в виде научных сервисов и приложений с помощью инструментального комплекса FDE-SWFs [8].

Результаты исследования. К настоящему времени получены следующие основные результаты. Разработаны новые модели, алгоритмы и прикладное ПО для моделирования ЛЭК с упором на детализацию технологических процессов и анализ чувствительности разрабатываемых моделей к степени неопределенности пространственно-распределенных данных, представляющих внутренние и внешние условия функционирования ЛЭК. Научная новизна определяется интеллектуализацией управления ЛЭК, которое предъявляет повышенные требования к детализации моделируемых технологических процессов и качеству получаемых данных об условиях функционирования и развития ЛЭК.

Разработан новый трехуровневый алгоритм структурно-параметрической оптимизации ЛЭК с учетом ограничений, обуславливаемых законодательством в отношении БПТ. Принятие решений по развитию ЛЭК производится по критериям их технико-экономической эффективности, надежности и экологичности. Новизна заключается в том, что помимо традиционного согласования разных, противоречивых по смыслу критериев, также проводится проверка эффективности предлагаемых решений заданным множеством сценариев экстремальных условий функционирования ЛЭК. При создании сценариев экстремальных природно-климатических условий используются ранее разработанные сервисы по получению и обработке временных рядов метеорологических данных.

Предложенный подход к исследованию функционирования и развития ЛЭК успешно апробирован при решении ряда научных и прикладных задач. В их числе анализ взаимодействия микросетей в условиях крупных внешних возмущений [9], сбор, обработка и анализ временных рядов метеорологических данных [10] и структурно-параметрическая оптимизация ЛЭК [11]. В рамках данной работы интегрированное

применение представленных разработок показано на примере комплексной оценки критичности элементов модельной системы газоснабжения [3].

Сравнительный анализ. Проведен сравнительный анализ нашего подхода с рядом известных подходов [12-14] к оценке критичности элементов энергетических инфраструктур. Результаты сравнительного анализа учитываемых аспектов представления и работы одной из систем топливоснабжения исследуемого ЛЭК, а также достижимых эффектов выявления его критических элементов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты сравнительного анализа

Энергетическая инфраструктура	Моделируемые аспекты работы исследуемой системы				Достижимые эффекты			
	Топология	Функциональность	Каскадное развитие аварий	Взаимосвязи	Проведение комплексная оценка критичности	Выявление явных уязвимостей *	Выявление скрытых уязвимостей **	Классификация: уязвимых элементов / узких мест / зависимых элементов
Энергетическая система [21]	+	+	+	–	+	+	+	+ / – / –
Система газоснабжения [22]	+	+	–	–	+	+	–	+ / + / –
Система теплоснабжения [3]	+	+	–	–	+	+	–	+ / – / –
Исследуемая система газоснабжения	+	+	+	+	+	+	+	+ / + / +

*Явная уязвимость проявляется сразу при единичном отказе элемента энергетической инфраструктуры.

**Неявная уязвимость выявляется только при исследовании групповых отказов элементов энергетической инфраструктуры. Выявление неявных уязвимостей приводит к существенному росту вычислительной сложности процесса решения задачи.

Как правило, топология и функциональность энергетической инфраструктуры учитывается во всех подходах. При этом в отличие от других подходов в рамках нашего подхода есть возможность учета более сложных взаимосвязей и каскадного развития аварий, требующего привлечения высокопроизводительных вычислений, обработки и анализа больших массивов временных рядов данных. В свою очередь это позволяет выявлять как явные, так и неявные уязвимости и более точно их классифицировать. Такая классификация способствует рациональному выбору мероприятий по развитию энергетической инфраструктуры и определению их приоритетности. Так, по результатам комплексной оценки элементов энергетической инфраструктуры важно не только запланировать мероприятия по повышению живучести уязвимых элементов, но и уделить внимание узким местам, которые в случае внешних возмущений могут не дать эффективно компенсировать недопоставку энергоресурсов потребителям энергоресурсами из резервных источников.

Заключение. В рамках исследования разработаны новые модели, алгоритмы и прикладное ПО моделирования ЛЭК с упором на детализацию технологических процессов и анализ чувствительности разрабатываемых моделей к степени неопределенности пространственно-распределенных данных. Предложены новые алгоритмы структурно-параметрической оптимизации ЛЭК с целью согласования критериев их экономической эффективности, надежности и экологичности в условиях

ограничений, обуславливаемых законодательством в отношении БПТ. Приведен пример интегрированного применения представленных разработок для комплексной оценки критичности элементов модельной системы газоснабжения.

В дальнейшем планируется разработка новой методики исследования адаптивности ПТС, расположенных на БПТ, к внутренним и внешним возмущениям. Суть методики заключается в выявлении уязвимостей в структуре ПТС, выработке мер по их устранению и компенсации возможных социальных, экономических, экологических и прочих последствий воздействия на уязвимости ПТС.

1. Грязнов О.Н. Природно-технические системы – универсальные системы взаимодействия инженерных сооружений (объектов) и природной среды // Известия Уральского государственного горного университета. 2015. № 4(40). С. 5–10.
2. Бычков И.В., Феоктистов А.Г., Чекан М.А. Модель поведения агента микросети // Вычислительные технологии. 2023. Т. 28, № 6. С. 108–117.
3. Феоктистов А.Г., Воскобойников М.Л., Бычков И.В., Еделев А.В. Разработка сервис-ориентированной среды моделирования природно-технических систем // Сборник научных трудов VII Международного семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенных сред (ICCS-DE 2025). 7-11 июля 2025 г., г. Иркутск, Россия. Иркутск: Изд-во ИДСТУ СО РАН, 2025. С. 141–145.
4. Bychkov I.V., Feoktistov A.G., Bodnyuk M.E., Karamov D.N. Monitoring system of a physical model for a microgrid // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2025. Vol. 61, № 2. P. 5–12.
5. О технопарке. URL <https://www.istu.edu/deyatelnost/nauka/baza/tekhnopark>.
6. Фереферов Е.С., Бычков И.В., Хмельнов А.Е. Технология разработки приложений баз данных на основе декларативных спецификаций // Вычислительные технологии. 2014. № 5(19). С. 85–100.
7. Геопортал ИДСТУ СО РАН. URL: <https://geos.icc.ru/>.
8. Voskoboinikov M., Feoktistov A., Tchernykh A. Framework for Development and Execution of Scientific WorkFlows: Designing Service-oriented Applications // Programming and computer software. 2024. Vol. 50, № 8. P. 900–913.
9. Bychkov I.V., Feoktistov A.G., Chekan M.A. Modeling Agent Behavior in Interacting Microgrids // Proc. of the 10th Intern. Conf. on Information Technology and Nanotechnology (ITNT 2024). IEEE, 2024. P. 1–5.
10. Юмашев Е.А. Методика разработки приложений для получения, обработки и анализа метеоданных // Сборник научных трудов VII Международного семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенных сред (ICCS-DE 2025). 7-11 июля 2025 г., Иркутск, Россия. Иркутск: Изд-во ИДСТУ СО РАН, 2025. С. 208–210.
11. Edeleva O., Edelev A., Voskoboinikov M., Feoktistov A. Scientific Workflow-Based Synthesis of Optimal Microgrid Configurations // Energies. 2024. Vol. 17, № 23. P. 6138.
12. Wang W., Zhang Y., Li Y., Hu Q., Liu C., Liu C. Vulnerability analysis method based on risk assessment for gas transmission capabilities of natural gas pipeline networks // Reliability Engineering & System Safety. 2022. Vol. 218. P.108150.
13. Mao D., Wang P., Fang Y.P., Ni L. Topological and functional vulnerability analysis and mitigation for single-source heating networks based on tree models // Sustainable Cities and Society. 2023. Vol. 99. P.104949.
14. Wang S., Guo Z., Huang X., Zhang J. A three-stage model of quantifying and analyzing power network resilience based on network theory // Reliability Engineering & System Safety. 2024. Vol. 241. P.109681.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ: ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА*

И.В. Бычков¹, М.Л. Воскобойников¹, А.Г. Феоктистов¹, М.А. Чекан¹, Д.С. Яковлев¹,
М.Е. Боднюк^{1,2}, Е.П. Николаев^{1,2}, Е.А. Юмашев^{1,2}, Я.А. Еделев^{1,3}

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

² Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

³ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
г. Томск, Россия
agf@icc.ru

Введение. В работе представлен опыт инструментальной поддержки разработки и применения моделей, алгоритмического и программного обеспечения (ПО) и научных сервисов исследования функционирования и развития (моделирования, структурно-параметрической оптимизации, экологической и технико-экономической оценки) природно-технических систем (ПТС) [1], располагающихся на Байкальской природной территории (БПТ). В рамках предметной области рассматривается важный класс ПТС – локальные энергетические комплексы (ЛЭК), отказы элементов которых могут приводить к значительному снижению надежности энергоснабжения конечных потребителей и негативному воздействию на БПТ.

Особенностью предложенного подхода к инструментальной поддержке разработки и применения моделей, алгоритмов, ПО, научных сервисов и приложений является интегрированное использование концептуального, модульного и сервис-ориентированного программирования, а также технологий контейнеризации ПО, In-Memory Data Grid [2], анализа и визуализации данных, организации параллельных и распределенных вычислений.

Методы и средства. Общая схема моделирования ЛЭК [3], уточненная в рамках данной работы, представлена на рис. 1. Блоки, разрабатываемые в рамках крупного научного проекта* и предназначенные для инструментальной поддержки моделирования, выделены зеленым цветом.

В рамках данной схемы стенд имитационного моделирования (физическая модель), используемый для исследования важных процессов функционирования ЛЭК, представлен его физической моделью – стендом имитационного моделирования [4]. Моделирование процессов функционирования ЛЭК выполняется с учетом крупных внешних воздействий и отказов его элементов. Данные о состоянии и процессах функционирования стенда предоставляются специализированной системой его мониторинга. Экспертам предоставляется возможность анализа результатов моделирования с помощью внешних инструментов, таких как система GeoARM [5] и геопортал ИДСТУ СО РАН [6].

Модели и методы анализа, прогнозирования развития и оценки состояния ЛЭК реализуются в виде сервис-ориентированных приложений (СОП) [7]. Эти приложения представляют собой комплексы взаимосвязанных прикладных модулей и средств

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды», рег. № 124052100088-3).

системного обеспечения, предназначенные для автоматизации решения задач моделирования, структурно-параметрической оптимизации, экологической и технико-экономической оценки ЛЭК.

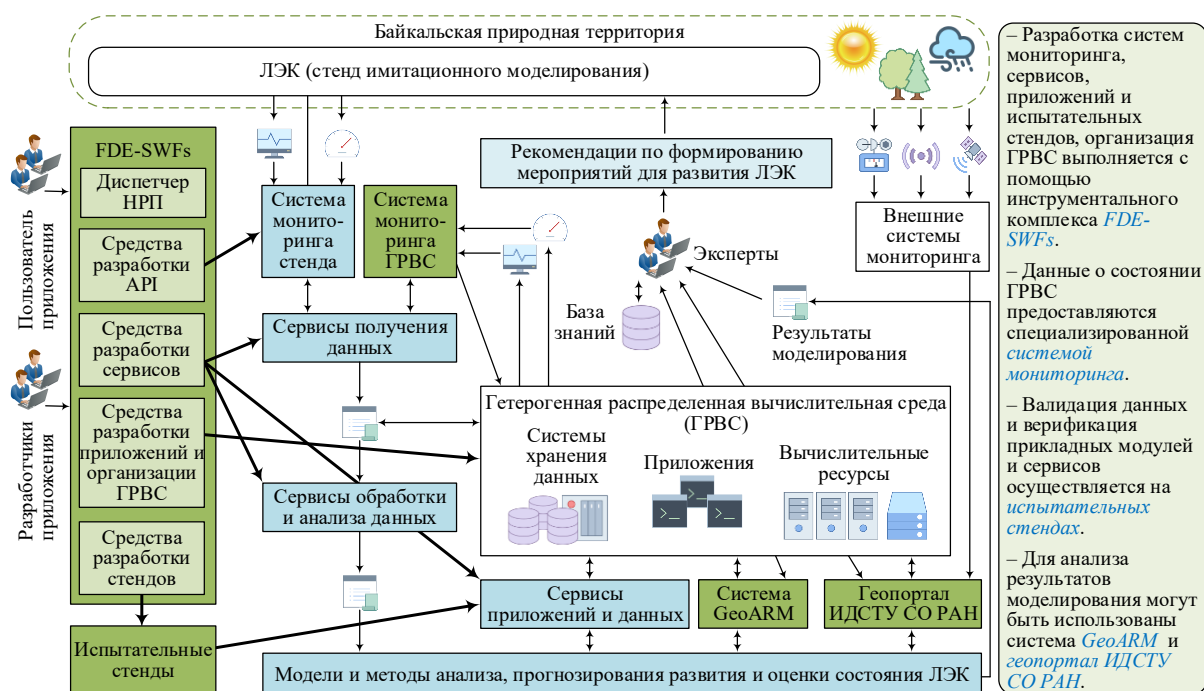


Рис. 1. Общая схема моделирования ЛЭК

Ключевыми особенностями СОП являются:

- ориентация на решение задач, требующих проведения расчетов с использованием больших объемов вычислительных ресурсов (процессорного времени, оперативной памяти, дискового пространства и др.);
- решаемые задачи допускают их декомпозицию на более простые взаимосвязанные подзадачи;
- разработка прикладного ПО приложения производится на основе модульного подхода;
- предполагается разбиение исходных данных на блоки и их независимая параллельная обработка;
- не предполагается интенсивного взаимодействия между параллельными вычислительными процессами;
- расчеты осуществляются на основе выполнения научного рабочего процесса (НРП), представляющего собой схему решения задачи;
- вычисления выполняются, как правило, по одной слабо меняющейся схеме, требующей динамического управления процессом вычислений с использованием системного связующего ПО;
- реализация прикладного ПО в виде сервисов и их композиций;
- поддержка ряда стандартов представления сервисов и их композиций (WPS, BPEL);
- тестирование модулей, сервисов и научных рабочих процессов разрабатываемых приложений, а также валидация данных на испытательных стендах.

Приложения выполняются в гетерогенной распределенной вычислительной среде (ГРВС), интегрирующей высокопроизводительные ресурсы центров коллективного пользования, вычислительных сетей Grid-систем, облачных и туманных платформ.

Данные о состоянии и процессах функционирования ГРВС предоставляются специализированной системой ее мониторинга.

Разработка специализированных API систем мониторинга, сервисов и приложений, а также организация ГРВС осуществляется с помощью инструментального комплекса FDE-SWFs [7], который разработан в ИДСТУ СО РАН и относится к классу систем управления научными рабочими процессами (НПП). Валидация данных и верификация прикладных модулей и сервисов осуществляется на испытательных стендах, которые также разрабатываются средствами FDE-SWFs в виде системных НПП.

В отличие от известных инструментов подобного назначения, FDE-SWFs обеспечивает поддержку ряда стандартов разработки и применения НПП. Он позволяет представлять НПП на языке Business Process Execution Language (BPEL) и поддерживает стандарт Web Processing Service (WPS) от консорциума Open Geospatial Consortium. Поддержка WPS-сервисов особо важна для решения задач экологического мониторинга природных территорий, чрезвычайно актуальных в настоящее время [8].

Разработка СОП базируется на применении следующих протоколов, стандартов, систем и технологий: протокол SOAP для разработки веб-сервисов и его расширение WPS для поддержки геоинформационных систем, спецификация взаимодействия с которыми разрабатывается в соответствии со стандартом WSDL; компоненты поддержки RESTful сервисов, спецификация взаимодействия с которыми разрабатывается в соответствии со стандартом OpenAPI; системы построения композиции сервисов, основанные на языке BPEL; фреймворк разработки веб-приложений на базе Vue.js и JavaScript платформы Node.js; системы прототипирования научных веб-приложений на базе библиотек Taipy, Cocalc и SageMath языка Python; системы визуализации временных рядов на базе библиотек Plotly, Highcharts; система визуализации НПП на базе ПО Graphviz.

Системная составляющая разрабатываемого ПО базируется на интегрированном использовании современных передовых технологий и систем организации параллельных и распределенных вычислений, таких как:

- платформы контейнеризации Docker, CRI-O и containerd, ориентированные на запуск контейнеров в высокопроизводительных вычислительных средах;
- системы управления развертыванием контейнеров Kubernetes для размещения настроенных образов (оркестрации) на узлах вычислительных ресурсов;
- системы управления виртуальными машинами на базе OpenStack и Terraform; системы автоматизации конфигурирования вычислительных ресурсов на базе Ansible;
- системы распределенной обработки и хранения специализированных типов данных, включая такие системы, как Alluxio, MinIO и CEPH;
- системы мониторинга и анализа состояния вычислительной среды на базе систем Prometheus и Grafana;
- протокола Modbus для прямого обмена данными с оборудованием стенда имитационного моделирования ЛЭК, реляционной базы данных SQLite для хранения результатов мониторинга и специализированного API, реализованного с помощью инструментария Entity Framework на базе RESTful-архитектуры с использованием технологии Object-Relational Mapping.

Такой подход позволяет организовывать высокопроизводительную, масштабируемую, надежную, сервис-ориентированную вычислительную среду, интегрирующую ресурсы суперкомпьютерных центров коллективного пользования и Grid-систем, а также облачных платформ, основанных на стандартах Elastic Compute Cloud (EC2) и Simple Storage Service (S3).

Предложенный подход к инструментальной поддержке успешно апробирован при разработке и применении ряда приложений. В их числе приложения для анализа взаимодействия микросетей в условиях крупных внешних возмущений [9], сбора, обработки и анализа временных рядов метеорологических данных [10], структурно-параметрической оптимизации ЛЭК [11], комплексной оценки критичности элементов энергетических инфраструктур [3] и др.

Сравнительный анализ. В качестве основного инструмента для организации COBC использован FDE-SWFs. Сравнительный анализ поддержки ключевых функциональных возможностей в рамках данного комплекса и систем подобного назначения (табл. 1) показал [13], что он наиболее полно предоставляет возможности по описанию НРП, поддержке управляющих конструкций и построению сервис-ориентированных НРП с WPS. Он максимально поддерживает требуемые уровни параллелизма, обеспечивает формирование среды с использованием ресурсов суперкомпьютерных центров, Grid-систем и облачных платформ, а также в отличие от большинства СУРП автоматизирует интеграцию и контейнеризацию ПО, предоставляет возможность применения технологии IMDG, существенно ускоряющей обработку данных (табл. 2).

Таблица 1. Поддержки возможностей построения НРП

СУРП	Поддержка					
	ветвления / циклы	системные операции	НРП: абстрактный / конкретный	постановки задач: процедурная / непроцедурная	сервисы	WPS
UNICORE	+ / +	+	- / +	+ / -	+	-
DAGMan	- / -	+	+ / -	+ / -	-	-
Pegasus	- / -	+	+ / -	+ / -	-	-
Apache Airflow	- / -	-	- / +	+ / -	-	-
HyperFlow	- / -	+	+ / +	+ / -	+	-
WaaS Cloud Platform	- / -	-	+ / -	+ / -	+	-
Galaxy	- / +	+	+ / +	+ / -	+	-
BPEL Designer Project	+ / +	-	+ / +	+ / -	+	+
FDE-SWFs	+ / +	+	+ / +	+ / +	+	+

Таблица 2. Поддержки возможностей выполнения НРП

СУРП	Поддержка				
	параллелизм: задача / данные / конвейер	среда: кластер / Grid / облако	IMDG	интеграция прикладного и системного ПО	контейнеризация прикладного и системного ПО
UNICORE	+ / + / -	- / + / -	-	-	-
DAGMan	+ / + / -	+ / + / +	-	-	-
Pegasus	+ / + / -	+ / + / +	-	-	-
Apache Airflow	+ / + / +	- / - / +	-	+	+
HyperFlow	+ / - / -	- / - / +	-	-	-
WaaS Cloud Platform	+ / - / -	- / + / +	-	-	-
Galaxy	+ / - / -	- / - / +	-	-	-
BPEL Designer Project	+ / - / -	+ / + / +	-	-	-
FDE-SWFs	+ / + / +	+ / + / +	+	+	+

Заключение. В рамках исследования разработаны специализированные инструментальные средства организации и применения сервис-ориентированных приложений для решения задач исследования функционирования и развития ЛЭК в

высокопроизводительной вычислительной среде, включая мультиагентную платформу моделирования взаимодействия исследуемых систем и инструменты контейнеризации прикладного и системного ПО с целью обеспечения горизонтального и вертикального масштабирования экспериментальных расчетов с учетом ограничений на ресурсы среды.

Разработаны и интегрированы специализированные системы мониторинга и управления ресурсоемкими СОП для исследования функционирования и развития ЛЭК в мультиоблачной среде, обеспечивающие согласование критериев качества выполнения приложений и использования облачных ресурсов, а также улучшение показателей этих критериев по сравнению с известными системами управления облачными вычислениями.

Дальнейшее направление исследований связано с разработкой специализированной системы и оригинальной методики комплексирования, тестирования и опубликования уникальных композиций WPS-сервисов, интегрирующих прикладные компоненты СОП для исследования функционирования и развития ПТС.

1. Исаев С.В. Концепция природно-технических систем и ее использование при изучении антропогенной трансформации природной среды // Географический вестник. 2016. № 3(38). С. 105–113.
2. Guroob A.H. EA2-IMDG: Efficient Approach of Using an In-Memory Data Grid to Improve the Performance of Replication and Scheduling in Grid Environment Systems // Computation. 2023. Vol. 11, № 3. P. 65.
3. Феоктистов А.Г., Воскобойников М.Л., Бычков И.В., Еделев А.В. Разработка сервис-ориентированной среды моделирования природно-технических систем // Сборник научных трудов VII Международного семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенных сред (ICCS-DE 2025). 7-11 июля 2025 г., Иркутск, Россия. Иркутск: Изд-во ИДСТУ СО РАН, 2025. С. 141–145.
4. Бычков И.В., Феоктистов А.Г., Боднюк М.Е., Карамов Д.Н. Система мониторинга физической модели микросети // Автометрия. 2025. Т. 61, № 2. С. 5–12.
5. Фереферов Е.С., Бычков И.В., Хмельнов А.Е. Технология разработки приложений баз данных на основе декларативных спецификаций // Вычислительные технологии. 2014. № 5(19). С. 85–100.
6. Климонов М.С., Федоров Р.К. Рекомендательная система для выбора сервисов на геопортале ИДСТУ СО РАН // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2025. № 2(38). С. 199–207.
7. Воскобойников М.Л., Феоктистов А.Г., Черных А.Н. Разработка и применение сервис-ориентированных научных приложений в инструментальном комплексе FDE-SWFs // Труды ИСП РАН. 2024. Т. 36, № 6. С. 195–214.
8. Бычков И.В., Феоктистов А.Г., Воскобойников М.Л., Еделев Я.А. Разработка сервис-ориентированного доступа к высокопроизводительной вычислительной среде на основе стандарта WPS // Вычислительные технологии. 2025. Т. 30, № 2, С. 87–99.
9. Чекан М. Автоматизация разработки мультиагентных систем на основе иерархических машин состояний // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 3. С. 59–65.
10. Юмашев Е.А. Методология анализа и обработки временных рядов метеорологических данных // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 5. С. 107–112.
11. Bychkov I.V., Feoktistov A.G., Voskoboinikov M.L., Edelev A., Beresneva N., Edeleva O. Optimization of Integrated Energy System Resilience // Информатика и автоматизация. 2025. Т. 24, № 3. С. 951–981.
12. Воскобойников М.Л., Феоктистов А.Г. Сравнительный анализ систем управления научными рабочими процессами // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2024. № 3(35). С. 102–111.

ПРИМЕНЕНИЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ КЛАССИФИКАЦИИ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ*

А.К. Попова

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН,
г. Иркутск, Россия
chudnenko@icc.ru

Актуальность и точность данных о породном составе лесов играют ключевую роль в сохранении и управлении экосистемами. Одним из эффективных источников такой информации являются спутниковые снимки Земли. Анализ спутниковых изображений требует меньше ресурсов по сравнению с наземными исследованиями, а применение методов машинного обучения позволяет автоматизировать классификацию древесных пород [1]. Однако только оптических данных не всегда достаточно для получения результата требуемой точности из-за схожести спектральных характеристик лесных пород. Распознавание пород деревьев может быть сложной задачей из-за сходства коэффициентов отражения и текстуры поверхности разных видов. Для повышения качества классификации к исходным спектральным каналам можно добавить дополнительные данные: вегетационные индексы, топографические показатели, почвенные и климатические карты [2].

В данной работе в качестве исходных использовались снимки спутника Sentinel-2. К ним были добавлены вегетационные индексы, топографические, почвенные и климатические переменные. Вегетационные индексы представляют собой различные комбинации каналов спутника, что позволило усилить информативность признаков красного, инфракрасного и коротковолнового инфракрасного диапазонов спектра, которые продемонстрировали хорошие возможности для идентификации видов растительности. Топографические данные учитывают влияние рельефа на распределение видов, поскольку он определяет микроклиматические условия и особенности местообитаний. Параметры почвы напрямую связаны с распространением пород. Физические параметры определяют текстуру почвы, которая регулирует доступность воды и влагоудерживающую способность растительности. Содержание азота и органического углерода показывает качество и плодородие почвы. Климатические переменные (среднегодовые осадки и температура воздуха) учитывались, поскольку они определяют адаптационные возможности растений и границы их естественного ареала.

Классификация проводилась методом машинного обучения Random Forest. В процессе исследования оценивалась производительность модели при использовании только спектральных данных Sentinel-2, при добавлении данных каждого типа по отдельности и для полного набора признаков. Общая точность классификации набора из всех 98 переменных составила 78,8%, что на 29,2% больше, чем точность классификации только каналов Sentinel-2, которая равна 49,6%. Из всех вспомогательных данных

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научного-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

наибольший вклад внесли климатические и почвенные признаки, увеличившие точность до 67,4% и 69,9% соответственно.

На рисунке приведена полученная карта распределения пород деревьев на примере территории тестового Слюдянского лесничества, расположенного в Иркутской области. Этот результат позволяет оценить размеры и распределение площадей деревьев разных пород, которые дальше могут быть использованы для моделирования динамики лесных ресурсов и оценки воздействия природных и антропогенных факторов на состояние лесов [3].

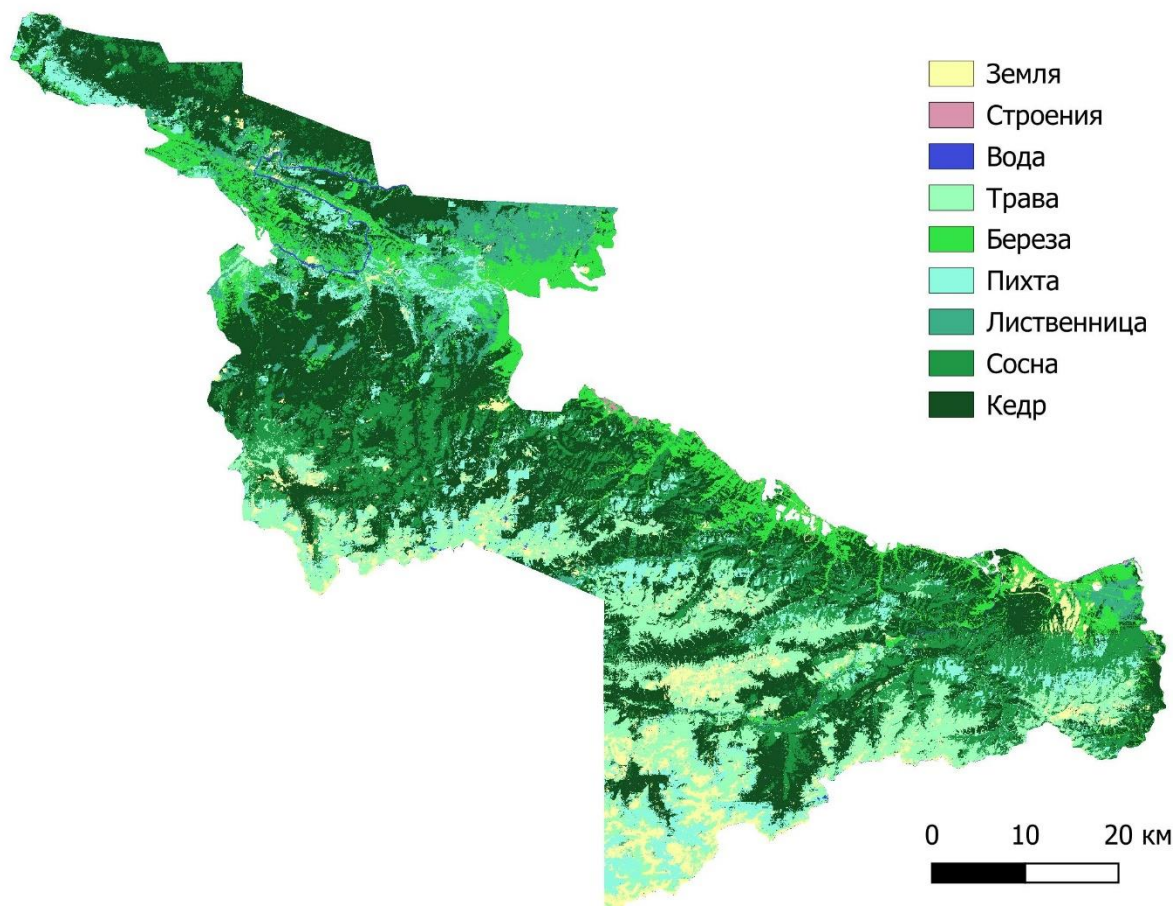


Рис. 1. Полученная карта распределения пород деревьев на территории Слюдянского лесничества

1. Бычков И.В., Ружников Г.М., Федоров Р.К., Попова А.К., Авраменко Ю.В. О классификации космических снимков Sentinel-2 нейронной сетью ResNet-50 // Компьютерная оптика. 2023. Т. 47, № 3. С. 474-481. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1216.
2. Popova A. Improving the Accuracy of Tree Species Mapping by Sentinel-2 Images Using Auxiliary Data—A Case Study of Slyudyanskoye Forestry Area near Lake Baikal // Forests. 2025. 16(3):487. DOI: 10.3390/f16030487.
3. Попова А.К. Подготовка начальных данных для моделей лесных ресурсов на основе данных ДЗЗ // Вычислительные технологии. 2023. Т. 28. № 6. С. 135-150. DOI: 10.25743/ICT.2023.28.6.012.

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ГАРЕЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДЗЗ И ПЛАТФОРМЫ GOOGLE EARTH ENGINE*

Ю.В. Пестова, О.А. Николайчук

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН,
г. Иркутск, Россия
yupest@icc.ru

Лесные пожары оказывают значительное воздействие на экосистемы, особенно в регионах с плотным лесным покровом, таких как Иркутская область. За последние годы на территории региона наблюдаются устойчивые экологические и экономические потери, связанные с интенсивным горением лесов [1]. Анализ данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяет определять границы гарей, оценивать ущерб и отслеживать восстановление растительности, что важно для разработки стратегий по смягчению последствий пожаров и восстановлению экосистем [2]. На основе методов анализа данных ДЗЗ был разработан подход идентификации границ гарей для территорий отдельных лесничеств Иркутской области.

Данные о пожарах предоставлены Институтом космических исследований РАН [3] на территорию Иркутской области за временной период 2004–2024 гг. Набор данных сформирован на основе продукта спутникового мониторинга MODIS и содержит: контуры (полигоны) с разрешением в 1 км и числовые метрики площадей пожаров (всей и только лесной) с учетом коррекции на размер пикселя исходных данных в гектарах, дату и координаты первого обнаружения и дату ликвидации пожара.

Для различных групп вегетационных индексов были составлены композиты снимков за 30 дней до пожара, сразу после пожара и через год после пожара в Катангском районе Иркутской области за период 07.08.2020 г. – 05.09.2020 г. Анализ композитов позволил провести оценку пригодности различных спектральных индексов для включения в модель оценки площадей возгорания и постпожарных последствий.

Индексы, традиционно используемые для оценки состояния растительности (ARVI, DVI, EVI, GARI, IPVI, NDVI, RVI, VARI), демонстрируют высокую чувствительность к восстановлению растительного покрова и степени повреждений, особенно на интервале через год после пожара. Среди них NDVI, ARVI и RVI наглядно отражают восстановительные процессы (рис 1).

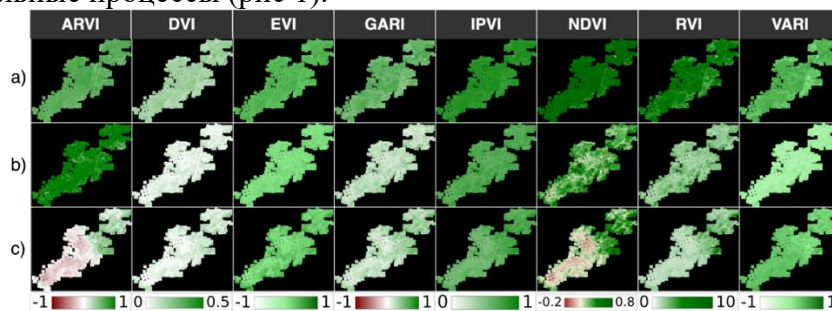


Рис. 1. Композиты изменения вегетационных индексов, чувствительных к растительности на территории лесного пожара: в течение месяца до пожара (а); в течение месяца после пожара (б); через год после пожара (с)

*Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

Для выявления участков, подвергшихся интенсивному выгоранию, наибольшую информативность показывают индексы, специально разработанные для оценки последствий пожаров – BAI, BAIS2, NBR, NBR2 и NBRPLUS. Эти индексы позволяют зафиксировать изменения в спектральных характеристиках поверхности сразу после огня. Наибольшее покрытие возгорания демонстрируются на картах вегетационных индексов BAI и BAIS2 сразу после пожара, а также NBRPLUS через год (рис. 2).

Индексы, чувствительные к биохимическим характеристикам растительности (SIPI, CIRE, GCI, PSRI, SAVI, MSAVI), играют важную роль в более детальной интерпретации степени деградации покрова. PSRI позволяет отследить процессы старения и деградации листвы, заметные сразу после пожара, а спустя год – восстановительные процессы. Индексы SIPI и CIRE дают представление о фотосинтетической активности, а SAVI и MSAVI показывают устойчивость к фоновому влиянию почвы, что особенно ценно в редколесье и на открытых участках (рис. 2).

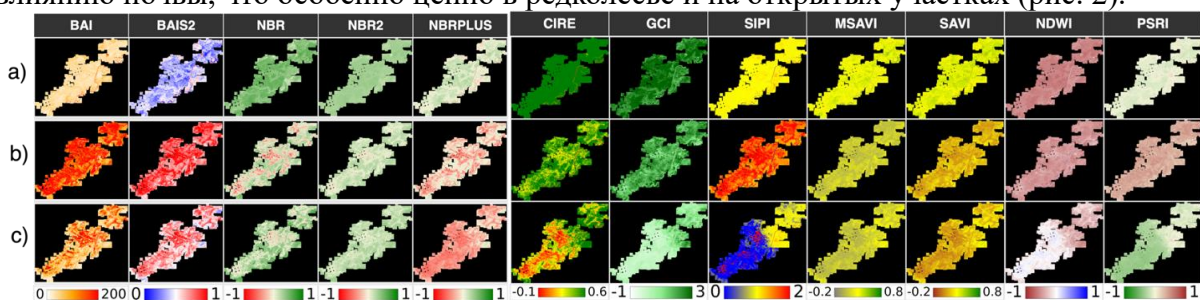


Рис. 2. Композиты изменения вегетационных индексов, чувствительных к выгоранию и биохимическим характеристикам растительности на территории лесного пожара: в течение месяца до пожара (а); в течение месяца после пожара (б); через год после пожара (с)

В качестве основных входных данных для обучения модели классификации гарей использовались скорректированные на атмосферу сцены спутника Sentinel-2. В качестве геометрии области исследования выбрана территория Киренского лесничества Иркутской области. Сбор, обработка данных, обучение модели и ее интерпретация проводились на облачной геопространственной платформе Google Earth Engine, которая предоставляет доступ к архиву спутниковых данных и инструментам для их анализа, в частности, в научных и некоммерческих целях.

Разметка обучающей выборки произведена в геоинформационной системе QGIS, были подготовлены 375 точечных образцов с целевой бинарной переменной «class» («гарь» и «не гарь»). Затем выполнена интеграция факторов, характеризующих возгорания на основе спектральных характеристик спутниковых снимков. Для этого были рассчитаны вегетационные индексы, которые формируют признаковое пространство обучающего набора данных. Его формирование основано на следующих этапах сбора и подготовки данных:

1. Коллекции снимков Sentinel-2 получены за период с марта по октябрь с различными интервалами: за 2019 г.; за 2020 г.; ежемесячно за 2019 г.
2. Пиксели с облаками исключены, а значения отражательной способности приведены к диапазону $[0, 1]$ делением на 10 000.
3. Для каждого изображения рассчитаны вегетационные индексы: NDVI, EVI, SAVI, MSAVI, ARVI, GARI, VARI, IPVI, RVI, DVI, SIPI, PSRI, CIRE, BAIS2, BAI, GCI, NDWI, NBR, NBR2, NBRPLUS.
4. Получены медианные композиты вегетационных индексов за каждый период.
5. Для каждого текущего и последующего ежемесячного интервала итеративно рассчитаны дифференциальные значения вегетационных индексов.

Полученные разностные изображения сформировали коллекцию снимков, которая была приведена к двум композитам снимков: максимальных и минимальных изменений.

6. На основе медианных композитов снимков за 2019 г. и 2020 г. было получено изображение разности вегетационных индексов.

Итоговое изображение включает вегетационные индексы годовой разности (в названии присутствует постфикс «_year»), экстремумов ежемесячных разностей (с префиксом «d») и экстремумы месячных медианных композитов вегетационных индексов, которые. Из этих данных извлекаются числовые значения вегетационных индексов для каждого объекта размеченной выборки. Далее она разделена случайным способом в соотношении 70 к 30 на тренировочную и валидационную выборки, соответственно. Первая используется для обучения классификатора, а вторая – для оценки его точности.

Для бинарной классификации использована реализация алгоритма метода машинного обучения Random Forest с гиперпараметром числа деревьев – 32, набором признаков из наиболее информативных спектральных индексов, выявленных в результате анализа корреляции: dNBR_year, BAI, dBAI, dNBR2_year, dNBRPLUS_year, dBAIS2, dVARI_year, dARVI_year, PSRI и переменной прогноза «class».

Оценка качества модели Accuracy составила на валидационной выборке 0.975. Точечные образцы на территории гарей имеют ошибку предсказания в 6%, что может быть по причине сохранившейся растительности внутри границ возгорания. Для образцов неповрежденной территории результаты предсказания не содержат ошибок и показали 100% точность.

Анализ важности факторов показал наиболее значимыми вегетационные индексы, чувствительные к выгоранию (dNBR_year, BAI, dBAI, dNBR2_year), наименее – к растительности (dVARI_year, dARVI_year), при этом индекс PSRI оказывает большее влияние, чем индексы возгорания dBAIS2 и dNBRPLUS_year. За счет этого модель четче распознает границы возгораний и менее чувствительна к вырубкам.

Индекс пересечения с объединением (IoU, Intersection over Union) является одной из ключевых метрик для оценки качества пространственного совпадения между предсказанными и эталонными контурами пожаров. Она рассчитывается как отношение площади пересечения двух геометрий к площади их объединения. Оценка IoU составила 0.58, что свидетельствует о среднем уровне совпадения между результатами классификации и фактическими границами пожаров, что в контексте геопространственного анализа указывает на приемлемое качество пространственного соответствия.

Полученные результаты будут применены для решения задачи прогнозирования риска лесных пожаров территории в качестве отдельного этапа верификации исходных данных о лесных пожарах для повышения точности прогнозирования.

1. Дроздова Т.И., Сорокикова Е.В. Анализ лесных пожаров в Иркутской области за 2010–2019 гг. XXI века // Техносферная безопасность. 2021. Т. 6, № 1. С. 29–41.
2. Шогелова Н., Сартин С. Применение дистанционного зондирования земли для определения площади лесных пожаров, степени горения и восстановления после пожара // Engineering J. of Satbayev University. 2023. Т. 145, № 3. С. 31–39.
3. Лупян Е.А. Оценка повреждений российских лесов пожарами в XXI веке на основе анализа интенсивности горения по данным прибора MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21, № 6. С. 233–249.

КОМПЛЕКСНЫЙ МОНИТОРИНГ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ*

Д.П. Гладкочуб¹, А.В. Саньков¹, А.А. Добрынина^{1,2}, В.А. Саньков^{1,2}, А.А. Рыбченко¹

¹Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

²Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН,
г. Иркутск, Россия

dobrynina@crust.irk.ru

Байкальская природная территория (БПТ) расположена в пределах Байкальского рифта, являющегося одной из наиболее сейсмически активных территорий Российской Федерации, по классификации МЧС ей присвоена первая (высшая) категория опасности. Высокая сейсмическая активность региона подтверждается как сведениями о землетрясениях прошлого (палеосейсмодислокации, сильные землетрясения по историческим данным), так и современным уровнем сейсмической активности. Помимо землетрясений, регион характеризуется проявлениями разнообразных опасных геологических процессов, таких как сели, паводки, обвалы и оползни, лавины, карстовые проявления [1]. В 2020 году в Институте земной коры СО РАН начались работы по комплексному мониторингу опасных геологических процессов на основе непрерывных измерений различных геофизических полей [1].

Основная масса землетрясений региона сосредоточена в достаточно узкой полосе, протягивающейся вдоль оси рифтовых впадин, Сибирская платформа практически асейсмична, Забайкальский блок характеризуется рассеянной умеренной сейсмичностью [2]. В самой Байкальской впадине наиболее сейсмически активной является ее южная часть, на прилегающих к ней территориях Южного Прибайкалья и Забайкалья (Иркутская область, республика Бурятия) находятся крупные города, населенные пункты, а также опасные производства, линейные сооружения, плотина ГЭС (г. Иркутск), автомагистрали и линии Восточно-Сибирской железной дороги. Данные районы также отличаются высоким уровнем селеопасности (область Тункинских впадин, горное обрамление Южнобайкальской впадины). По этим причинам территория Южного Байкала была выбрана в качестве исходной для организации работ по комплексному мониторингу опасных геологических процессов.

Сеть полигонов комплексного мониторинга опасных геологических процессов расположена вдоль основных рифтовых структур юго-западного фланга рифтовой системы на территории Иркутской области (полигоны «Листвянка», «Бугульдейка» и «Приольхонье», пункт «Узур») и республики Бурятия (пункты мониторинга «Максимиha», «Заречье», «Сухой ручей»), полигон «Южный Байкал» занимает область от южного окончания оз. Байкал («Талая») до системы Тункинских впадин (полигон «Зун-Мурино») (рис. 1). Такое положение измерительных точек позволяет проводить наблюдения за центральной и юго-западной частями рифтовой системы.

Полигоны комплексного мониторинга оснащены современным высокоточным оборудованием для мониторинга деформаций горных пород (собственная разработка ИЗК СО РАН), эманаций радона, скоростей движений и деформаций земной коры методом GPS-геодезии, магнитотеллурического поля Земли, метеопараметров,

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

температурного режима грунтов для глубин до 10 метров и сейсмического и микросейсмического режимов [1]. Часть пунктов наблюдения расположена на действующих сейсмических станциях Байкальского и Бурятского филиалов Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (БФ и БуФ ФИЦ ЕГС РАН соответственно). Институтом земной коры СО РАН с БФ и БуФ ФИЦ ЕГС РАН заключены договоры об обмене данными сейсмического мониторинга.

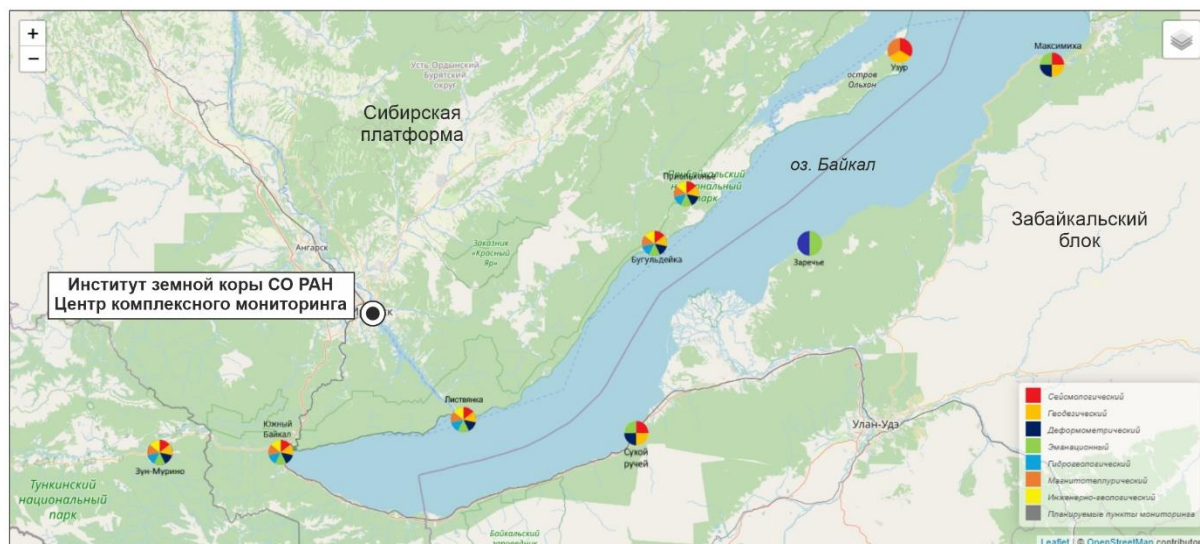


Рис. 1. Сеть полигонов и пунктов комплексного мониторинга ИЗК СО РАН

Данные с пунктов и полигонов комплексного мониторинга поступают в Институт земной коры СО РАН на сервер Центра комплексного мониторинга частично в режиме реального времени, частично – 1 раз в сутки. В 2022 году совместно с Институтом вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (г. Новосибирск) была разработана специальная цифровая платформа для визуализации, анализа и первичной обработки данных комплексного мониторинга. Платформа позволяет вывести на единый планшет данные разных видов мониторинга за выбранный период времени, провести первичную обработку сигналов и сохранить их в цифровом и растровом виде для последующего анализа. Для предварительной обработки сигналов предусмотрены режимы: суточная запись (вывод данных за указанные сутки), фильтр скользящего среднего, фильтр Баттерворта и др. На платформе реализованы также следующие виды математической обработки: энтропийный анализ, мультифрактальный анализ, поляризационный анализ, спектральный анализ, оценка спектра по Уэлчу, построение спектрограмм (спектрально-временной анализ).

Длинные ряды данных комплексного мониторинга используются для поиска возможных предвестников землетрясений в БРС и последующей разработки фундаментальных основ прогноза землетрясений. Настоящий подход положительно себя зарекомендовал при изучении предвестников последних сильных землетрясений БПТ: Быстринского землетрясения в Южном Прибайкалье (21.09.2020 г., $M_w=5.4$) [3] и Кударинского землетрясения в Южном Байкале (09.12.2020 г., $M_w=5.6$) [4-6].

Оба землетрясения сопровождались серией предшествовавших и сопутствующих явлений различной природы, зафиксированных в разных местах плейстосейстовой области и на смежной территории. В случае Быстринского землетрясения это было изменение режима и свойств подземных вод, предсейсмогенных вариациях напряженно-деформированного состояния породного массива, флуктуациях эманационного поля, также был зафиксирован краткосрочный предвестник землетрясения в динамике деформаций пород на полигоне «Южный Байкал» («Талая») [3, 5]. В случае

Кударинского землетрясения краткосрочные предвестники наблюдались на полигонах «Бугульдейка» и «Приольхонье» в данных деформационного, микросейсмического, магнитотеллурического, эманационного мониторинга [4-6]. Совпадение данных деформационного и микросейсмического мониторинга позволило охарактеризовать предварительную модель развития процессов в очаге перед и после сильного землетрясения и предложить на ее основе метод определения приближения сильного сейсмического события [5]. За годы функционирования сети полигонов комплексного мониторинга установлено, что в ближней к очагу зоне (до 150 км) сильные сейсмические события проявляются практически во всех изучаемых в режиме мониторинга полях. Характер и интенсивность этих проявлений зависят от параметров землетрясения (положение, магнитуда, глубина, фокальный механизм) и от локальных геологических условий полигонов мониторинга.

Комплексный мониторинг также положительно себя зарекомендовал при изучении других опасных геологических процессов, например, селевых потоков. На основе анализа сейсмических шумов, генерируемых потоком воды в русле реки Кынгарга (Тункинская долина, Восточный Саян) в межень и во время прохождения паводков [7] и селевого потока 2014 г. [8], предложена система мониторинга и экстренного оповещения о начале движения селевого потока.

Система состоит из комплекса оборудования, позволяющего контролировать условия формирования селевого потока, уровень и концентрацию твердой составляющей в водном/селевом потоке, осуществлять передачу данных на вычислительную станцию и при достижении критических значений (фиксирующих формирование селевого потока) подавать сигналы предупреждения об угрозе схода селевого потока. Принципиальная схема размещения элементов системы предупреждения представлена на рис. 2.

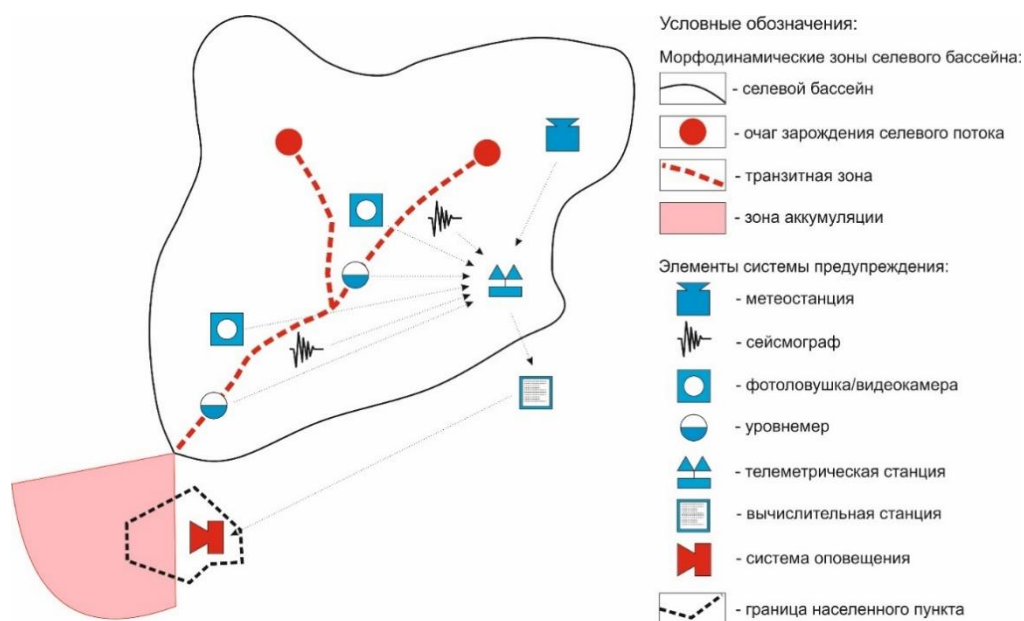


Рис. 2. Принципиальная схема системы предупреждения

Техническая сущность системы предупреждения заключается в следующем: при отсутствии переменных локальных источников возбуждения сейсмических колебаний состав и уровень микросейсмического шума остаются постоянными, а поляризация колебаний в микросейсмической волне вследствие сложения сейсмических колебаний разной природы и пришедших из разных азимутов на сейсмическую станцию не имеет

четко выраженной ориентации. При движении селевого потока по руслу из-за турбулентности потоков и соударений в горных породах возникают упругие колебания, которые регистрируются сейсмическими станциями и вызывают увеличение уровня и спектрального состава и поляризации микросейсмического шума. Эффективность разработанной системы предупреждения основана на разнице скоростей селевого потока (в среднем 5–10 м/с) и скорости распространения сейсмических волн (≈ 3.5 км/с). В зависимости от длины русла реки, ее морфологических особенностей и мест размещения оборудования, время подачи тревожного сигнала до прохода разрушительного селевого потока через населенный пункт, трассы автомагистралей и железных дорог может составлять до 30 минут. Следует отметить, что оборудование системы предупреждения не имеет прямого (механического) контакта с селевым потоком, это позволяет системе сохранять работоспособность при прохождении селевого потока.

В целом, полученные за 2020-2025 гг. результаты свидетельствуют об эффективности сети полигонов комплексного мониторинга для изучения предвестников опасных геологических процессов Байкальской природной территории.

1. Семинский К.Ж., Добрынина А.А., Борняков С.А., Саньков В.А., Поспеев А.В., Рассказов С.В., Перевалова Н.П., Семинский И.К., Лухнев А.В., Бобров А.А., Чебыкин Е.П., Едемский И.К., Ильясова А.М., Салко Д.В., Саньков А.В., Король С.А. Комплексный мониторинг опасных геологических процессов в Прибайкалье: организация пилотной сети и первые результаты // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13, № 5. 0677.
2. Сейсмоионосферные и сейсмoeлектромагнитные процессы в Байкальской рифтовой зоне / В.Р. Адвокатов и др.; отв. ред. Г.А. Жеребцов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 304 с.
3. Семинский К.Ж., Борняков С.А., Добрынина А.А., Радзиминович Н.А., Рассказов С.В., Саньков В.А., Миалле П., Бобров А.А., Ильясова А.М., Салко Д.В., Саньков А.В., Семинский А.К., Чебыкин Е.П., Шагун А.Н., Герман В.И., Тубанов Ц.А., Улзигбат М. Быстринское землетрясение в Южном Прибайкалье (21.09.2020г., $M_w=5.4$): основные параметры, признаки подготовки и сопровождающие эффекты // Геология и геофизика. 2021. Т. 5. С. 727-743.
4. Добрынина А. А., Саньков В. А., Борняков С. А., Король С. А., Саньков А. В. Аномалии микросейсмических шумов в связи с Кударинским землетрясением 9 декабря 2020 г. с $M_w = 5.6$ в Байкальской впадине // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 509, № 1. С. 74-80.
5. Борняков С.А., Добрынина А.А., Семинский К.Ж., Саньков В.А., Радзиминович Н.А., Салко Д.В., Шагун А.Н. Быстринское землетрясение в южном Прибайкалье (21.09.2020 г., $M_w = 5.4$): общая характеристика, основные параметры и деформационные признаки перехода очага в мета-нестабильное состояние // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 498, № 1. С. 84–88.
6. Добрынина А.А., Саньков В.А., Король С.А., Кичигина Н.В., Рыбченко А.А. Сейсмические эффекты паводков на р. Кынгарга (Тункинская долина, Восточный Саян) // Геология и геофизика, 2025. Т. 66, № 3. С. 395–411. DOI: 10.15372/GiG2024170.
7. Чечельницкий В.В., Макаров С.А., Добрынина А.А. Прохождение катастрофического водокаменного селя на реке Кынгарга (Республика Бурятия) 27–29 июня 2014 г. по сейсмическим данным // Доклады Академии наук. 2018. Т. 481, № 6. С. 675–679.

КОМПЛЕКСНЫЙ ЦИФРОВОЙ МОНИТОРИНГ АТМОСФЕРЫ БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ*

М.Ю. Шиховцев^{1,2}, Е.В. Моложникова¹, В.В. Цыдыпов³, Т.В. Ходжер¹, А.П. Федотов¹

¹ Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия

² Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН,
г. Иркутск, Россия

³ Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

Max97irk@yandex.ru

Атмосфера является важной составляющей природной среды и может оказывать существенное влияние на функционирование крупных наземных и водных экосистем, в частности озера Байкал [1, 2]. Помимо прямого влияния на течения и интенсивность вертикального перемешивания водных масс, атмосфера является источником поступления различных природных и антропогенных веществ как непосредственно на поверхность водоема, так и на его водосборный бассейн. В Центральной экологической зоне (ЦЭЗ) озера Байкал мониторинг качества воздуха с высоким временным разрешением (от 1 минуты) ведется на четырех стационарных пунктах в разных районах ЦЭЗ озера: Листвянка, Танхой, Давша, Боярский. Мониторинг в режиме реального времени позволяет получать непрерывные и точные данные о содержании малых газовых и аэрозольных примесей в атмосфере на большой территории, фиксировать кратковременные экстремумы выбросов, оперативно выявлять как антропогенные, так и природные источники загрязнения, включая лесные пожары и метеорологические аномалии [3]. Это позволяет изучать сезонные и пространственные особенности распределения загрязняющих веществ в приземной атмосфере БПТ, оценивать их влияние на экосистемы и здоровье населения.

Экспериментальные данные получены за период с мая 2024 по август 2025 гг. на станциях «Листвянка», и «Танхой». На стационаре «Боярский» измерения велись с мая по август 2024 и 2025 гг. Концентрации диоксида серы (SO₂) и оксидов азота (NO и NO₂) в атмосфере на станциях «Листвянка», «Танхой», «Боярский» использовались газоанализаторы С-310/СВ-310 и Р-105/Р-310 с пределом погрешности измерения в диапазоне от 0 до 2000 мкг/м³ ±25%. Для измерения концентраций озона (O₃) и оксидов углерода использовались газоанализаторы Ф-105 (O₃), К-100 (CO) и ОПТОГАЗ-500.4С (CO₂). Все газоанализаторы проходят ежегодную поверку в лаборатории фирмы-производителя ОПТЭК (г. Санкт-Петербург, Россия). Для определения концентрации аэрозольных частиц применялись счетчики частиц DUSTTRAK 8533 (TSI Incorporated, США) с точностью измерения 20 % и Wo-Master ES-104 (Тайвань). Предел обнаружения для всех приборов составляет 0,001 мг/м³. С сентября 2024 г. с помощью комплексной измерительной станции CityAir (г. Новосибирск, Россия) впервые начаты измерения концентраций малых газовых и аэрозольных примесей на северо-восточном побережье озера Байкал – ст. Давша. Расположение станций онлайн мониторинга атмосферы представлено на рис. 1.

На рис. 2 показано распределение концентраций SO₂ и NO₂ в течение исследуемого периода. Результаты измерений представлены в виде боксплотов. На

* Исследование выполнено в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

графиках отражена медиана распределения (жирная линия), первый квартиль (нижняя граница «ящика»), третий квартиль (верхняя граница «ящика»), и среднемесячная концентрация (красная точка). Станции «Листвянка» и «Танхой» были выбраны в качестве примеров из-за высокой эффективности мониторинга в течение исследуемого периода и наибольшего охвата анализируемых параметров.



Рис. 1. Карта-схема расположения станций автоматического онлайн мониторинга атмосферы на Байкальской природной территории а) станция «Листвянка», б, в) станция «Танхой», г) стационар «Боярский»; д) станция «Давша»

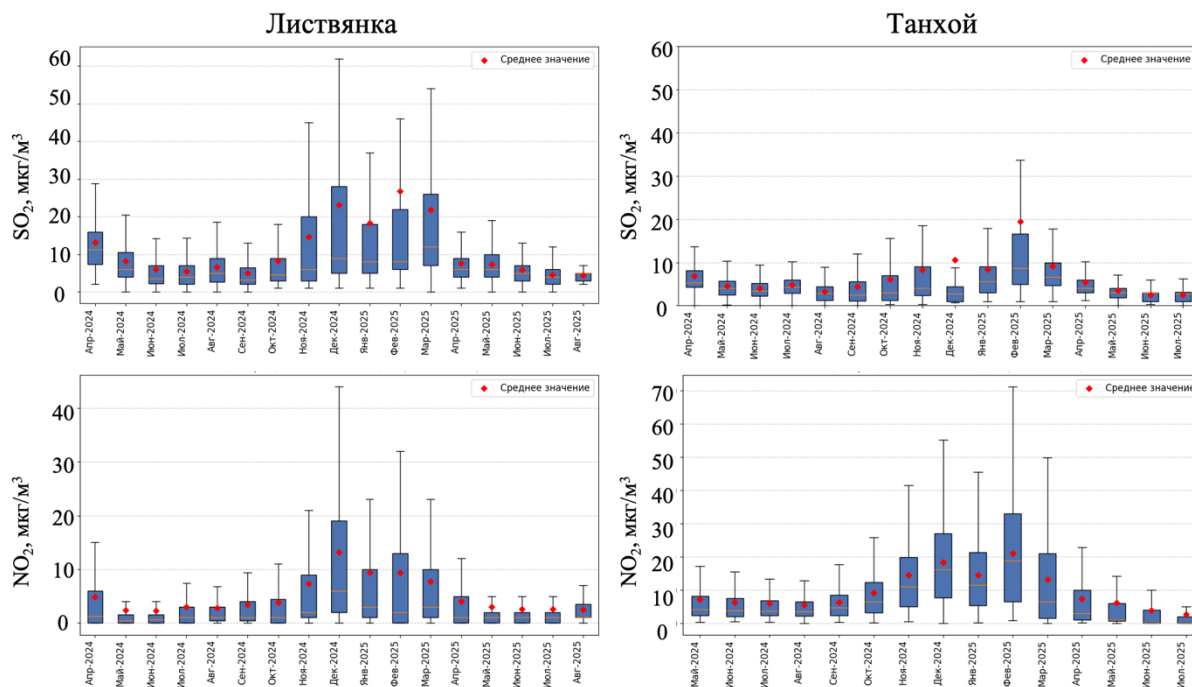


Рис. 2. Результаты автоматического мониторинга SO_2 и NO_2 в приземном слое атмосферы ЦЭЗ Южного Байкала апрель 2024 – июль 2025 гг.

Как видно из графика, среднемесячные концентрации SO_2 изменялись в пределах от 4,6 мкг/м³ (июль 2025 г.) до 26,6 мкг/м³ (февраль 2025 г.) на ст. «Листвянка», и от 2,5 мкг/м³ (июль 2025 г.) до 19,9 мкг/м³ (февраль 2025 г.) на ст. «Танхой». Наибольшие 20-

минутные концентрации составили $530,1 \text{ мкг/м}^3$, и были зафиксированы на ст. «Листвянка», что объясняется близостью крупных ТЭЦ Иркутской конгломерации и высокими скоростями ветра (4-5 м/с) северо-западного направления (рис. 3) и наличием над станцией температурной инверсии (рис. 4). За период исследования среднемесячные концентрации NO_2 на ст. «Танхой» варьировали в пределах от $2,5 \text{ мкг/м}^3$ (июль 2025 г.) до $21,9 \text{ мкг/м}^3$ (февраль 2025 г.), и в диапазоне от $2,2 \text{ мкг/м}^3$ (июнь 2024 г.) до $13,3 \text{ мкг/м}^3$ (декабрь 2024 г.) – на ст. «Листвянка». Из анализа данных видно, что средний уровень по станциям «Листвянка» и «Танхой» совпадает между собой и сопоставимы с ранее полученными данными [4].

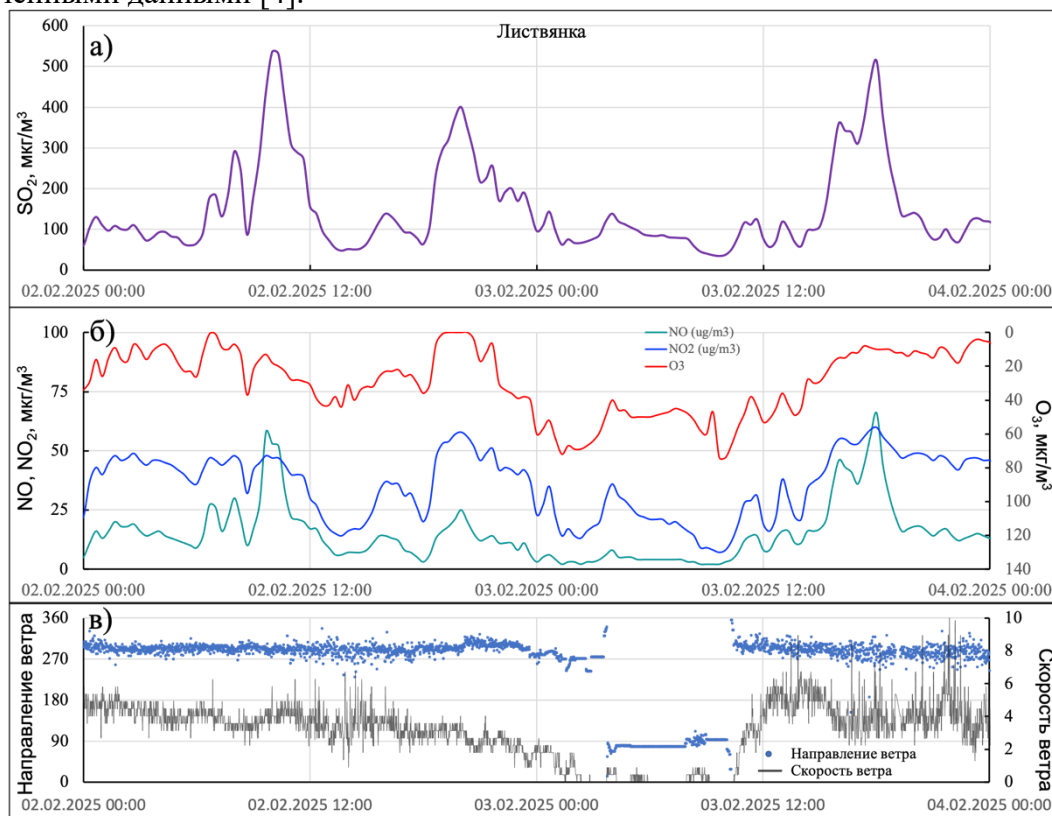


Рис. 3. Временная изменчивость 20-минутных концентраций: (а) SO_2 ; (б) NO , NO_2 , O_3 ; и (в) скорости и направления ветра на ст. «Листвянка» 02.02.2025 – 03.02.2025 гг.

На рис. 3 продемонстрирована временная изменчивость 20-минутных концентраций диоксида серы (а), оксидов азота и озона (б), а также скорости и направления ветра (в) за период 2-3 февраля 2025 г. По данным наблюдений, наибольшие концентрации SO_2 регистрировались в утренние и вечерние часы. Утренний пик SO_2 (с 8 до 10 часов) связан с поступлением на станцию выбросов от крупных объектов теплоэнергетики Иркутской области, сопровождающимся развитием температурной инверсии с потенциалом 1-2 °C и высотой до 300 метров (Рис. 4 а). Наличие температурной инверсии препятствовало вертикальному перемешиванию атмосферы и способствовало накоплению загрязнений в приземном слое. Разрушение температурной инверсии (после 12:00) привело к снижению концентраций SO_2 до 50-100 мкг/м^3 , однако данные значения многократно превышали региональный фон в зимнее время года. Во второй половине суток (20:00-22:00) формировалась новая температурная инверсия высотой 150 м с потенциалом около 1,5 °C. Это привело к повторному подъёму концентраций SO_2 до 400 мкг/м^3 . Аналогичная изменчивость наблюдалась у оксидов азота (Рис. 3 б), что свидетельствует о едином источнике поступления примесей. При этом, в моменты экстремального повышения концентраций NO_x и SO_2 отмечалось

снижение содержания озона, что объясняется активным потреблением O_3 в реакциях окисления NO и NO_2 . Учитывая стабильное направление ветра с северо-запада в течение суток (Рис. 3 в), можно сделать вывод, что температурные инверсии играют ключевую роль в накоплении и удержании загрязняющих примесей в нижних слоях атмосферы на ст. «Листвянка», ограничивая их рассеивание. Такие закономерности соответствуют международным наблюдениям в стратифицированных атмосферных условиях, где инверсии способствуют эффективности локального накопления загрязнений [5].

Таким образом, комплексный анализ временной и вертикальной структуры атмосферы на станции «Листвянка» раскрывает механизмы накопления, трансформации и рассеивания загрязняющих веществ, что важно для интерпретации мониторинговых данных и разработки мероприятий по охране уникальной экологической системы озера Байкал.

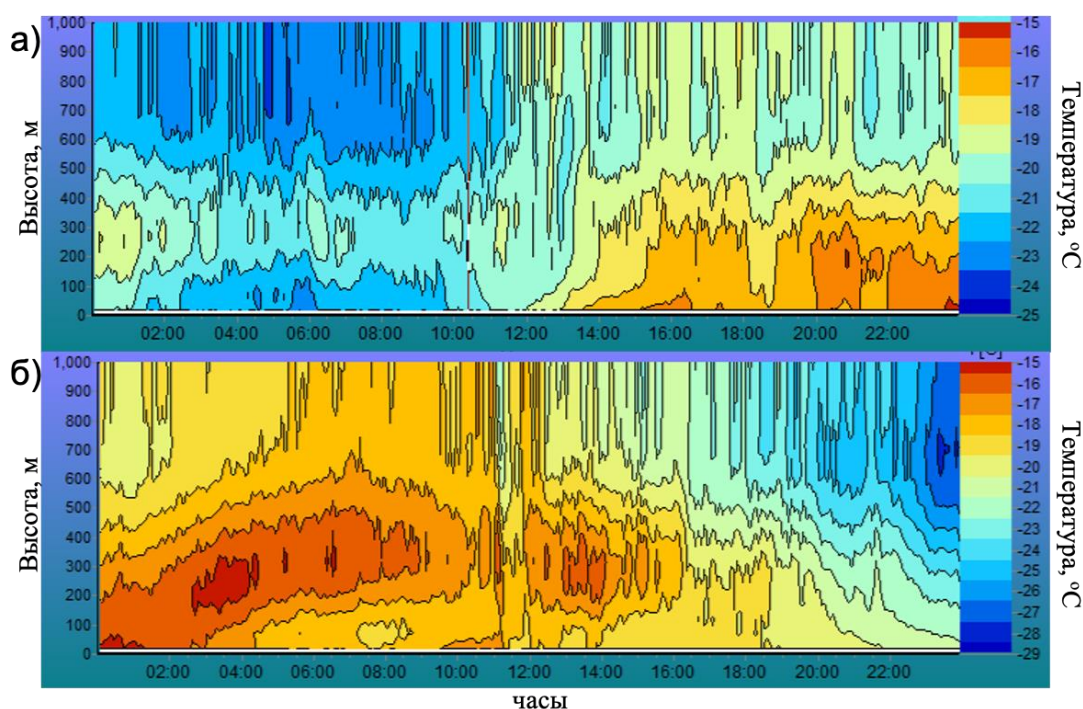


Рис. 4. Вертикальное распределение температуры на ст. «Листвянка» по данным температурного профилометра МТП-5: (а) 02.02.2025; (б) 03.02.2025 гг.

1. Molozhnikova Y. et al. Determination of the Main Factors Influencing the Chemical Composition of Atmospheric Deposition in the Territory of the Southern Baikal Region (Eastern Siberia, Russia) // Sustainability. 2025. Vol. 17, № 13. P. 6062.
2. Malnik V. V. et al. Coastal Water Quality in Lake Baikal in Bol'shie Koty Bay, Determined by the Effect of Atmospheric Precipitation and the Survival of Indicator Microorganisms // Water Resources. 2024. Vol. 51, № 3. P. 267–283.
3. Shikhovtsev M. Y. et al. Features of Temporal Variability of the Concentrations of Gaseous Trace Pollutants in the Air of the Urban and Rural Areas in the Southern Baikal Region (East Siberia, Russia) // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, № 18. P. 8327.
4. Shikhovtsev M.Y., Molozhnikova Y.V., Obolkin V.A., Potemkin V.L., Lutskin E.S., Khodzher T.V. Features of Temporal Variability of the Concentrations of Gaseous Trace Pollutants in the Air of the Urban and Rural Areas in the Southern Baikal Region (East Siberia, Russia) // Applied sciences. 2024. Vol. 14, № 18. P. 1-19. DOI: 10.3390/app14188327.
5. Лазарева Е. О., Попова Е. С., Липовицкая И. Н. Влияние температурных инверсий на концентрацию примесей в приземном слое воздуха над Санкт-Петербургом в 2006-2014 гг. // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2015. № 41. С. 149–155.

МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ – ОСНОВА МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ*

Н.Н. Воропай^{1,2}, О.В. Василенко¹

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
г. Томск, Россия

²Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск, Россия
voropay_nn@mail.ru

Климат является одним из основных ландшафтно-образующих факторов. Без знания закономерностей его формирования, оценок тенденций изменения, расчета проекций на будущее невозможно понять, что ожидает природу и общество в ближайшие десятилетия. Глобальные оценки климатических изменений представлены в Оценочных докладах Всемирной метеорологической организации и Росгидромета. Информационной базой исследований являются данные метеорологических станций, ДДЗ и различных реанализов. В глобальном (а в некоторых случаях, региональном) масштабе дополнительная детализация не требуется. Но, если речь идет о мезомасштабных процессах (не говоря уже о характеристике локальных ландшафтов), нельзя пренебрегать мезо- и микроклиматической изменчивостью параметров. Многие годы на Байкальской природной территории работают разнопрофильные специалисты из различных образовательных и научно-исследовательских организаций. Объектом изучения при этом являются растительность, почвы, геоморфологические и гидрологические объекты, животный мир и др. Кроме работ в направлениях Биологических наук и наук о Земле активное участие в изучении природных процессов на БПТ принимают специалисты, работающие в направлении моделирования (в том числе климата) и IT-технологий. Ландшафтное разнообразие БПТ предполагает комплексную оценку всех природных составляющих. То есть необходима и климатическая характеристика территории с учетом высотной поясности, расстояния до Байкала, характеристик рельефа. Наблюдательная сеть Росгидромета не может обеспечить исследователей необходимой метеорологической информацией в полном объеме, т. к. в пределах БПТ метеостанции расположены в основном на побережье Байкала, и результаты их наблюдения не могут охарактеризовать климат в горных районах. Еще одна проблема, связанная с официальными метеорологическими данными по БПТ заключается в их полном отсутствии на сайте Росгидромета. Метеоинформация, представленная на альтернативных сайтах (rp5, pogodaiclimat.ru, Yandex и др.) имеет пропуски ошибки, которые не всегда удастся отследить. Данные реанализов и большинства моделей также иногда некорректны. Они не учитывают ряд процессов, характерных для горных районов, в частности, температурные инверсии, которые могут наблюдаться непрерывно в течение нескольких суток (наиболее часто в зимнее время). В результате, ошибка при моделировании может превышать 10°C.

Для детального анализа влияния климатических факторов на ландшафтные характеристики центральной части западного побережья и горного обрамления оз. Байкал в рамках временного творческого коллектива, в состав которого входили сотрудники ИМКЭС СО РАН, ИГ СО РАН, ИГУ, в 2013 г. были организованы

* Исследование выполнено в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

микроклиматические наблюдения. Модельным полигоном является профиль в районе п. Сарма. Площадки микроклиматического мониторинга расположены в диапазоне высот 450-1650 м над ур. м. Для измерения температуры и влажности воздуха, температуры поверхности почвы и температуры почвы на глубине 40 см использовались электронные термографы (DS1922) и гигрографы (DS1923), периодичность составляла 3 часа, синхронно с наблюдениями на метеорологических станциях Росгидромета. В 2019 г. термографы и термогигрографы были заменены на оборудование фирмы Elitech (RC-4 и RC-51), периодичность измерений изменена на 1 час. Данные микроклиматических наблюдений дают возможность детально изучить температурно-влажностный режим ландшафтов с учетом высотной поясности, экспозиции и крутизны склонов в течение года. Микроклиматические особенности территории учитываются при анализе изменений других ландшафтных характеристик, в первую очередь, растительности [1, 2, 3, 4 и др.]. Кроме того, результаты круглогодичного мониторинга на территории Байкальского региона используются для параметризации и верификации климатических моделей [5].

В ИМКЭС СО РАН разработана и изготавливается система автономного мониторинга состояния окружающей среды АПИК (Атмосферно-почвенный измерительный комплекс), предназначенная для мобильных и стационарных долговременных автоматических измерений параметров атмосферы, почвы и водоемов [6]. Отличие от уже имеющихся измерительных систем заключается в сочетании низкого энергопотребления, широкого набора подключаемых датчиков, необслуживаемого режима работы, работоспособности в широком диапазоне условий эксплуатации.

Анализ имеющегося картографического материала позволил составить схему размещения автоматических метеорологических станций на территории западного побережья оз. Байкал. От подножия Приморского хребта к берегу Байкала простирается Приольхонское плато, где преобладают сухие лиственничные и сосново-лиственничные леса, а также аридные горные степи с редкими и эндемичными видами растений. Горно-таежный пояс макросклона хребта пройден низовыми гарями разного возраста. В рамках проекта «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории». АПИК базовой комплектации с онлайн передачей данных установлены недалеко от побережья на охраняемой территории в п. Хужир, п. Узуры, п. Култук, на базе Хадарта, в бухте Куяда, п. Большое Голоустное. Кроме того организованы два профиля наблюдательных площадок антивандальной комплектации с логгерами, информация с которых считывается 1-2 раза в год.

Предложенная концепция сети микроклиматического мониторинга позволяет получать достоверные метеорологические данные в сложных орографических условиях БПТ, т.е. в районах, не охваченных наблюдательной сетью Росгидромета. Эта информация является одним из основных факторов при оценке экологических рисков.

1. Bilichenko I.N, Voropay N.N. Landscape and Climate Studies of Mountain Areas of the Baikal Natural Territory // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 211. 012046. doi:10.1088/1755-1315/211/1/012046.
2. Golubtsov V.A., Vanteeva Yu.V., Voropai N.N., Vasilenko O.V., Cherkashina A.A., and Zazovskaya E.P. Stable Carbon Isotopic Composition ($\delta^{13}\text{C}$) as a Proxy of Organic Matter Dynamics in Soils on the Western Shore of Lake Baikal // Eurasian Soil Science. 2022. Vol. 55, № 12. P. 1700–1713. DOI: 10.1134/S1064229322700041.
3. Bessolitsyna E.P., Balyazin I.V., Voropai N.N. Structure and diversity of soil zoocenoses in the Tunka depression // Geography and Natural Resources. 2018. Vol. 39, № 4. P. 358–364. DOI: 10.1134/S1875372818040091.

4. Voropay N.N., Atutova Zh.V., and Shuklina E.S. Long-Term Soil Temperature Dynamics in Pyrogenically Transformed Geosystems of the Tunka Depression (Southwestern Baikal) // *Geography and Natural Resources*. 2022. Vol. 43, № 2. P. 163–174. DOI: 10.1134/S1875372822020123.
5. Drozdov E.D., Stepanenko V.M., Voropay N.N., Dyukarev E.A., Kokoreva A.A., Cherkashina A.A., Bogomolov V.Yu. Parametrization of soil thermal conductivity in the INM RAS-MSU land surface model // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 611. DOI:10.1088/1755-1315/611/1/012022.
6. Kiselev M V, Voropay N N, Dyukarev E A, Kurakov S A, Kurakova P S, Makeev E A Automatic meteorological measuring systems for microclimate monitoring // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2018. Vol. 190. 012031. DOI :10.1088/1755-1315/190/1/012031.

МОДЕЛЬ ГАУССОВА ПРОЦЕССА В СВЕРХКРАТКОСРОЧНОМ АНСАМБЛЕВОМ ПРОГНОЗЕ ПРИЗЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА*

Е.А. Дюкарев^{1,2}

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
г. Томск, Россия

² Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск, Россия
dekot@mail.ru

Точный прогноз погоды критически важен для обоснованных решений и лежит в основе систем раннего предупреждения, необходимых для смягчения последствий экстремальных явлений. Существующие системы прогноза в основном используют модели численного прогноза погоды [1], основанные на математических уравнениях, описывающих физические процессы в атмосфере. Однако этим моделям присущи серьезные ограничения: неполное понимание физических механизмов на разных временных и пространственных масштабах, сложности анализа больших объемов наблюдательных данных и высокие вычислительные затраты.

Методы машинного обучения становятся перспективной альтернативой прогноза погоды [2, 3], благодаря способности обрабатывать сложные данные, выявлять скрытые закономерности и строить точные и вероятностные прогнозы.

В настоящей работе представлен метод сверхкраткосрочного прогноза приземной температуры воздуха с использованием ансамбля моделей. Исходными данными для работы послужили результаты метеорологических наблюдений, полученные с помощью атмосферно-почвенного измерительного комплекса, действующего на побережье Байкала в бухте Хадарта с 2021 г. [4]. Шаг наблюдений по времени составлял один час. Для построения прогноза была выбрана регрессионная модель Гауссова процесса с экспоненциальным ядром, ранее хорошо зарекомендовавшая себя в воспроизведении временной динамики метеорологических параметров [5]. В качестве предикторов в моделях участвовали температура (TA) и влажность воздуха (RH), интенсивность приходящей солнечной радиации (ISR), атмосферное давление (PA), скорость (WS) и направление ветра (WD), время наблюдения в часах (T). Направление ветра и время наблюдения были преобразованы с применением синусоидальной функции для сохранения непрерывности изменения. В качестве прогнозируемой переменной был выбран ряд температуры приземного воздуха, смещенный на 6 часов (глубину прогноза) на более ранний срок относительно ряда предикторов.

Было создано три ансамбля прогнозов температуры воздуха для июля 2024 г. В каждом из ансамблей варьировали набор предикторов, размер обучающей выборки (от 2 до 120 дней), и ширину окна запаздывания (от 0 до 36 часов). При не нулевом окне запаздывания в качестве дополнительных предикторов к модели добавлялись те же метеорологические параметры, но со смещением на заданную ширину. Первый ансамбль моделей прогнозировал ряд температуры воздуха, а остальные два ансамбля независимо прогнозировали низкочастотную и высокочастотную составляющие этого ряда. Низкочастотная составляющая получена сглаживанием исходного ряда скользящим средним окном шириной 48 часов. Высокочастотная – представлена разностью

* Исследование выполнено в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

низкочастотной составляющей и исходного ряда. Каждая модель обучалась на заданной выборке предикторов, а затем выполнялся прогноз функции на 12 часов вперед. Последние 6 часов прогноза использовались для независимого тестирования модели.

Получено, что в пределах заданных диапазонов изменений практически все модели показывают приемлемую точность прогноза. Средний модуль ошибки варьирует от 1.46 до 2.90°C для ансамбля моделей прогноза температуры воздуха, от 1.40 до 3.25°C для высокочастотной составляющей температуры (рис.1) и от 0.28 до 0.39 °C для низкочастотной. Наименьшая ошибка закономерно получена для прогноза низкочастотной компоненты температуры воздуха. Для этой переменной в модель, показавшую наилучшие результаты среди членов ансамбля, в качестве предикторов вошли медленно меняющиеся переменные (РА и низкочастотные компоненты ISR, TA, RH), шаг запаздывания был равен нулю, а размер обучающей выборки составил 16 дней. В наилучшую модель для высокочастотной компоненты температуры были отобраны высокочастотная компонента солнечной радиации и низкочастотная компонента температуры воздуха, ширина окна запаздывания была 24 часа, а размер обучающей выборки – 14 дней.

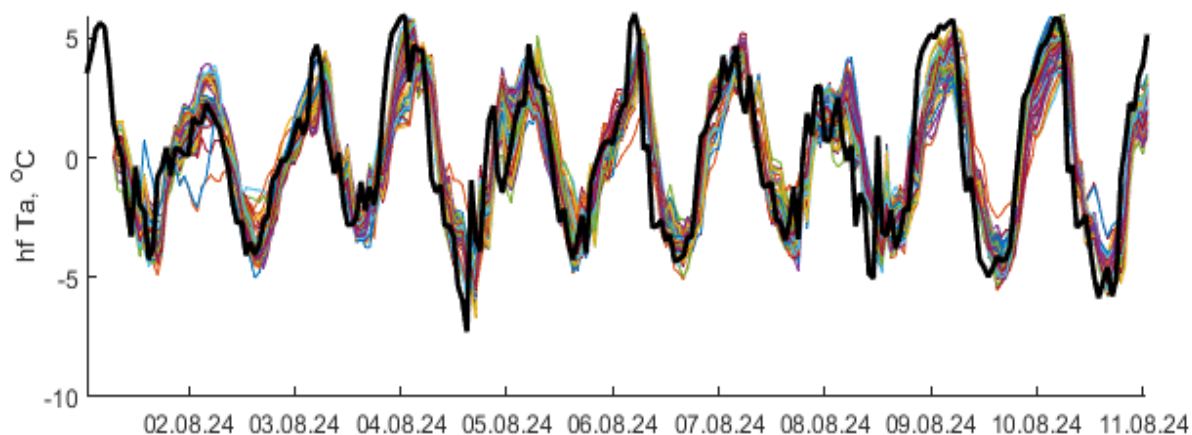


Рис. 1. Временной ход высокочастотной составляющей температуры воздуха (жирная линия) и ее прогнозных оценок с заблаговременностью 6 ч. Ансамбль из 98 моделей (тонкие линии)

Краткосрочный прогноз температуры воздуха без разложения на составляющие потребовал построения модели большей сложности и значительного времени для оптимизации ее параметров. В наилучшую модель для температуры были включены пять основных предикторов (РА, ISR, TA, RH, WS), окно запаздывания – 10 часов, размер обучающей выборки – 60 дней.

В дальнейшем предполагается ограничить число членов ансамбля для каждой модели, сохранив только наиболее удачные варианты. Будет продолжено тестирование моделей для других временных интервалов и метеорологических параметров, а также использование многослойных нейронных сетей для прогнозирования целевой переменной.

1. Bauer P., Thorpe A. & Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction // Nature. 2015. Vol. 525. P. 47–55. <https://doi.org/10.1038/nature14956>
2. Price, I., Sanchez-Gonzalez, A., Alet, F. et al. Probabilistic weather forecasting with machine learning // Nature. 2025. Vol. 637. P. 84–90. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08252-9>
3. Zhang H.; Liu Y.; Zhang C.; Li N. Machine Learning Methods for Weather Forecasting: A Survey // Atmosphere. 2025. Vol. 16. № 82. <https://doi.org/10.3390/atmos16010082>

4. Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории / под ред. И.В. Бычкова, Д.П. Гладкочуба, Г.М. Ружникова. Минобрнауки России, Сиб. Отд-ние РАН, Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2022. С.91-138. DOI: 10.53954/9785604788943
5. Dyukarev E. Comparison of artificial neural network and regression models for filling temporal gaps of meteorological variables time series // Applied Sciences J. 2023. Vol. 13. 2646. <https://doi.org/10.3390/app13042646>

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРИЗЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ФОРМЕ КВАЗИГАРМОНИЧЕСКОГО КОЛЕБАНИЯ*

Ю.В. Волков

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,

г. Томск, Россия

yvvolkov@mail.ru

Информация о современной среде обитания, экологическое состояние которой характеризуется состоянием отдельных компонентов геосистемы Земли, востребована для эффективного социально-экономического планирования. В последние десятилетия особое значение уделяется глобальным климатическим изменениям, сопровождающимся трансформацией полей отдельных характеристик климата, что может стать причиной изменения существующих биоклиматических и сельскохозяйственных зон [1]. Актуальная задача климатического районирования расширяется до необходимости получения классификаций климата в оперативном режиме на основе постоянного объективного анализа изменений. Для решения этой задачи требуется разработка новых подходов динамической классификации климатов.

В работах авторов развивающих классификации климатов по оценкам измеренных климатических параметров [2-4] используются методы, пригодные для организации оперативного мониторинга климатического районирования. Исследование климата реализуется на основе анализа статистических характеристик его элементов. Наиболее часто для разработки численных алгоритмов используют параметры температурных сигналов, полученных на метеостанциях.

В настоящей работе представлено математическое описание и численный метод пригодные для исследования изменчивости приземной температуры Земли. Предложенная математическая модель температурного колебания в форме квазигармонического колебания (1) используется для того, чтобы основываясь на свойствах выходящих в нее характеристик можно было описать, например, в виде функции, локальные особенности климата присущего отдельным географическим районам. А также определить границы климатических классов имеющих схожую изменчивость климатических характеристик и обладающих устойчивостью на протяжении определенных временных периодов.

$$T_0(\tau) = \left(a_0 + \sum_{f=1}^F K_f^A a_f(\tau) \right) \cos \left(2\pi \nu_n \tau + \varphi_0 + \sum_{f=1}^F I_f^\Phi \varphi_f(\tau) \right), \quad (1)$$

где, τ – время, f – порядковый номер гармоники, $f = 1, 2 \dots F$, F – количество модулирующих гармоник, $a(\tau)$ – функция модулирующая амплитуду, a_0 – амплитуда несущего колебания, $\varphi(\tau)$ – функция модулирующая фазу, φ_0 – начальная фаза, ν_n – частота несущего колебания, определяемая циклом вращения Земли, I^Φ – индекс фазовой модуляции, K_f^A – коэффициент пропорциональности, отражает глубину амплитудной модуляции, $I^\Phi = K^A / a_0$ – индекс амплитудной модуляции, определяет максимальное отклонение фазы,

* Исследование выполнено в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

Целевой искомой функцией может быть любая функция, описывающая любые изменения исследуемой характеристики на заданном интервале времени. Экспериментально установлена зависимость глубины модуляции, как амплитуды, так и фазы от географической широты местности L . На рисунках представлена зависимость от широты местности L значений СКО амплитуды $a(\tau)$ (рисунок 1, а) и фазы $\varphi(\tau)$ (рисунок 1, б) вычисленных для колебаний температуры, измеренных на метеостанциях, расположенных на БПТ.

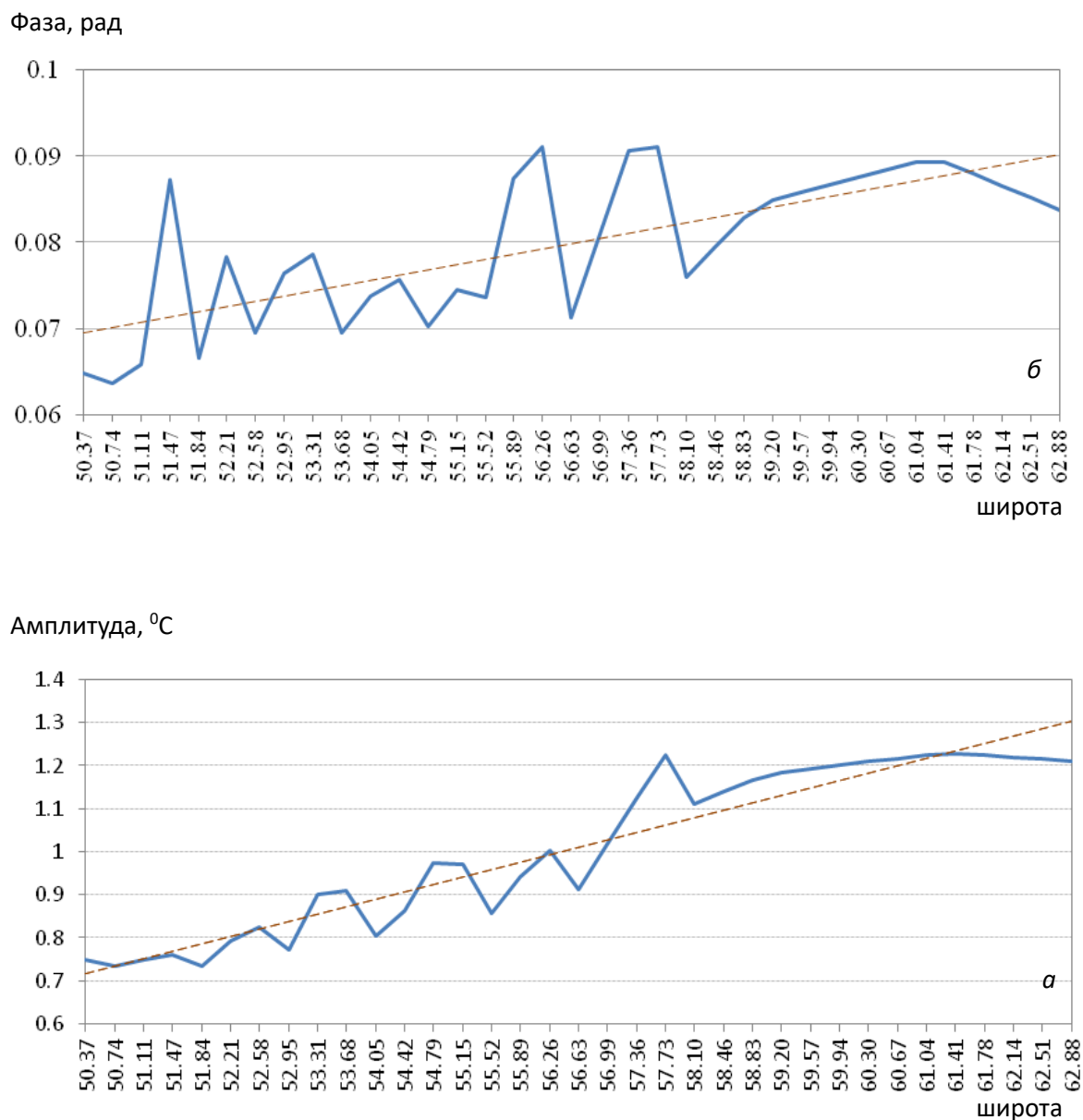


Рис. 1. Значения СКО в зависимости от широты местности: а – фазы, б – амплитуды температурных колебаний, измеренных на метеостанциях БПТ (жирная линия – СКО, пунктирная линия – линия линейно регрессионной модели тренда)

Предложенный подход на основе исследования свойств математической модели в форме квазигармонического колебания для оценки изменений приземной температуры позволяет исследовать устойчивость климатических классов в разные

временные периоды. В дальнейшем будет продолжено исследование свойств модели для других временных интервалов и метеорологических параметров.

1. IPCC, 2013: Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535 p.
2. Салугашвили Р.С. Колебание климата на территории перового естественного синоптического района и климатическое районирование // Ученые записки Казанского университета. 2012. № 154. С. 216–227.
3. Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории / под ред. И.В. Бычкова, Д.П. Гладкочуба, Г.М. Ружникова; Минобрнауки России, Сиб. Отд-ние РАН, Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2022. С.91-138. DOI: 10.53954/9785604788943
4. Volkov, Yu. V. Analysis of temperature signals and their clusterization. // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2019. Vol. 55, № 3. P. 243–248. DOI: 10.3103/S8756699019030051.

АЛГОРИТМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ РЕГИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА*

А.В. Пененко¹, В.Ф. Рапута¹, Н.А. Каргаполова¹, А.А. Леженин¹, Э.А. Пьянова¹,
А.В. Гочаков¹, П.Н. Антохин², Е.В. Русин¹, Р.А. Кузьминых¹, М.А. Аментьева¹,
О.А. Сеницина^{1,3}, М.К. Емельянов^{1,3}, В.В. Пененко¹

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Россия

²Институт оптики атмосферы имени В. Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

³Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия
aleks@ommgp.sgcc.ru

Работа в рамках проекта ведется по следующим основным направлениям: разработка и исследование алгоритмов усвоения данных мониторинга качества воздуха в применении к региональным сценариям; численное исследование состояния загрязнения атмосферы городов БПТ и распространения дымовых выбросов от крупных ТЭЦ; разработка и верификации стохастического «генератора погоды», позволяющего моделировать неоднородное и нестационарное пространственно-временное поле комплекса метеорологических параметров, необходимых для вычисления ряда биоклиматических индексов.

Алгоритмы усвоения данных широко используются для оперативного и квазиоперативного контроля качества воздуха. В современной версии алгоритмов мы рассматриваем задачу усвоения данных для нестационарных моделей в более общей формулировке: как последовательность связанных обратных задач восстановления пространственно-временной структуры функций состояния с учетом различных наборов данных измерений, поступающих в процессе моделирования. Ключевой особенностью этого класса задач является совпадение модельного времени и времени сбора данных. Усвоение данных осуществляется с помощью идентификации некоторой внутренней искомой функции модели, которую мы называем функцией неопределенности. Для решения обратных задач могут использоваться любые подходящие методы.

В качестве основы для алгоритмов усвоения данных измерений используется подход на основе операторов чувствительности и ансамблей решений сопряженных уравнений [1]. Подход выбран в силу того, что он допускает контроль над размерностью решаемых задач, позволяет организовать эффективное распараллеливание и работу с разнородными данными [2, 3], а также в ходе работы алгоритмов генерируются агрегаты, которые можно использовать для уточнения результатов решения методами машинного обучения [4].

На рис. 1 представлен сценарий обратного моделирования с данными контактных измерений подвижным измерительным комплексом (кораблем), соответствующими корабельной экспедиции ЛИИ СО РАН 2019 годах [5]. Сценарий соответствует 234-часовому временному интервалу, начинающемуся 2019.07.23 12:00. Для проверки алгоритма предполагается, что источники выбросов являются постоянными и

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научного-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

выбрасывают NO и измерения проводятся для NO. Для восстановления используется 128 агрегата из 184 точечных измерений. Расчеты выполнялись на пространственной сетке с $N_x = 36$, $N_y = 38$, $N_z = 17$ точек. По времени задано $N_t = 781$ точек, шаг по времени – 1080 сек.

На рис. 1 б) представлены результаты идентификации источников и абсолютная ошибка восстановления функции состояния в зависимости от модельного времени. Можно отметить, что в данном случае удастся определить группу источников, находящиеся к востоку от озера.

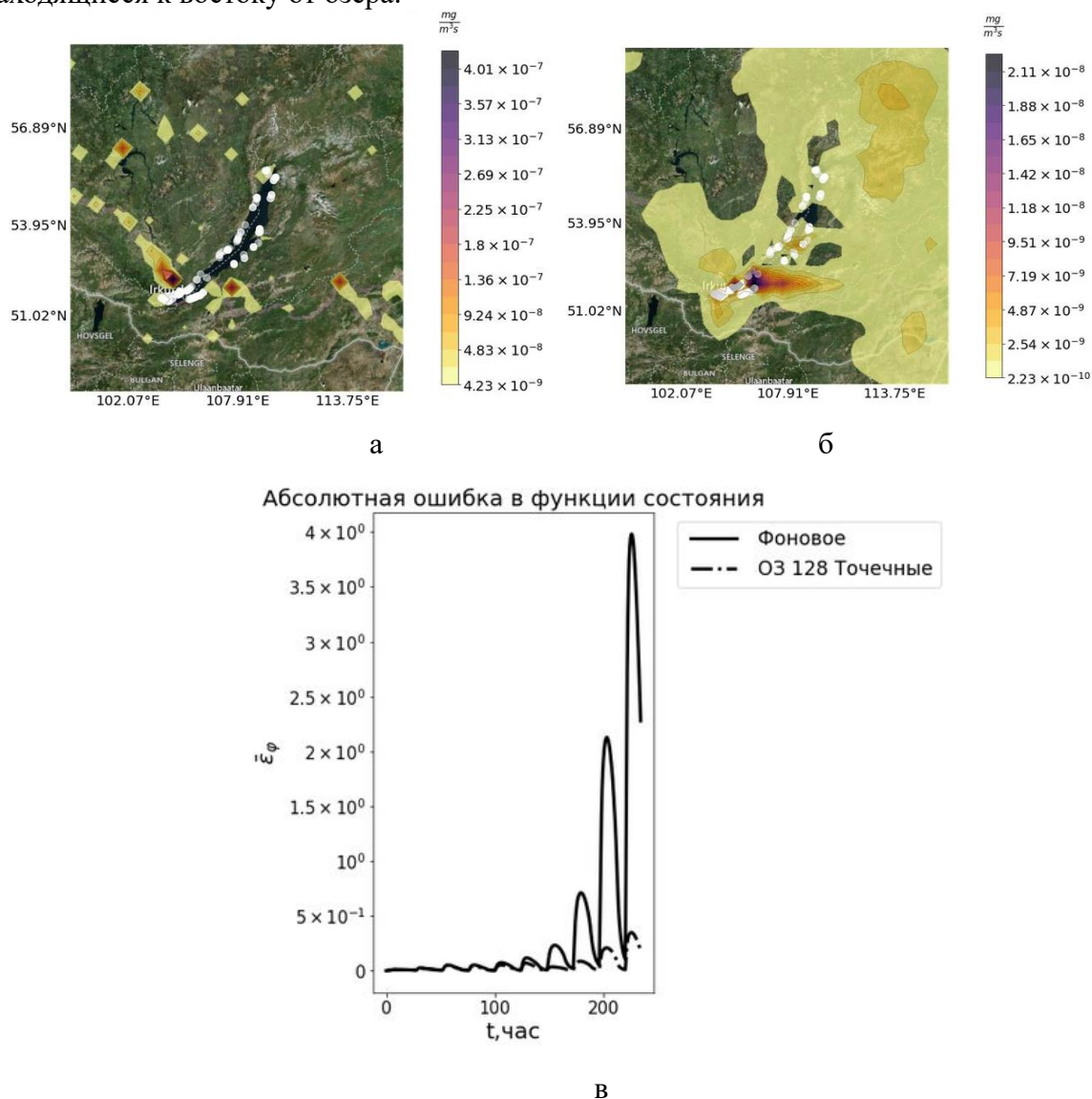


Рис.1. Сценарии для проверки алгоритма идентификации источников по данным контактных измерений: подвижные измерения одним измерительным комплексом в разные моменты времени, соответствующие корабельной экспедиции ЛИН СО РАН 2019 г. (а). Белыми кругами отмечены точки проведения измерений. Для синтетических данных измерений, соответствующих источникам на (а) получены результаты идентификации источников (б) и абсолютная ошибка восстановления функции состояния в зависимости от модельного времени относительно результата без усвоения (Фоновое) (в)

На рис. 2 представлен результат интерпретации реальных данных измерений в режиме усвоения данных. В этом случае источник предполагается кусочно-постоянным

по времени в 8-часовых окнах усвоения. В этом случае также можно заметить, что источники локализуются алгоритмом в окрестностях точек измерений, однако из-за кусочно-постоянного характера искомого источника, воспроизведение данных измерений оказывается существенно лучше. Таким образом, можно заключить, что разработанные алгоритмы позволяют интерпретировать данные изменений в виде постоянных и кусочно-постоянных по времени источников, которые далее можно использовать для вычисления полей концентрации загрязняющих примесей.

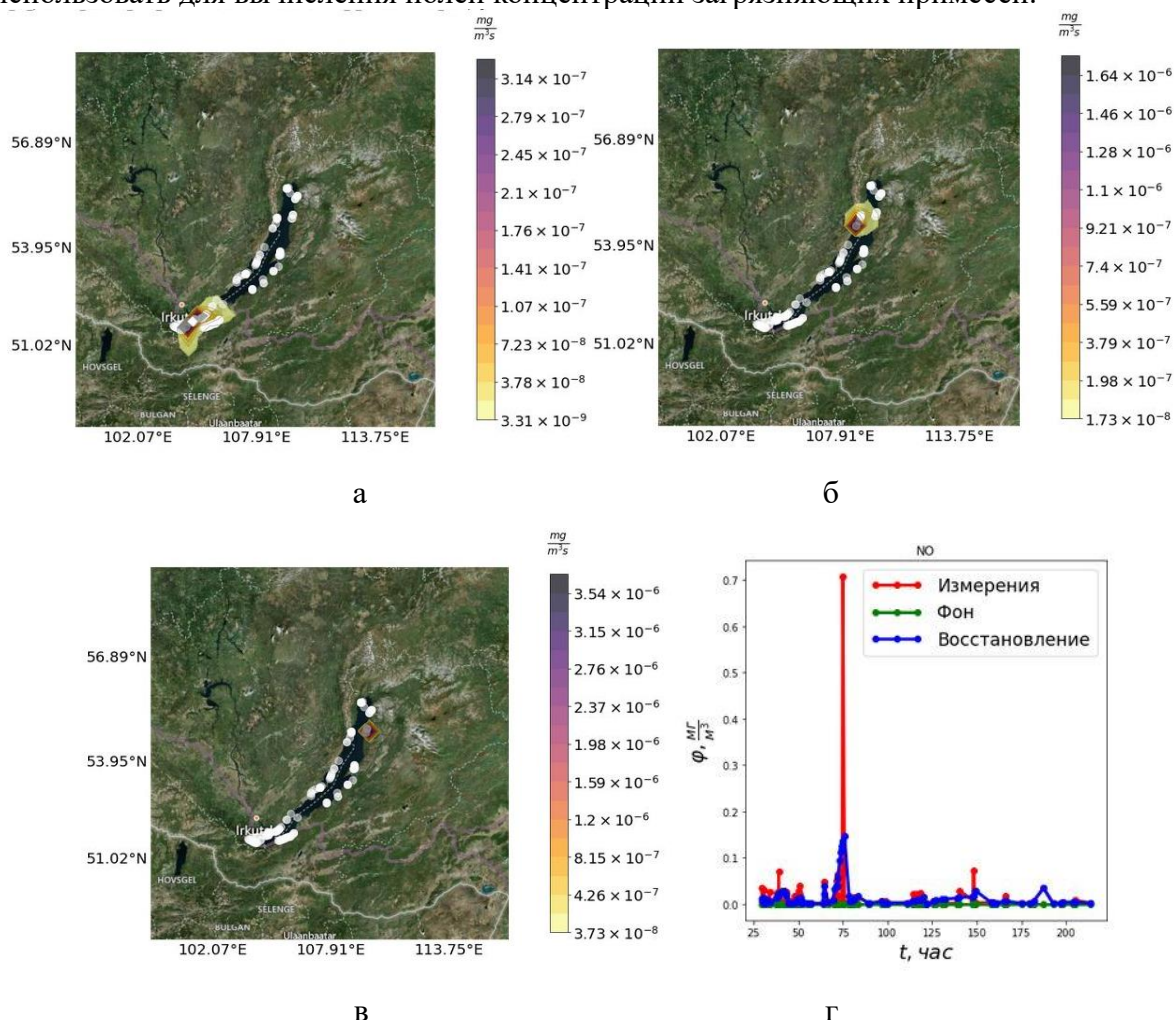


Рис.2. Результат интерпретации реальных данных измерений корабельной экспедиции в терминах источников выбросов в режиме усвоения данных с 8-часовым окном усвоения после 45 часов с начала эксперимента (а), 97.5 часов (б), 150 часов (в) и сравнение данных измерений с модельными значениями (г)

В рамках второго направления разработаны методы оценивания траекторий и скоростей подъема дымовых выбросов от труб тепловых станций с использованием спутниковой информации. Описание процессов их распространения основывается на соотношениях подобия и размерностей, гидродинамическом моделировании атмосферной циркуляции. Апробация предлагаемого подхода проведена с использованием зимнего спутникового снимка дымовых шлейфов и их теней на земной поверхности применительно к высотным трубам Гусиноозерской ГРЭС. Поля ветра и температуры атмосферного воздуха рассчитывались с помощью мезомасштабной модели WRF, адаптированной к Байкальской природной территории.

Подъём дымовых смесей от труб ГРЭС за счёт их перегрева и динамического импульса может достигать значительных высот. Активная стадия подъёма дымового шлейфа и его пассивный перенос в атмосфере особенно чётко фиксируются на зимних спутниковых снимках. В этот период времени существенно повышается интенсивность выбросов, тени дымовых шлейфов более контрастно визуализируются на заснеженной поверхности земли. Критериями выбора подходящих снимков являются малооблачная погода, наличие значимого угла между направлением ветра и азимутом солнца, достаточная протяжённость теней шлейфов. Результаты проведённых исследований позволяют в оперативном режиме определять характеристики активной стадии подъёма дымовых шлейфов, осуществлять внешний контроль режимов выбросов примесей от труб промышленных предприятий.

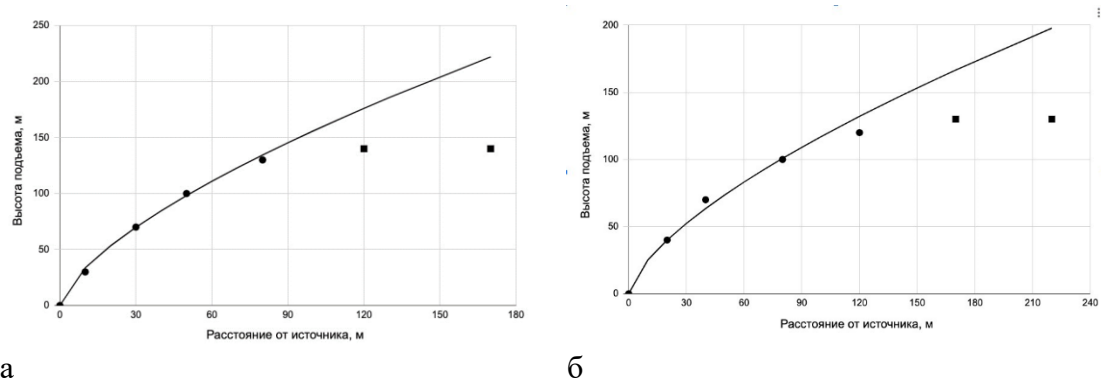


Рис. 3. Численно восстановленные траектории дымовых шлейфов от 330 метровой (а) и 190 метровой (б) труб Гусинозёрской ГРЭС. Тёмные кружки - выбранные на осях шлейфов точки, линии – модельные расчеты

В рамках третьего направления разработаны, численно реализованы и верифицированы (рис.4) стохастические модели пространственно-временных полей различных биоклиматических индексов на основе разработанных в 2024 г. «генераторов погоды».

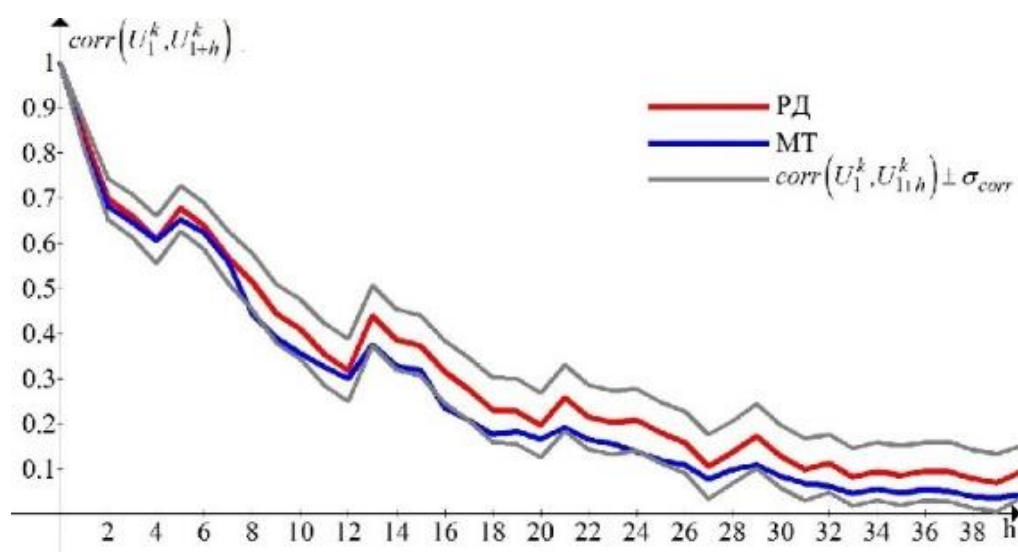


Рис.4. Оценки коэффициентов корреляции универсального индекса теплового комфорта (UTCI). Иркутск, 3-12 января. РД – реальные данные, МТ – модельные траектории

1. Пененко А.В., Гочаков А.В., Антохин П.Н. Алгоритм усвоения данных на основе оператора чувствительности для трехмерной модели переноса и трансформации примесей в атмосфере // Оптика атмосферы и океана. 2024. № 09 (37). С. 719–728.
2. Penenko A. et al. Sensitivity Operator Framework for Analyzing Heterogeneous Air Quality Monitoring Systems // Atmosphere. MDPI AG, 2021. Vol. 12, № 12. P. 16971. DOI: 10.3390/atmos12121697
3. Penenko A.V., Penenko V.V., Tsvetova E.A. Data Assimilation Algorithms for Atmospheric Chemistry Models // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2025. Vol. 61, № 3. P. 378–390. <https://doi.org/10.1134/S0001433825700719>
4. Penenko A.; Emelyanov M.; Rusin E.; Tsybenova E.; Shablyko V. Hybrid Deep Learning and Sensitivity Operator-Based Algorithm for Identification of Localized Emission Sources // Mathematics. 2024. Vol. 12, № 78. <https://doi.org/10.3390/math12010078>
5. Golobokova L.; Khodzher T.; Khuriganova O.; Marinayte I.; Onishchuk N.; Rusanova P.; Potemkin V. Variability of Chemical Properties of the Atmospheric Aerosol above Lake Baikal during Large Wildfires in Siberia // Atmosphere. 2020. Vol. 11. 1230. <https://doi.org/10.3390/atmos11111230>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНТУРОВ БЕРЕГОВЫХ ЛИНИЙ СО СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ SENTINEL-2 ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ПРИБРЕЖНОГО РЕЛЬЕФА

Хмельнов А.Е., Хмельнова Т.Ф.

Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН

С использованием индекса NDWI на спутниковых изображениях получается выделить контура береговых линий с субпиксельной точностью. При этом становится заметной погрешность взаимного позиционирования снимков Sentinel-2. Разработан алгоритм поиска субпиксельного сдвига растровых изображений, минимизирующего отклонение между парой снимков. После сдвига контура береговых линий, полученные с разных снимков, становятся более согласованными, но ошибки прослеживания этих контуров до конца не исчезают. Разработан алгоритм построения согласованной модели рельефа по неточным контурам береговых линий, который использует информацию об уровне воды в момент выполнения снимков для определения высоты контуров. Выполнено тестирование предложенной технологии на участках Братского водохранилища и оз. Байкал.

Для решения задач гидрологического моделирования водных объектов, оценки последствий изменения уровня воды, требуется получить совмещённую модель рельефа, объединяющую информацию о наземном и подводном рельефе. При этом сложнее всего найти качественную информацию о подводном рельефе, поэтому представляют интерес любые способы хотя бы частичного получения такой информации. В данной работе рассматривается подход, основанный на выделении контуров береговых линий на спутниковых снимках Sentinel-2, сделанных при разных уровнях воды с дальнейшим комбинированием этой информации для получения модели прибрежного рельефа для всего диапазона наблюдаемых уровней воды. Заметим, что для многих практических задач именно этот диапазон высот представляет наибольший интерес и требует наиболее точных данных, в то время как для других фрагментов рельефа может быть использована более грубая информация.

Контура береговых линий. Для построения контуров береговых линий используется водный индекс (NDWI), который вычисляется по зелёному и ближнему инфракрасному каналам: $NDWI = (B_{green} - B_{NIR}) / (B_{green} + B_{NIR}) = (B_{03} - B_{08}) / (B_{03} + B_{08})$ для изображений Sentinel-2. Разрешение наиболее детальных каналов Sentinel-2 (10 м/пиксель) может показаться недостаточным для решения рассматриваемой задачи, поскольку смещение береговой линии между снимками часто оказывается существенно меньше 10 м. Однако эти изображения получается обрабатывать с субпиксельной точностью: достаточно вместо бинаризации по порогу использовать готовый алгоритм построения контурных линий (изолиний) растрового изображения NDWI [1].

При построении контурных линий для нескольких уровней яркости растра NDWI необходимо выбрать тот из уровней, который наиболее точно соответствует наблюдаемому в этот момент положению береговой линии. Пиксели растра NDWI принимают значения в диапазоне от -1 до 1. Сначала при поиске береговых линий для выбора наилучшего уровня яркости мы сразу строили изолинии в диапазоне уровней от 0,0 до 0,25 с шагом 0,05. Наиболее подходящий уровень яркости проще всего найти при наличии мостов или других подобных объектов: выбираем тот уровень, для которого ширина моста совпадает с наблюдаемой на снимках высокого разрешения. Чаще всего при этом «побеждали» уровни 0,1 или 0,15, но всё это зависело от снимка.

В дальнейшем удалось избавиться от необходимости выбора наилучшего порога яркости за счёт реализации массовой параллельной обработки изображений Sentinel-2, которые распространяются с уровнем обработки L1C, до уровня обработки L2A. При

этом используется стандартная для этой задачи программа `sen2cor`, в которой пришлось исправить ряд ошибок, препятствующих параллельной работе нескольких её экземпляров на одном компьютере. В результате получается обработать до уровня L2A на компьютере со 128 ГБ оперативной памяти и 12-ядерным процессором AMD Ryzen 9 5900X все полученные с 2017 года достаточно безоблачные изображения для одного тайла (всего 300-500 изображений) за 10-20 часов. Дальнейший опыт использования растров NDWI, построенных по изображениям Sentinel-2 обработанных до уровня L2A, показал, что для них наилучшим уровнем яркости всегда оказывался 0, что позволяет отказаться от выбора уровня используемых изолиний.

Ошибки позиционирования космоснимков. Простейшим способом проверки точности получаемых контуров является их сопоставление для нескольких снимков одной территории, сделанных в разное время, но при близких уровнях воды: степень отклонения этих контуров характеризует точность метода. При этом становится заметно, что контура с разных снимков часто оказываются смещёнными относительно друг друга на некоторое небольшое расстояние, обычно не превышающее одного пикселя (± 10 м) по каждой из координат [1]. Действительно, в статье [2], опубликованной вскоре после запуска спутника Sentinel-2A, в Таблице 2 приводятся заданные при проектировании системы спутниковых наблюдений требования по точности геопозиционирования продуктов уровня 1 (2σ): 20 м без использования наземных реперных точек и 12,5 м при их использовании. Современные оценки точности геопривязки изображений приведены в отчёте [4]: с марта 2021 г. её среднюю абсолютную величину удалось сократить до 6 м.

Субпиксельное совмещение растровых изображений. Для поиска вектора субпиксельного сдвига $\vec{\delta} = (\delta_x, \delta_y)^T$, обеспечивающего наилучшее согласование двух растровых изображений $a_{i,j}$ и $b_{i,j}$ рассмотрим соответствующие им непрерывные функции $a(x,y)$ и $b(x,y)$, получаемые из $a_{i,j}$ и $b_{i,j}$ с использованием билинейной интерполяции на сетках изображений. В качестве минимизируемой функции ошибок, зависящей от вектора сдвига, будем использовать среднеквадратичное отклонение между двумя функциями изображений при данном сдвиге на пересечении их областей определения:

$$E(\vec{\delta}) = \iint (a(x,y) - b(x + \delta_x, y + \delta_y))^2 dx dy. \quad (1)$$

Для минимизации функции используем метод градиентного спуска. Были получены формулы частных производных функции ошибок по координатам вектора сдвига. Реализованы два варианта алгоритма: с числовыми и с символьными вычислениями. Хотя числовые вычисления выполняются быстрее символьных, их приходится делать с нуля для каждого шага алгоритма по двум изображениям с размерами 10980x10980 пикселей. Символьные вычисления достаточно выполнить один раз, при этом получаются выражения для $E(\vec{\delta})$ в виде полиномов 4 степени, из которых далее легко вычисляются выражения для производных. Выражения быстро вычисляются и позволяют эффективно найти минимум функции. Заметим, что для каждого из 4-х квадрантов, в которые может пойти сдвиг из начальной точки, требуется вычислить своё выражение. Эти вычисления выполняются по мере необходимости, поэтому, как правило, обрабатываются 1-2 квадранта из 4-х. После того как обнаружилось, что смещение между изображениями иногда может превышать 1 пиксель, алгоритм был доработан, чтобы он, при необходимости, продолжал поиск минимума в квадратных окрестностях большего размера, при этом для каждого пикселя такой окрестности, по которому проходит градиентный спуск, требуется вычислить своё выражение для функции ошибок.

Массовая обработка изображений. При пакетной обработке спутниковых изображений одной трапеции (тайла), сделанных в разное время, необходимо выбрать

среди них базовое изображение – качественный снимок без облаков и других помех, найти вектора смещений для всех остальных снимков относительно базового изображения, и сдвинуть на эти вектора соответствующие контура береговых линий. При этом необходима информация об уровне воды на момент создания каждого изображения, которая добавляется к атрибутам объектов, описывающих выделенные контура береговых линий, в виде вычисляемого поля. После этого требуется вручную отобрать качественные контура, которые будут далее использованы для построения модели рельефа. Это – самый трудоёмкий этап, но без него нельзя обойтись, т.к. для рассматриваемых территорий характерна частая облачность, а для некоторых тайлов есть годы, в которые не было ни одного безоблачного снимка. Ручная работа облегчается сценариями на Python, позволяющими динамически подгружать данные при раскрытии узлов в создаваемом ими дереве слоёв QGIS.

Построение модели рельефа по неточным контурам. Даже после сдвига, компенсирующего ошибку привязки изображений Sentinel-2, контура для разных уровней могут пересекаться из-за погрешности измерений и влияния таких природных явлений, как волнение, облачность, и т.д. Поэтому возникла задача построения модели рельефа по контурам береговых линий, которые могли быть получены с ошибками. Алгоритм для решения этой задачи должен удовлетворять следующим требованиям:

- 1) при отсутствии ошибок результат должен совпадать с триангуляцией, построенной по контурам, как по изолиниям рельефа;
- 2) накопление информации (добавление новых контуров) должно постепенно повышать точность получаемой модели.

Такой алгоритм удалось разработать и реализовать в составе ПО для работы с триангуляциями. Он основан на построении вспомогательной триангуляции, в которой каждому треугольнику сопоставляется истинный уровень его затопления – тот, который лучше всего согласуется с его списком затопляющих уровней.

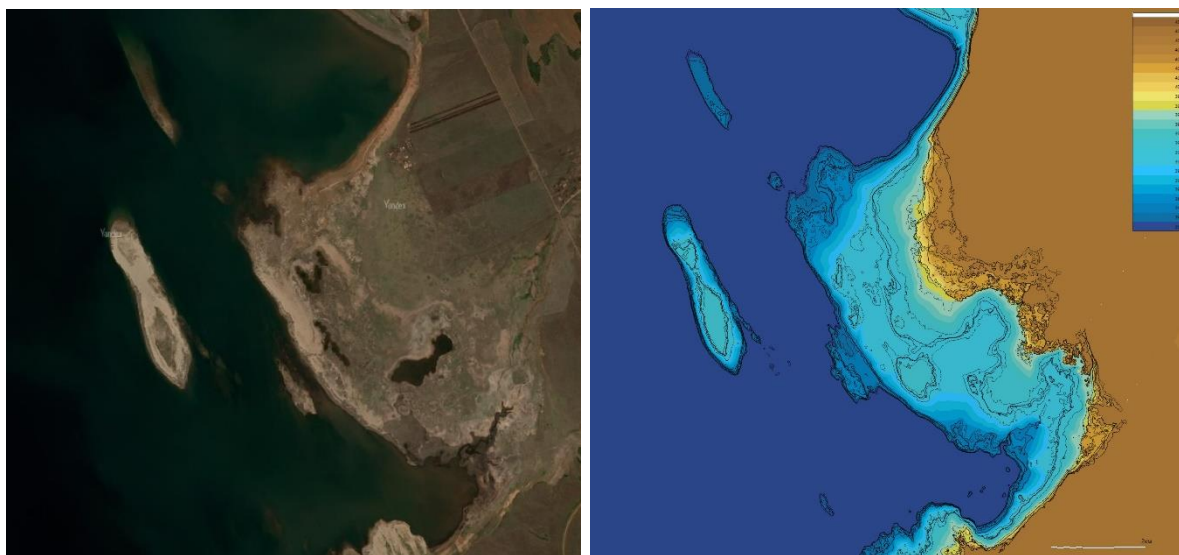


Рис. 1. Сопоставление снимка Яндекс и результирующей триангуляции.

Заключение. Использование свободно распространяемых спутниковых данных позволяет получить беспрецедентный охват исследуемых территорий. Наиболее проблемным шагом предложенной технологии является ручная проверка качества используемых контуров, сейчас мы проводим исследования по упрощению этой работы за счёт автоматизации выделения некачественных фрагментов изображений.

1. Hmel'nov Alexei E., Gachenko Andrey S., Ruzhnikov Gennady M. Construction of nearshore underwater terrain model by coastline detection on open satellite images for different water levels

- // 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. 2021. Vol. 11916, № 3. С. 56-71.
2. Thierry L. Trémas и др. Sentinel-2: presentation of the CAL/VAL commissioning phase // Image and Signal Processing for Remote Sensing XXI. Т. 9643. International Society for Optics и Photonics. SPIE, 2015. P. 964309. DOI: 10.1117/12.2194847.
 3. James C. Storey и др. A note on the temporary misregistration of Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) and Sentinel-2 Multi Spectral Instrument (MSI) imagery // Remote Sensing of Environment. 2016. Vol. 186. P. 121-122. DOI: 10.1016/j.rse.2016.08.025.
 4. S2 MSI ESL team. Sentinel-2 L1C Data Quality Report Issue 90 (August 2023). Тех. отч. OMPC.CS.DQR.01.07-2023. ESA, авг. 2023.

ПРИМЕНЕНИЕ БАССЕЙНОВОГО ПОДХОДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСХОДА ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ НА РЕКАХ ОЗЕРА БАЙКАЛ*

Н.В. Абасов, Е.Н. Осипчук, В.С. Гасан, В.М. Бердников

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

nva@isem.irk.ru, osipchuk@isem.irk.ru

Экстремальные паводки на реках в бассейне оз. Байкал приводят к значительным ущербам и негативному влиянию на прибрежные территории рек и озера в целом. Глобальные климатические изменения повышают риски таких паводков. Одним из возможных способов устранения ущерба от паводков является создание каскадов небольших водохранилищ в горных районах бассейнов водосбора рек, при наполнении и сработке которых можно трансформировать весь или часть стока. В качестве примера такой подход рассматривается при проектировании потенциальных водохранилищ на р. Снежная (южная часть бассейна оз. Байкал) для минимизации ущерба от паводков в с. Выдрино, рядом с которым проходят федеральная трасса «Байкал» и Транссибирская железнодорожная магистраль.

С помощью созданной цифровой модели рельефа на основе высотных данных (SRTM) и применением современных ГИС-инструментов [1–3] (WhiteboxTools, Watershed Analysis и др.) проведено моделирование границ бассейна и боковых притоков р. Снежная. Для двух потенциальных водохранилищ построены границы с заданным нормальным подпорным уровнем на р. Снежная (90 м) и р. Селенгинка (50 м) с определением зависимости объема воды от уровня. Визуализация полученного бассейна и водохранилищ представлена на рис. 1.

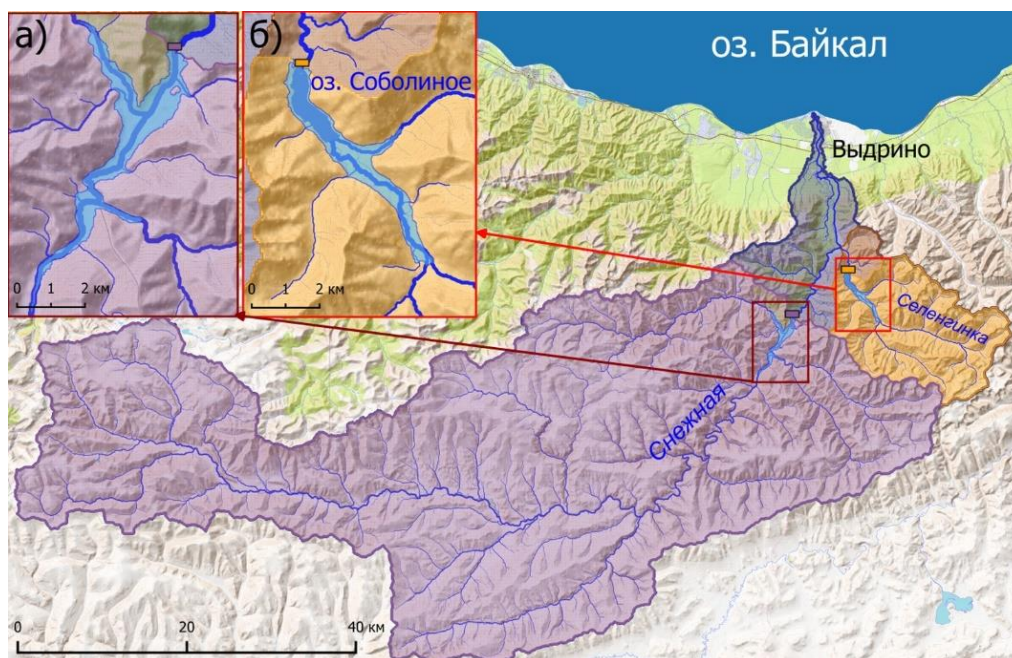


Рис.1. Моделирование бассейна р. Снежная с расположением двух потенциальных водохранилищ: а) в русле р. Снежная; б) на оз. Соболиное (р. Селенгинка)

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта («Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

Для формирования статистики и прогнозирования притока в потенциальные водохранилища используются данные реанализа GPCC (реанализ осадков), NCEP/Reanalysis (реанализ метеопоказателей), а также прогностические ансамбли системы прогнозирования климата CFSv2 (до 9 месяцев) [4, 5].

Для уточнения притока используются дополнительные морфометрические и гидрологические факторы с учетом сведений о рельефе. Для каждой ячейки бассейна учитываются площадь, высота и уклон поверхности, тип почвы, особенности водосбора, климатические сценарии.

Моделирование притока на основе водобалансового подхода можно представить в виде:

$$P(t) = R(t) - I(t) \pm \Delta S(t),$$

где $P(t)$ – приток, $R(t)$ – осадки, $I(t)$ – испарение, $\Delta S(t)$ – изменение влагозапасов в бассейне за интервал времени t .

В проектируемые водохранилища определяются вероятностные сценарии притока с учетом изменчивости климата и морфометрии их бассейнов. Подход позволяет адаптировать долгосрочные прогнозы для управления водными ресурсами в условиях неопределенности.

Для моделирования трансформации экстремального паводка и минимизации его ущерба рассматривается пример построения плотины на р. Снежная высотой 90 м и длиной менее 500 м с возможностью размещения мини-ГЭС. На рис. 2а приведены результаты моделирования прохождения паводка 1971 г. с ограничением максимального расхода до 770 м³/с при фактическом среднем 2-х суточном расходе более 1000 м³/с (без детализации внутрисуточных показателей). Так как наиболее разрушительные расходы воды могут быть выше среднесуточных на 20–30%, они успешно трансформируются регулированием уровня водохранилища, для которого важен полезный объем. На рис. 2б приведена кривая зависимости объема водохранилища от уровня воды.

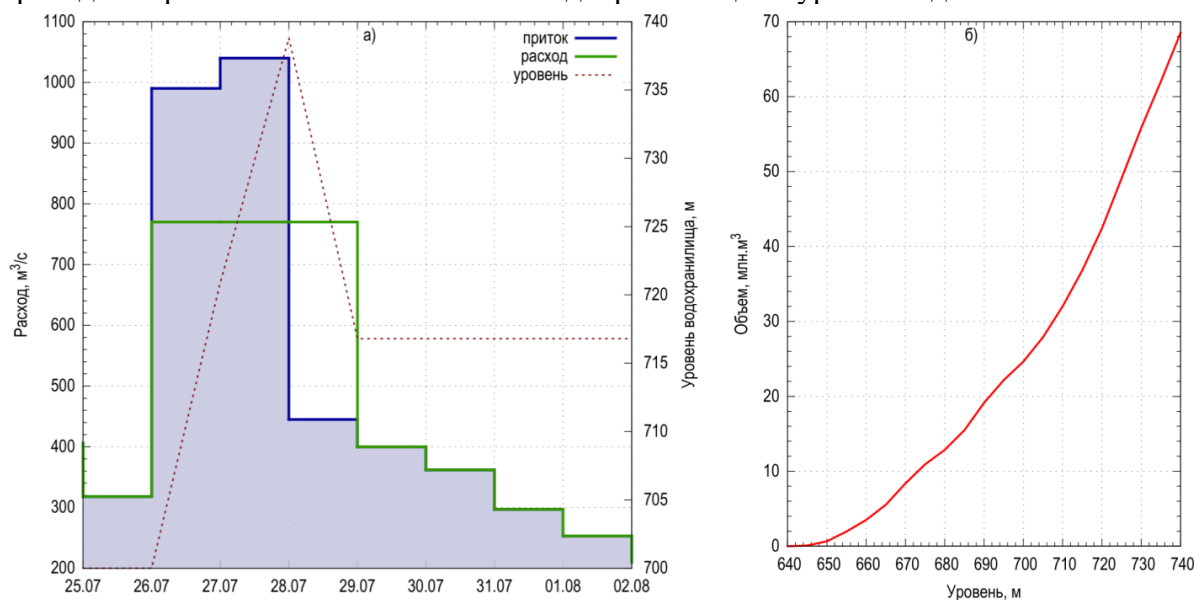


Рис. 2. Пример моделирования трансформации паводка 1% обеспеченности 1971 г. на р. Снежная: а) моделирование расхода и уровня водохранилища (система WGS-84); б) кривая зависимости объема водохранилища от уровня воды

В приведенном примере предполагается, что паводок проходит на р. Снежная до впадения в неё р. Селенгинка. При этом максимальный уровень водохранилища

поднимается на 38 м при ограничении расхода в 770 м³/с, который относительно безопасен с точки зрения возможных ущербов и гасит основную накопленную энергию паводка. Для управления режимом прохождения паводка требуется разработка диспетчерского графика, позволяющего изменять показатели расходов в зависимости от текущего уровня воды в водохранилище.

Для трансформации экстремальных паводков в бассейне может быть размещен каскад из нескольких водохранилищ, который позволит существенно уменьшить высоту плотин при сохранении полезного объема водохранилищ.

С использованием данного подхода разрабатывается система автоматического размещения потенциальных водохранилищ в бассейне оз. Байкал разной полезной емкости с поиском оптимальных параметров для трансформации паводков заданной обеспеченности (1%, 0,1% и др.).

1. Пьянков С.В., Калинин В.Г. ГИС и математико-картографическое моделирование при исследовании водохранилищ (на примере камских). Пермь: Алекс-Пресс, 2011. 158 с.
2. Strager J., Fletcher J.J., Petty T. et al. Watershed analysis with GIS: The watershed characterization and modeling system software application // *Computers & Geosciences*. 2010. № 36. P. 970-976. DOI:10.1016/J.CAGEO.2010.01.003.
3. Lindsay J.B. Whitebox GAT: A case study in geomorphometric analysis // *Computers & Geosciences*. 2016. Vol. 95. P. 75-84. DOI: 10.1016/j.cageo.2016.07.003.
4. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Эффективность моделирования и прогнозирования речного стока // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2020. № 1 (375). С. 176-189. DOI: 10.37162/2618-9631-2020-1-176-189.
5. Saha S., Moorthi S., Wu X., et al. The NCEP climate forecast system version 2 // *J. Climate*. 2014. № 6(27). P. 2185-2208. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1.

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД ОЦЕНКИ КОМПЛЕКСНОЙ ЗАЩИЩЕННОСТИ БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА*

У.С. Постникова¹, В.В. Москвичев¹, О.В. Тасейко^{1,2}, Н.А. Чернякова¹

¹Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия

²Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия
ulyana-ivanova@inbox.ru

Байкальский регион (БР) представляет собой уникальную социально-природно-техногенную систему, обладающую высоким стратегическим, экологическим и экономическим значением [1, 2]. В условиях роста антропогенных нагрузок, климатических изменений и увеличения интенсивности хозяйственной деятельности возрастает необходимость комплексной оценки факторов, определяющих уровень защищенности данной территории. Разработка методического подхода оценки защищенности Байкальского региона является актуальной научной задачей, решение которой позволяет не только повысить эффективность управления рисками в социо-, эко- и техносфере, но и будет способствовать устойчивому развитию региона, сохранению его уникального природного наследия и обеспечению безопасности жизнедеятельности населения. Под защищенностью понимается способность социо-эко-техносферы региона сохранять устойчивость к воздействию различных угроз, минимизировать негативные последствия, при реализации опасных событий и обеспечивать условия устойчивого и безопасного развития [3].

Сложность анализа заключается в многомерности и взаимосвязанности факторов, влияющих на безопасность и защищенность территории. Социальная сфера характеризуется демографическими процессами, качеством жизни и уровнем медицинского обслуживания; экосфера – состоянием лесных и водных экосистем, особенно озера Байкал и прилегающих территорий; техносфера – уровнем развития инфраструктуры промышленного производства, а также их потенциальной уязвимостью к возникновению аварийных и чрезвычайных ситуаций. В табл. 1 представлен перечень индикаторов, характеризующих защищенность социально-природно-техногенной системы. Перечень показателей не является исчерпывающим и может дополняться.

Таблица 1. Показатели, влияющие на защищенность социально-природно-техногенной системы

Индекс в матрице защищенности	Показатели защищенности	Нормативные значения показателя
социосфера		
Z_{CC}	районные больницы	1 на 20-100 тыс. человек
Z_{CC}	поликлиники	1 на 20-50 тыс. человек / 1 на 10-30 тыс. детей
Z_{CC}	амбулатории	1 на 2-10 тыс. человек

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научного-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

Индекс в матрице защищенности	Показатели защищенности	Нормативные значения показателя
Z_{CC}	станции скорой медицинской помощи	1 свыше 50 тыс. человек
Z_{CC}	диспансеры – психоневрологические, онкологические и др.	не менее 1 на субъект РФ – для городов
Z_{CC}	фельдшерские акушерские пункты	1 на 700 человек – для районов
экосфера		
$Z_{ЭС}, Z_{ЭЭ}, Z_{ЭТ}$	Количество защитных дамб в нормативном состоянии	100%
$Z_{ЭС}$	количество станций мониторинга атмосферного воздуха	для городов в зависимости от численности населения
$Z_{ЭС}$	плотность станций мониторинга поверхностных вод относительно плотности гидрологической сети	в зависимости от расположения источника загрязнения
$Z_{ЭЭ}$	площадь ООПТ/ общую площадь территории	в зависимости от плотности населения
$Z_{ЭЭ}$	количество лесных инспекторов	не более 32,8 тыс га/1 инспектора
$Z_{ЭС}$	процент населения, подверженного негативному воздействию вод	0%
техносфера		
$Z_{ТС}, Z_{ТЭ}, Z_{ТТ}$	пожарно-спасательные подразделения (ПСП)	расчётное соотношение количества спасателей на долю плотности населения
$Z_{ТС}, Z_{ТЭ}, Z_{ТТ}$	аварийно-спасательные формирования (АСФ)	в зависимости от количества ПОО
естественная защищенность		
$Z_{ЭЭ}(0)$	коэффициент естественной защищенности земель	>0,5

Каждый из представленных показателей имеет свое нормативное или максимальное значение, что позволяет количественно оценить фактическую защищенность территории [4]. Количественная оценка текущей защищенности определяется отношением фактических значений показателей защищенности к максимальным:

$$z_{ij}^k = \frac{N_{ij}^{\Phi}}{N_{ij}^{max}}, \quad (1)$$

где N_{ij}^{Φ} – фактическое значение ij -го показателя защищенности компонента С-П-Т системы;

N_{ij}^{max} – максимальное или нормативное значение ij -го показателя защищенности компонента С-П-Т системы, определенное по всем $k = \overline{1, \dots, K}$, i, j – индексы социо-, эко-техносфер.

Для нахождения собственных значений комплексной защищенности муниципальных образований используется определитель сумм матриц, где первое слагаемое – постоянная единичная матрица, второе слагаемое – матрица, ячейки которой формируют защищенность территории по социо-эко-техносфере:

$$Z = |A| = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Z_{cc} & Z_{cэ} & Z_{ct} \\ Z_{эc} & Z_{ээ} & Z_{эт} \\ Z_{tc} & Z_{тэ} & Z_{tt} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

На основе предложенного методического подхода получены количественные значения комплексной защищенности муниципальных образований Байкальского региона (рис. 1).



Рис. 1. Комплексная защищенность муниципальных образований БР

Наименьшие значения защищенности получены для следующих муниципальных образований: г. Закаменск, Усольский р-н, Чунский р-н, г. Сретенск, г. Усолье-Сибирское, Ангарский р-н, г. Могоча, г. Нерчинск, Тунгиро-Олёкминский р-н, г. Чита, Нижнеудинский р-н, Осинский р-н, г. Черемхово, Краснокаменский р-н. На данных территориях основная причина низкого показателя защищенности связана с социосферой, а именно – недостаточное количество медицинских учреждений.

Оценка территориальной защищённости выступает не только ключевым этапом в системе анализа безопасности, но и эффективным инструментом решения целого ряда социально-экономических задач [5]. Данный процесс охватывает широкий спектр приоритетных направлений, среди которых можно выделить следующие:

- обеспечение стратегических ориентиров развития, включающих сохранение численности и здоровья населения, повышение уровня и качества жизни, укрепление национальной безопасности, а также снижение социальных, экологических и техногенных рисков, сопровождающих жизнедеятельность человека;

- создание безопасной, современной и благоприятной инфраструктуры, способной стимулировать накопление и реализацию человеческого капитала, а также поддерживать развитие экономики и пространственно-материальной среды регионов;

- разработка и внедрение нового комплекса планировочных инструментов, среди которых особое место занимает стратегическое планирование на основе принципов природно-техногенной безопасности, цифровизации и использования интеллектуальных сервисов технологий;

- совершенствование информационно-аналитического управления, обеспечивающего мониторинг и прогнозирование угроз, а также поддержку принятия решений в сфере безопасности промышленных агломераций и крупных урбанизированных зон.

Таким образом, оценка территориальной защищённости представляет собой многоуровневый и междисциплинарный процесс, который интегрирует социальные, экологические, экономические и технико-технологические аспекты, служащие методологическим фундаментом для выработки эффективных решений, направленных на повышение устойчивости территорий, минимизацию рисков и достижение стратегических целей.

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Тематический блок «Региональные проблемы безопасности». Раздел I. Мониторинг, риски и безопасность Сибирского федерального округа / Научн. руков. чл.-корр. РАН Махутов Н.А., под ред. Москвичева В.В. 644 с.
2. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Тематический блок «Региональные проблемы безопасности» Раздел II. Территориальные риски регионов Сибири. Кузбасс, Енисейская Сибирь, Байкал / Научн. руков. чл.-корр. РАН Махутов Н.А., под ред. Москвичева В.В. 624 с.
3. Бычков И.В., Тасейко О.В., Постникова У.С., Москвичев В.В., Шокин Ю.И. Управление территориальными рисками развития и защищённость социально-природно-техногенных систем // Вестник Российской академии наук. 2024. Т. 94, № 11. С. 989-1002.
4. Постникова У. С., Тасейко О. В. Анализ защищённости муниципальных образований на примере Сибирского федерального округа // Безопасность и мониторинг природных и техногенных систем: материалы и доклады, Красноярск, 16–20 октября 2023 года. Красноярск: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий», 2023. С. 260-262.
5. Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года: утв. Распоряжением Правительства РФ № 3052-р от 29.10.2021.

РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ ЦЭЗ БПТ В СООТВЕТСТВИИ СО СРЕДОЗАЩИТНЫМИ ЛАНДШАФТНО-ГИДРОЛОГИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ*

О.В. Гагаринова^{1,2}, И.А. Белозерцева^{1,2}, М.Ю. Опекунова^{1,2}

¹Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск, Россия

²Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН,
г. Иркутск, Россия
whydro@irigs.irk.ru

Определение средозащитных ландшафтно-гидрологических функций территории направлено на оценку потенциальных геоэкологических рисков, в том числе условий распространения загрязняющих веществ и возможного их поступления в оз. Байкал.

Средозащитные ландшафтно-гидрологические функции представляют комплексный показатель и наиболее существенными свойствами в этом отношении являются стокорегулирующие, водоохранные и гидролого-геоморфологические. Средозащитные и водно-экологические условия территории зависят от почвенно-растительных и геоморфологических характеристик, которые обуславливают аккумуляцию, транзит и вынос веществ.

В основу районирования положены карты «Ландшафты юга Восточной Сибири» [2], «Почвы Иркутской области» [3], карта распространения опасных экзогенных процессов по Байкальской центральной зоне [5, 6], ГИС «Ландшафтно-типологическая структура Байкальской природной территории» [7,8] и материалы экспедиционных исследований.

Определение стокорегулирующих ландшафтно-гидрологических свойств базируется на ранее выполненных расчетах коэффициентов стока для различных видов ландшафтов и уклонов поверхности [9,10,11]. Коэффициент стока характеризует период трансформации дождевых осадков в сток в различных ландшафтных условиях.

В средозащитном ландшафтно-гидрологическом районировании учтены опасные геоморфологические процессы - сели, оползни, обвалы, лавины и т.д., оказывающие воздействие на трансформацию ландшафтных элементов и загрязнение водных объектов, в том числе и оз. Байкал [14, 15].

Физико-химические свойства почв, обуславливающие интенсивность миграции загрязняющих веществ в почвенно-грунтовой среде в значительной степени определяют водно-экологические условия территории, а наличие геохимических барьеров играет важнейшую средозащитную роль в ландшафтах [17, 18].

В соответствии с различными ландшафтно-гидрологическими, геоморфологическими и почвенно-растительными параметрами выполнено районирование ЦЭЗ БПТ. Уровней средозащитных функций ландшафтов характеризуются различным стокорегулированием, интенсивностью почвенной миграции веществ, развитием экзогенных процессов и возможностью возникновения опасных экологических ситуаций.

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Минобрнауки РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

Районы очень низкого и низкого стокорегулирующего и средозащитного уровня охватывают, главным образом, горные вершины и крутые склоны с бедным почвенно-растительным покровом, где выпадающие осадки не задерживаются и преобразуются в быстрый поверхностный сток. Водно-гравитационные, водно-эрозионные процессы средней интенсивности и промывной режим почв обуславливают высокую интенсивность миграции веществ, создавая значительную потенциальную опасность загрязнения природных вод.

В ландшафтно-гидрологических районах со средним стокорегулирующим и средозащитным уровнями на склонах различной крутизны и пологих территориях с елово-лиственничными, елово-пихтово-кедровыми лесами и участками долинных осоково-разнотравных лугов отмечаются достаточно разнообразные геоморфологические процессы и почвенно-растительные характеристики. В целом вероятность загрязнения почв и водных ресурсов; опасность селе- и лавинообразования, развития водно-эрозионных процессов имеет среднюю вероятность, изменяясь от максимальной до низкой.

Высокий стокорегулирующий и средозащитный ландшафтно-гидрологический уровень характерен для темнохвойных травяно-зеленомошных лесов пологих склонов и долин, где интенсивность миграции вещества достаточно низкая и отмечается наличие геохимических барьеров, что обуславливает не высокую опасность потенциального загрязнения поверхностных вод. Интенсивность водно-эрозионных, водно-гравитационных и селевых процессов для данных районов в основном низкая, за исключением северного макросклона хр. Хамар-Дабан.

Ландшафтно-гидрологические районы с очень высокими стокорегулирующими свойствами включают долинные и устьевые комплексы притоков оз. Байкал с луговыми, лугово-болотными, болотными растительными сообществами на мощных почвах преимущественно суглинистого состава. Наличие геохимических барьеров, низкая интенсивность миграции обуславливают максимальную средозащитную и водно-экологическую роль данных ареалов. Однако в отношении геоморфологических процессов здесь существует высокая вероятность развития водной эрозии и заболачивания в устьевых комплексах, а также селеформирования на отдельных притоках северного и южного побережий озера. Данные геоморфологические процессы способствуют увеличению транзита вещества, направленной аккумуляции в пониженных формах и представляют потенциальную опасность выноса в оз. Байкал загрязняющих веществ.

Районирование ЦЭЗ БПТ в соответствии со средозащитными ландшафтно-гидрологическими условиями дает общее пространственно дифференцированное представление о потенциальных условиях формирования геоэкологических рисков.

1. Михеев В.С., Ряшин В.А. Ландшафты юга Восточной Сибири. Карта. М-б 1:1 500 000. М.: ГУГК, 1977.
2. Кузьмин В.А. Почвенный покров // Атлас Иркутской области. 2004. С. 40-41.
3. Опекунова М.Ю. Оценка опасных экзогенных геоморфологических процессов Центральной экологической Байкальской зоны // Проблемы региональной экологии в условиях устойчивого развития: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 25-27 ноября 2008 г. Киров: О-Краткое. 2008. С. 363-368.
4. Опекунова М.Ю., Макаров С.А. Оценка опасных геологических процессов при рекреационно-туристской деятельности в Прибайкалье (Иркутская область) // Современные проблемы сервиса и туризма. Научно-практический журнал. 2018. Т. 12, № 3. С. 121-132.

5. Плюснин В.М., Сороковой А.А. Геоинформационный анализ ландшафтной структуры Байкальской природной территории. Новосибирск: ГЕО, 2013. 185 с.
<https://prometeus.nsc.ru/acquisitions/14-09-30/cont04.ssi>
6. Сороковой А.А. Ландшафтная структура Байкальской природной территории геоинформационный анализ: автореферат дис. кандидата географических наук: 25.00.23. Иркутск: ИГ СО РАН, 2008. 23 с.
7. Антипов А.Н. Ландшафтно-гидрологическая организация территории. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 176 с.
8. Федоров В.Н. Ландшафтная индикация формирования стока. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. 2007. 175 с.
9. Гагаринова О.В. Ландшафтно-гидрологические закономерности формирования стока в бассейне оз. Байкал // География и природные ресурсы. 2012. № 3. С. 55-60 DOI: 10.22389/0016-7126-2016-914-8-14-19 <http://www.izdatgeo.ru/pdf/gipr/2012-3/55.pdf>
10. Выркин В.Б. Современное экзогенное рельефообразование котловин байкальского типа. Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 1998. 175 с.
11. Кузьмин С.Б. Опасные геоморфологические процессы и риск природопользования. Новосибирск: ГЕО, 2009. 195 с.
12. Шеко А.И. Оценка опасности и риска // Опасные геологические процессы. М.: ГЕОС, 1999. С. 232-250.
13. Нечаева Е.Г. Ландшафтно-геохимическое районирование Азиатской России // География и природные ресурсы. 2001. № 1. С. 12–18.
14. Давыдова Н.Д. Ландшафтно-геохимические барьеры и их классификация // География и природные ресурсы. 2005. № 4. С. 24-30.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГОРНО-ПЕРЕВАЛЬНОГО УЧАСТКА ТРАНСИБИРСКОЙ МАГИСТРАЛИ, ПРИЛЕГАЮЩЕГО К ОЗЕРУ БАЙКАЛ*

А.А. Лемперт, А.Л. Казаков, М.Л. Жарков

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН,
г. Иркутск, Россия

lempert@icc.ru, kazakov@icc.ru, zharkov@icc.ru

При изучении Байкальской природной территории (БПТ) необходимо учитывать проблемы развития транспортной инфраструктуры, которая оказывает существенное воздействие на местную экосистему. Традиционно в России железная дорога является основным видом транспорта. В частности, ее доля во внутреннем грузообороте страны в 2023 году без учета трубопроводного транспорта составила 84,4%¹. Ранее проводились исследования, включавшие моделирование участка Байкало-Амурской магистрали, проходящего через БПТ и запланированного к реконструкции в соответствии с программой ОАО «РЖД» [1]. В настоящей работе изучается участок Транссибирской магистрали, также проходящий по БПТ.

Рассмотрим горно-перевальный участок от станции Гончарово до станции Слюдянка 1, частично проходящий по берегу оз. Байкал. Протяженность участка 105 км, на нем расположено 8 станций трех типов. Он является одним из наиболее проблемных на Транссибирской магистрали из-за сложного профиля, который имеет затяжные подъем и спуск, большое число кривых малого радиуса. По этой причине на нем используются дополнительные подталкивающие локомотивы (толкачи) для движения грузовых поездов в гору. Карта и схема участка представлены на рис. 1.

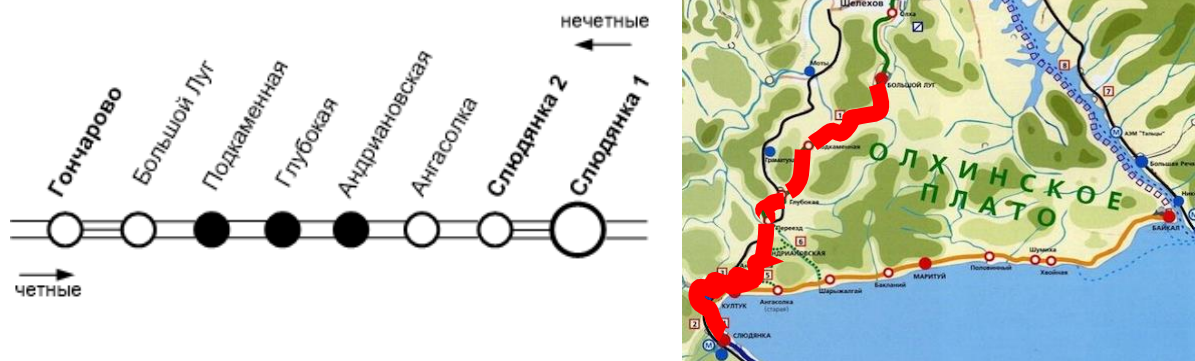


Рис. 1. Карта и схема участка

Целью работы является определение “узких мест” участка и комплексная оценка эффективности возможных мероприятий по его модернизации с учетом экологических факторов. Для ее достижения применяются методы математического и компьютерного моделирования.

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

¹ Доли различных видов транспорта в транспортной работе 2023 г.
URL: <https://f-husainov.livejournal.com/890662.html> (дата обращения: 06.08.2025).

Математическая модель движения поездов по участку строится в виде полуоткрытой сети массового обслуживания (ПСМО). ПСМО включает $S \geq 2$ систем массового обслуживания (СМО, узлов), каждая из которых имеет $1 \leq n_y < \infty$, $y \in S$ однородных каналов и $0 \leq m_y < \infty$ мест в очереди [2]. В систему часть заявок (внешние) поступает из внешнего источника и покидает ее после обслуживания, а вторая часть (внутренние) циркулирует внутри системы. За счет такого подхода при моделировании возможно учесть движение транзитных поездов через участок и фиксированное число толкачей, маршрут которых является кольцевым.

Модель участка Гончарово – Слюдянка 1 имеет вид ПСМО, включающей 62 узла и два входящих потока заявок, которые описывают поступление поездов с двух направлений. Схема модели представлена на рис. 2, где веса графа – вероятности перехода заявки между узлами. Для описания различных операций, проводимых с поездами на участке, используются узлы следующих типов: одноканальная СМО (круг) отображает работу стрелочных переводов станции, многоканальная СМО (восьмиугольник и прямоугольник) – путей между станциями и частей самих станций, СМО-соединитель (треугольник) – соединение толкача и грузового поезда, СМО-делитель (ромб) – их разъединение. Белыми и черными стрелками обозначены маршруты транзитных поездов, синими и красными – грузовых поездов с подталкиванием, желтым – групп толкачей, которые возвращаются на станцию Большой Луг.

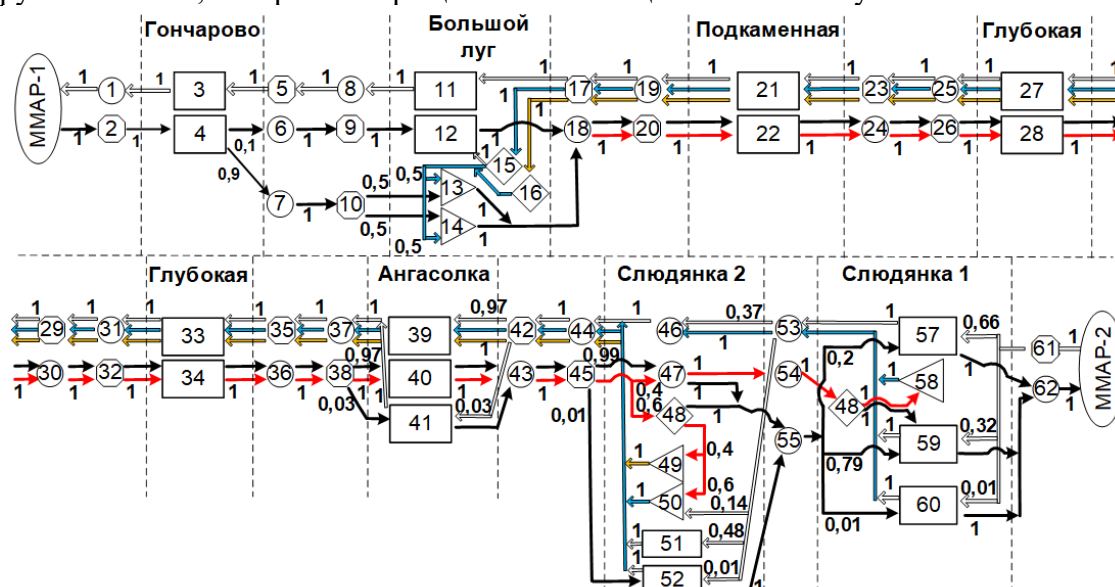


Рис. 2. Схема ПСМО

Исследование полученной модели выполнялось с помощью имитационного моделирования [1]. В ходе первого эксперимента анализировалась работа участка при существующих условиях: 36 действующих толкачах, межпоездном интервале 10 минут и текущей интенсивности движения в 118 пар поездов в сутки, с последующим увеличением нагрузки. Результаты показали, что перегон Гончарово – Большой Луг испытывает наибольшую загрузку из-за постановки толкачей на станции Большой Луг. В среднем 8 толкачей простаивают в ожидании поездов, что позволяет сократить их общее количество до 30 единиц без снижения эффективности работы. Участок обладает резервом пропускной способности в 10%, что дает возможность увеличить поездопоток до 136 пар поездов в сутки в штатном режиме. Однако при таком уровне нагрузки, помимо станции Большой Луг, "узким местом" становится станция Слюдянка 2 из-за недостаточного количества путей для приема нечетных грузовых поездов.

Во втором эксперименте исследовалась предельная пропускная способность участка при сокращении межпоездного интервала до технологически допустимых 6 минут. Результаты показали, что участок Гончарово - Слюдянка 1 способен обеспечить штатный пропуск 142 пар поездов в сутки, что на 15% превышает показатели 2023 года. Среднее число простаивающих толкачей в ожидании поезда равно 5,45 единиц из 36 действующих.

Таким образом, участок имеет запас производительности в 15%. Однако для дальнейшего увеличения интенсивности движения потребуется расширение инфраструктурных возможностей станций Большой Луг и Слюдянка 2. Особую сложность представляет модернизация станции Слюдянка 2, географическое расположение которой в непосредственной близости от береговой линии существенно ограничивает возможности территориального расширения.

В работе представлена модель движения поездов по горно-перевальному участку Транссибирской магистрали, разработанная в рамках решения задачи по формированию комплекса моделей оценки состояния экологически опасных объектов и влияния развития инфраструктуры на экологию БПТ. Модель может быть использована для выявления узких мест в структуре железнодорожных участков и оценки эффективности мер по их устранению, а также для научного обоснования строительства инфраструктурных объектов и оптимизации строительных работ, включая минимизацию их негативного воздействия на окружающую среду.

1. Bychkov I, Kazakov A, Lempert A, Zharkov M. Modeling and Numerical Analysis of the Severobaikalsk Section of the Baikal–Amur Mainline Considering Environmental Points // Sustainability. 2025. Vol. 17(2). P. 392. DOI: 10.3390/su17020392
2. Назаров А. А., Терпугов А. Ф. Теория массового обслуживания. Томск: Изд-во НТЛ, 2010. 228 с. ISBN 5-89503-233-8.

ОЦЕНКА НАЛИЧИЯ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗА ТЕРАГЕРЦОВЫХ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ*

Ф.А. Кожевников¹, М.Р. Конникова¹, А.А. Ангелуц^{1,2}

¹Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

²Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН,
г. Иркутск, Россия
angeluts@physics.msu.ru

Работа посвящена разработке метода газового анализа состояния атмосферы основанном на комплексном подходе, сочетающем измерение терагерцовых (ТГц) спектров поглощения газовых проб, создание и использование нейронной сети для анализа полученных данных. Для обучения нейронной сети генерируются массивы модельных спектров поглощения газовой смеси с различным качественным и количественным составом. Несмотря на высокое поглощение ТГц излучения водяными парами, существуют «окна прозрачности», в которых расположены интенсивные линии поглощения вращательного движения многих молекул, что позволяет однозначно определять наличие целевых веществ [1, 2] по их спектральным «отпечаткам пальцев».

Решаемая в рамках нашей работы проблема состоит в том, что в многокомпонентной газовой смеси на фоне линий поглощения паров воды нужно обнаружить присутствие линий поглощения других газов. Для решения проблемы была разработана аналитическая система на основе нейросетей, которая была обучена на большом наборе модельных спектров поглощения газовой смеси с учетом вариации концентрации примесных газов. Далее работа нейросети протестирована на выборке сгенерированных данных спектров поглощения газовой смеси и экспериментальным спектрам газовых смесей, содержащих аммиак и формальдегид.

Исследование спектров поглощения газовых смесей осуществлялось методом импульсной терагерцовой спектроскопии на спектрометре Terasmart (Menlo Systems GmbH, Германия), источником и детектором ТГц излучения, в котором служили фотопроводящие антенны. ТГц спектрометр имеет динамический диапазон 95 дБ, спектральный диапазон 0,15-3,5 ТГц (5 – 117 1/см) и частотное разрешение 2,3 ГГц (0,074 1/см). Методика определения коэффициента поглощения из спектров пропускания подробно описана в работе [3]. Экспериментально исследованы газовые смеси аммиака NH_3 и формальдегида H_2CO .

При экспериментах газовые примеси вносились в кювету с воздухом. Со временем состав газовой смеси изменялся, что можно было наблюдать по спектрам поглощения. В качестве примера на рис. 1 приведена динамика изменения экспериментальных спектров поглощения атмосферы с примесями аммиака и расчетный спектр аммиака. Сравнение кривых на рисунках показывает соответствие расчетов экспериментальным результатам.

Особенностью анализируемых данных является наложение линий поглощения паров воды на спектральные особенности целевых газов, а также взаимное перекрытие линий различных примесных компонентов. Эти факторы существенно усложняют

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научнотехнологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

классический анализ и обуславливают выбор методов машинного обучения для решения поставленной задачи идентификации и количественного определения. Для проверки гипотез и разработки наиболее эффективного алгоритма была выбрана стратегия последовательного усложнения моделей, от базовых и до самых современных архитектур.

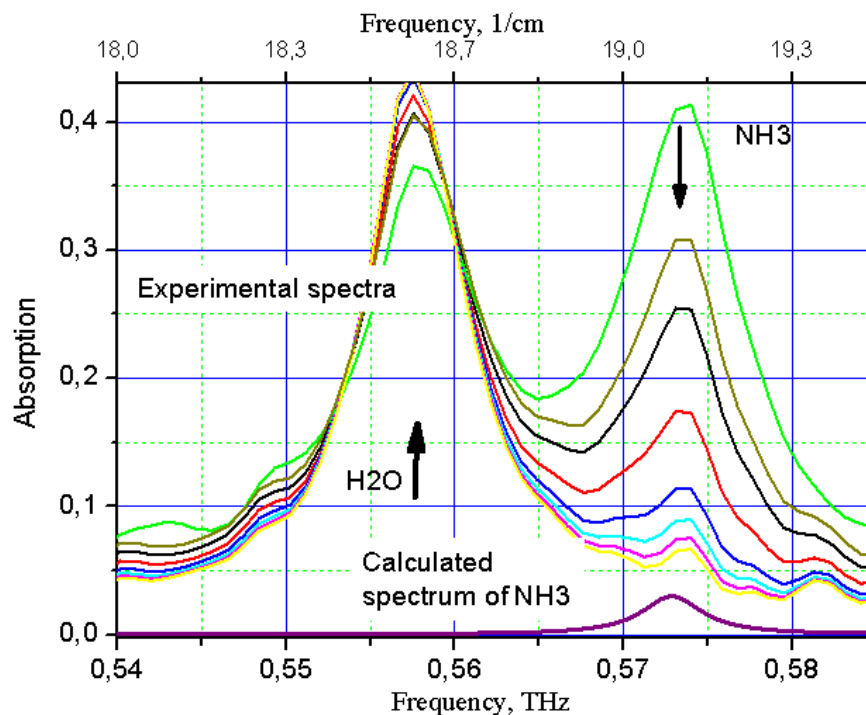


Рис.1 Экспериментальные и модельный (фиолетовая линия) спектры поглощения воздушной смеси с примесями аммиака. Стрелками показаны положения линий поглощения паров воды и аммиака и направление их изменения

Все модельные спектры для обучения и валидации были получены из базы данных HITRAN [4] с использованием пакета SPECTRA [5] для расчета контуров линий. Спектры смесей генерировались путем аддитивного смешения индивидуальных спектров целевых газов (H_2S , H_2CO , NH_3 , NO_2 , SO_2 , O_3) при различных концентрациях и атмосферы.

На начальном этапе для проверки принципиальной возможности идентификации газов была разработана сверточная нейронная сеть (CNN) AdvancedGasCNN. В качестве основы была использована архитектура ResNet-34 [6], адаптированная для обработки одномерных спектральных данных. Модель принимала на вход вектор из 2203 точек и посредством последовательности остаточных блоков (Residual Blocks) извлекала иерархические признаки. Выходной классификационный блок, использующий функцию потерь BCEWithLogitsLoss [7], формировал вектор вероятностей присутствия каждого из шести целевых газов. Данный этап проводился на синтетических спектрах без учёта инструментальных шумов и дрейфа базовой линии для оценки потенциала метода в идеализированных условиях. Результаты, представленные на рис. 2, демонстрируют высокую эффективность подхода. Модель достигла усредненного значения F1-меры в 0,93 для концентраций в диапазоне $10^{-5} - 10^{-7} \%$, подтвердив принципиальную возможность уверенной идентификации газов даже при значительном взаимном наложении их спектров.

Следующим шагом стала разработка более сложного аналитического модуля, нацеленного не на классификацию, а на прямое количественное определение концентраций. Для этого была выбрана современная и эффективная архитектура EfficientNet-B5 [8], также адаптированная для 1D-спектров с корректной реализацией блоков внимания Squeeze-and-Excite (SE) [9].

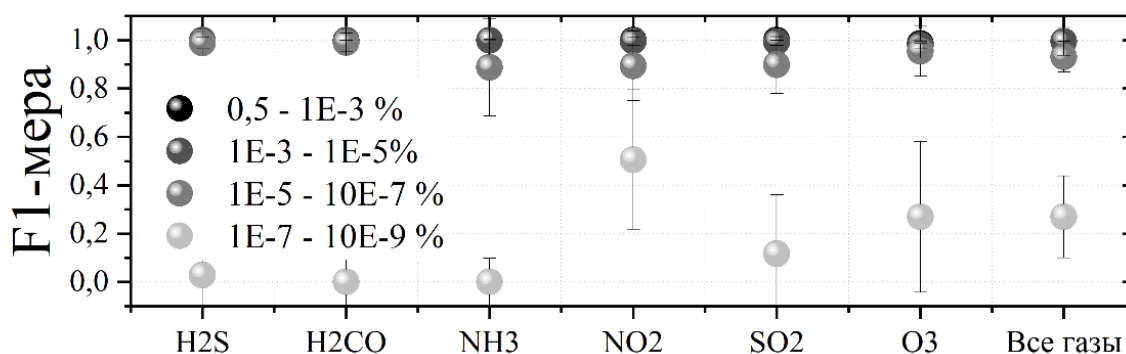


Рис. 2. Результаты идентификации газов в смеси на основе оценки по F1-мере.

Рассмотрены 4 группы по концентрациям газов в смеси: $0,5 - 10^{-3}$, $10^{-3} - 10^{-5}$, $10^{-5} - 10^{-7}$, $10^{-7} - 10^{-9}$ %. Ошибки соответствуют усреднению F1-меры по 15 эпохам обучения

Ключевым отличием данного подхода стала комплексная подготовка данных и процесса обучения. Для стабилизации обучения и повышения чувствительности к малым величинам целевые значения концентраций (C) преобразовывались по формуле $\log(1 + C)$. В качестве функции потерь использовалась взвешенная среднеквадратичная ошибка (Weighted MSE) [10], где вес каждого примера был обратно пропорционален его концентрации ($w \sim 1/C$), что позволяет модели при обучении уделять внимание спектрам с низкими значениями концентраций.

На заключительном этапе исследования была реализована третья, наиболее передовая гибридная модель, которая архитектурно объединяет сверточную нейронную сеть (CNN) и Трансформер. Эта архитектура представляет собой двухступенчатую систему, предназначенную для максимально полного анализа спектральных данных.

Ключевое усложнение и принципиальное отличие третьей гибридной модели от второй (чистой EfficientNet-B5) заключается в переходе от локального анализа к глобальному контекстуальному анализу: так как вторая модель (1D EfficientNet-B5) является глубокой сверточной сетью, её нижние слои распознают простые паттерны, а более глубокие слои объединяют их в сложные локальные структуры. Однако финальное решение принимается на основе усредненных значений этих признаков, что может приводить к потере информации о взаимном расположении удаленных друг от друга особенностей спектра.

Третья, гибридная модель решает эту проблему. Она использует CNN только для извлечения качественных локальных признаков. Полученную упорядоченную последовательность она передает в Трансформер, который, благодаря механизму самовнимания, выполняет основную аналитическую работу, взвешивая важность каждого признака в контексте всех остальных. Это позволяет моделировать глобальную структуру спектра целиком и учитывать взаимовлияние спектральных линий, находящихся на большом расстоянии друг от друга.

В настоящий момент регрессионные модели на основе EfficientNet-B5 и гибридной архитектуры CNN-Трансформер проходят этап масштабного и вычислительно затратного обучения на полном наборе данных, включающем более 8,2 миллионов сгенерированных спектров. Окончательные сравнительные метрики их производительности, такие как коэффициент детерминации (R^2) и средняя абсолютная

ошибка (MAE), будут рассчитаны и проанализированы по завершении этого процесса. Тем не менее, выбранная стратегия последовательного усложнения моделей уже позволила подтвердить высокую эффективность методов глубокого обучения и наметить пути к созданию наиболее точного и робастного алгоритма для количественного анализа сложных газовых смесей.

Экспериментальные исследования на модельных наборах демонстрируют потенциал методики в идентификации и предсказания концентраций шести газовых компонентов с нижней границей концентрации 1 ppb (10^{-7} %). Нейронная сеть на модельных, не зашумлённых данных достигла 89-98% точности при детектировании газов случайной концентрации в диапазоне 10^{-5} – 10^{-7} % на основе сгенерированной выборки. Проведены серии экспериментов, которые демонстрируют чувствительность метода ТГц спектроскопии к идентификации 0,02 % формальдегида и аммиака в атмосфере. Экспериментальные данные могут использоваться для уточнения архитектуры модели, улучшения ее характеристик и генерации экспериментальной валидационной выборки для приближения метода к реальным условиям и созданию универсальной платформы газового анализа с высокой чувствительностью к микроконцентрациям атмосферных газов.

1. Vaks V. L. et al. High resolution terahertz spectroscopy for analytical applications // *Physics-Uspekhi*. 2020. Vol. 63, №. 7. P. 708.
2. Третьяков М.Ю. Высокоточная резонаторная спектроскопия атмосферных газов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2016. 320с.
3. Nazarov M.M., et al. Terahertz time-domain spectroscopy of biological tissues // *Quantum Electron*. 2008. Vol. 38, № 7. P. 647.
4. Gordon I.E., Rothman L.S., et al. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database// *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2022. V.277. P.107949
5. Михайленко С.Н., Бабилов Ю.Л., Головки В.Ф. Информационно-вычислительная система «Спектроскопия атмосферных газов». Структура и основные функции // *Оптика атмосферы и океана*. 2005. Т. 18, № 09. С. 765-776.
6. Zagoruyko S., Komodakis N. Paying more attention to attention: Improving the performance of convolutional neural networks via attention transfer // *arXiv preprint arXiv:1612.03928*. 2016.
7. Xue Z., Zheng Y. RB-Net: Rule-Based Neural Networks with Interpretable Models // *2024 Sixth International Conference on Next Generation Data-driven Networks (NGDN)*. IEEE, 2024. P. 64-68.
8. Dai Q. et al. Citrus disease image generation and classification based on improved FastGAN and EfficientNet-B5 // *Agronomy*. 2023. Vol. 13, №. 4. P. 988.
9. Vosco N., Shenkler A., Grobman M. Tiled squeeze-and-excite: Channel attention with local spatial context // *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*. 2021. P. 345-353.
10. Ding R., Lin D. K. J., Wei D. Dual-response surface optimization: a weighted MSE approach.// *Quality engineering*. 2004. Vol. 16, №. 3. P. 377-385.

ЦИФРОВОЙ МОНИТОРИНГ ФИТОРАЗНООБРАЗИЯ БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ*

А.В. Верховина^{1,2}

¹Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН, г. Иркутск, Россия

²Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН,
г. Иркутск, Россия
allaverh@list.ru

Мониторинг биоразнообразия Байкальской природной территории (БПТ) требует интеграции больших массивов разнородных и разноформатных данных из множества источников для анализа текущего распространения видов и формирования целостной картины состояния экосистем. Особую актуальность эта проблема приобретает в условиях возрастающего антропогенного воздействия и климатических изменений. Ключевой задачей является разработка инструментов их консолидации, анализа и верификации в рамках единой цифровой платформы, позволяющей осуществлять оперативный мониторинг и прогнозирование изменений биоразнообразия.

Целью работы состояла в разработке и апробация системы цифрового мониторинга биоразнообразия БПТ на основе развиваемой реперной сети и создание механизмов интеграции разноформатных данных в единую информационно-аналитическую систему, доступных полуавтоматическому ручному анализу и автоматическому анализу сервисами WPS на геопортале ИДСТУ СО РАН.

В основу мониторинга положен усовершенствованный картографический метод построения реперной сети, разработанный с учетом ландшафтного и флористического разнообразия БПТ [1]. Изначально были разработаны и верифицированы два варианта сети: сокращенный (18 ключевых участков размером 10×10 км, покрывающий 0,47% площади БПТ) и расширенный (26 участков, 0,67% площади БПТ). В 2023 году сеть была целевым образом дополнена до 38 участков для решения специальных задач мониторинга: повышения репрезентативности по охраняемым видам сосудистых растений, оценки антропогенной нагрузки в особых экономических зонах ("Байкальская Гавань", "Ворота Байкала») и мониторинга воздействия объектов строительства и модернизации Транссибирской и Байкало-Амурской магистралей.

Для сбора данных используется ИАС на геопортале ИДСТУ СО РАН, специально разработанная для консолидации и взаимной верификации разноформатных данных из разрозненных источников: гербарных коллекций, включая оцифрованные образцы и БД гербариев, краудсорсинговых данных платформы iNaturalist, собственных полевых исследований. Интеграция данных обеспечивает их сопоставимость и позволяет проводить комплексный анализ средствами ИАС.

В рамках ИАС сформирована комплексная база данных, содержащая 340775 учетных записей о распространении 2985 видов и подвидов сосудистых растений на территории БПТ по состоянию на 15 августа 2025 года.

Для оценки выявленности флоры участков реперной сети использовалось ожидаемое число видов сосудистых растений для площади 100 км², рассчитанное по

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Минобрнауки России на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

уравнению Аррениуса (494 вида). На текущий момент только на четырех участках флористический состав выявлен более чем на 50% от расчетного, еще для 14 – более чем на 20%. Средняя выявленность видового состава сосудистых растений по квадратам реперной сети составляет 40,3%. Сокращенная сеть (18 участков) позволяет выявить 48,6% видового разнообразия сосудистых растений БПТ, расширенная сеть (26 участков) – 56,3% видового разнообразия БПТ, а целевая (38 участков) – до 63,3%. Репрезентативность сети подтверждается при минимальном покрытии территории (0,47-0,67%).

Выполнен комплексный анализ охраняемых и инвазивных видов сосудистых растений БПТ. На основе интегрированных данных на территории выявлено 39 видов, занесенных в Красную книгу Российской Федерации, 284 вида, охраняемых на региональном уровне и 122 инвазивных вида. Реперная сеть (26 участков) охватывает 43,3% охраняемых и 74,6% инвазивных видов.

Добавление 12 новых ключевых участков в целевую сеть позволило увеличить охват охраняемых видов на 14,4%, повысив эффективность методики для решения специальных задач мониторинга, связанных в том числе и с мониторингом антропогенного воздействия на растительный покров.

В ходе выполнения проекта актуализированы представления о распространении в Байкальском регионе видов из ТОП-100 самых опасных инвазионных видов России. Получены новейшие оригинальные данные с территории региона при проведении экспедиционных исследований, в том числе удалось выявить ранее не известные в регионе виды *Bidens frondosa* и *Fraxinus pennsylvanica*.

Создана БД распространения живых организмов из ТОП-100 самых опасных инвазионных видов России в Байкальском регионе общим объемом в 5168 учетных записей. На текущий момент мы сосредоточились на исследовании распространения в Байкальском регионе живых организмов ТОП-100 самых опасных инвазионных видов России [2]. По нашим данным на территории БР отмечен 41 вид из ТОП-100, все они представлены и на Байкальской природной территории: бактерия *Pectobacterium carotovorum*, сосудистые растения *Acer negundo*, *Amaranthus retroflexus*, *Ambrosia artemisifolia*, *Amelanchier spicata*, *Bidens frondosa*, *Cyclachaena xanthiifolia*, *Echinocystis lobata*, *Elodea canadensis*, *Epilobium adenocaulon*, *Erigeron canadensis*, *Fraxinus pennsylvanica*, *Galinsoga quadriradiata*, *G. parviflora*, *Heracleum sosnowskyi*, *Hordeum jubatum*, *Impatiens glandulifera*, *Lupinus polyphyllus*, *Oenothera biennis*, *Rosa rugosa*, *Solidago canadensis*, *S. gigantea*, *Xanthoxalis stricta*, нематоды *Ashworthius sidemi*, *Globodera rostochiensis*, насекомые *Diaspidiotus perniciosus*, *Harmonia axyridis*, *Leptinotarsa decemlineata*, *Polygraphus proximus*, лучеперые рыбы *Carassius auratus* complex, *Perccottus glenii*, *Pseudorasbora parva*, птицы *Phasianus colchicus*, млекопитающие *Apodemus agrarius*, *Canis familiaris*, *Mus musculus*, *Neovison vison*, *Nyctereutes procyonoides*, *Ondatra zibethicus*, *Rattus norvegicus*, *R. rattus*.

Результаты исследования подтверждают эффективность разработанного подхода к организации мониторинга фиторазнообразия на обширных и труднодоступных территориях. Интеграция разнородных данных в единую ИАС позволяет не только осуществлять их взаимную верификацию, но и проводить комплексный анализ пространственного распределения видов, выявлять тенденции изменения флористического состава и оценивать эффективность мероприятий по охране природы.

Использование краудсорсингового сбора данных через платформу iNaturalist значительно расширяет возможности традиционного мониторинга и позволяет привлекать к исследованиям широкий круг участников.

Созданный цифровой гербарий, включающий высокодетальные сканы образцов, представляет собой ценный ресурс для дальнейших исследований в области систематики, морфологии и экологии растений Байкальского региона.

Интегрированная база данных и реперная сеть мониторинга позволяют с высокой эффективностью оценивать состояние фиторазнообразия БПТ даже при минимальном покрытии территории.

Полученные результаты и разработанная инфраструктура являются основой для интеграции в общую цифровую платформу экологического мониторинга БПТ, обеспечивая возможность оперативного анализа, прогнозирования изменений и оценки антропогенного воздействия на растительный покров территории.

Дальнейшее развитие системы предполагается посредством расширения перечня групп организмов, включенных в мониторинг, совершенствованием алгоритмов автоматизированного анализа данных, созданием моделей, имитирующие расселения видов, углубленной интеграцией с другими компонентами системы экологического мониторинга БПТ для выявления корреляций с климатическим и иными факторами.

1. Плешанов А.С., Плюснин В.М., Шаманова С.И. и др. Картографическое построение реперной сети для инвентаризации и мониторинга биологического разнообразия Байкальской природной территории. Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В.Б.Сочавы, 2012. 71 с.
2. Петросян В.Г., Дгебуадзе Ю.Ю., Хляп Л.А. и др. Самые опасные инвазионные виды России (ТОП-100). М.: Тов-во научных изданий КМК, 2018. 688 с.

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ТАБЛИЧНЫХ ДАННЫХ ИЗ ДОКЛАДОВ ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ*

В.В. Парамонов, А.О. Шигаров

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН,

г. Иркутск, Россия

slv@icc.ru, shigarov@icc.ru

Байкальская природная территория (БПТ) — это уникальный природный объект площадью около 400 тысяч квадратных километров, который включает озеро Байкал и прилегающие земли. Правительство России разделило эту территорию на три зоны: Центральную экологическую зону (ЦЭЗ), Буферную зону и Зону атмосферного воздействия. В БПТ входят водная поверхность озера, прибрежные территории и крупные охраняемые зоны, такие как Байкальский, Байкало-Ленский и Баргузинский заповедники, а также несколько национальных парков [1].

Ежегодно министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации подготавливает и публикует государственные доклады «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране». Данные отчеты являются важным источником информации: они обеспечивают сбор информации об экологическом состоянии БПТ с использованием стандартизированных методологий, их проверку и юридическую ответственность; предоставляют последовательные и долгосрочные наборы данных, которые помогают отслеживать изменения в экосистемах, уровни загрязнения, биоразнообразие, антропологическое влияние и климатические воздействия с течением времени; поддерживают обеспечение соблюдения природоохранного законодательства; оценка соблюдения нормативных актов. Такие данные экологического мониторинга БПТ являются ценным ресурсом и могут быть использованы для проведения научных исследований, а также при принятии различных управленческих решений. При этом значимым показателем является достоверность данных. Особенность таких докладов состоит в том, что они публикуются на бумаге в виде нередактируемых документов в формате PDF (Portable Document Format), свободно доступных в сети Интернет².

В данной работе рассматривается подход к извлечению и нормализации табличных данных об экологическом состоянии БПТ, опубликованных в государственных докладах. Для обработки были выбраны государственные доклады «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране» с 2016 по 2022 годы. Документы были проанализированы и в результате было установлено, что отчеты имеют схожую структуру. Например, названия и номера почти всех разделов совпадают. В некоторых случаях в отчетах за один или два года могут присутствовать уникальные разделы. Каждый из разделов доклада содержит таблицы, нумерация которых проводится в рамках раздела, названия соответствующих таблиц схожи. Схемы данных в таблицах, описывающих одни и те же проблемы, также совпадают или схожи между собой. Некоторые расхождения связаны с использованием

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Минобрнауки России на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

² https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady

и неиспользованием сокращений («Характеристика воды р. Турка» и «Характеристика воды реки Турки»), изменений названий («Расход и характеристика топлива и выбросы в атмосферу по предприятиям ПАО «Иркутскэнерго»» и «Расход и характеристика топлива и выбросы в атмосферу по предприятиям ООО «Байкальская энергетическая компания» (до 01.09.2020 ПАО «Иркутскэнерго»))» или их порядком в заголовках таблиц, названиях столбцов и т. п. В редких случаях количество столбцов может отличаться. В результате анализа было установлено, что общее количество таблиц в докладах разных лет варьируется от 25 до 49. В рассматриваемый семилетний период были отобраны таблицы, встречающиеся как минимум в шести документах. В результате отобрано 29 таблиц, найденных в каждом из отчетов.

Все экспортированные таблицы были разделены на 23 класса в соответствии со структурой данных, вариациями последовательностей, иерархий и названий столбцов. Классификация была проведена для понимания, насколько отличаются структура, единицы измерений и типы данных в каждой из таблиц.

Следует отметить, что PDF фактически является стандартом для нередактируемых документов. Однако процесс автоматизированного извлечения табличных данных из него в полной мере не решен [2, 3]. Современные офисные пакеты и специализированные инструменты предлагают множество решений – от встроенных функций в основное программное обеспечение до продвинутых платформ на базе искусственного интеллекта. Существует несколько подходов к предварительной обработке и исправлению табличных данных: ручная коррекция в табличных процессорах (Excel Sheets, OpenOffice и т. п.); макрокodирование; преобразование на основе манипуляций через элементы пользовательского интерфейса (OpenRefine, Wrangler); большие языковые модели общего назначения (ChatGPT, DeepSeek). Каждый из таких подходов обладает как достоинствами, так и недостатками.

Первоочередной задачей является перевод данных в редактируемый формат, например, Excel. Данная задача может быть выполнена с помощью набора программного обеспечения, такого как Acrobat, Excel и т. д. В этом программном обеспечении есть возможность извлекать только таблицы и окружающий их текст. Однако для извлеченных данных требуется проведение предобработки для дальнейшего преобразования в реляционную форму – очистка и приведение к одному способу оформления. Это связано с тем, что в извлеченных из PDF данных между номером таблицы, её названием и самой таблицей в ряде случаев присутствуют пустые строки. Название может располагаться как в одной, так и в объединенной ячейке. Встречаются различные разделители целой и дробной частей, присутствуют артефакты. Некоторые из таблиц расположены на нескольких страницах. Проведение предобработки, позволяет повысить качество данных. Для этого был разработан набор макросов Excel. Такой подход позволяет эффективно использовать непосредственно объектную модель электронных таблиц и содержит все необходимые функциональные возможности.

Идентифицированные, извлеченные и очищенные таблицы сохраняются в отдельных файлах в соответствии с ранее определенными классами. Название каждого файла закодировано таким образом, что из него можно извлечь год выпуска отчета и идентификатор таблицы. Название листа – это исходный номер таблицы в докладе.

Преобразование таблиц в структурированную реляционную форму осуществляется в соответствии с разработанными паттернами в программном обеспечении RegTab³ для автоматизированной обработки табличных данных через задание и интерпретации паттернов таблиц. Основная идея заключается в том, что таблицы могут быть сопоставлены с повторно используемыми паттернами на языке RTL [4], описывающими

³ <https://github.com/regtab/regtab>

их синтаксическую и семантическую структуру. Каждый RTL-паттерн применяется ко всему классу таблиц, обеспечивая автоматический семантический вывод. В рамках данной задачи было разработано 23 RTL-паттерна, что соответствует всем классам таблиц. Разработанные RTL-паттерны в полном объеме описывают схемы оформления данных и их структуру, семантические особенности. В результате данные, преобразованные в реляционный вид и описывающие одни и те же сущности, за разные периоды времени, собираются в соответствующие файлы Excel.

Следующим шагом является объединение структурированных табличных данных из всех таблиц, относящихся к одному типу отчета за определенный период. Для этой цели была создана вспомогательная программная утилита, которая рекурсивно сканирует файлы из указанного расположения. Закодированная в имени каждого файла информация используется для определения его принадлежности к той или иной таблице и году отчета. Эти данные используются в дополнительных столбцах в интегрированном наборе таблиц. Подобный подход может оказаться полезным для определения, к отчету какого года относится информация, т. к. некоторые отчеты содержат данные за периоды в несколько лет. Собранные по одной предметной области таблицы утилита сохраняет в виде файлов CSV, что необходимо для загрузки данных на Геопортал Института динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН [5]. Геопортал позволяет самостоятельно создавать таблицу в соответствии со структурой полей соответствующего CSV-файла. После загрузки файла пользователь должен установить кодировку и разделители. Указываются тип данных поля или его возможная связь со словарем. Для полей, обозначающих географическое название, можно определить точку или объект местности для дальнейшего отображения на карте. Загруженные данные находятся в свободном доступе в сети Интернет: <https://geos.icc.ru/spatial>.

Работа демонстрирует, что преобразование, основанное на RTL-паттернах, в сочетании с предобработкой и постобработкой данных позволяет эффективно извлекать, структурировать и интегрировать информацию, представленную в государственных отчетах экологического мониторинга, повысить её ценность и сделать доступной для практического использования.

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 6 сентября 2000 г. № 661 «Об экологическом зонировании Байкальской природной территории и информировании населения о границах Байкальской природной территории».
2. Bonfitto S., Casiraghi E., Mesiti M. Table understanding approaches for extracting knowledge from heterogeneous tables // Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery. 2021. Vol. 11(4). e1407.
3. Burdick, D., Danilevsky, M., Evfimievski, A.V., Katsis, Y., Wang, N.: Table extraction and understanding for scientific and enterprise applications. Proc. VLDB Endow. 13(12), 3433–3436 (Aug 2020). <https://doi.org/10.14778/3415478.3415563>
4. Shigarov, A.O. Regular Table Language for Data Extraction from Document Tables Accessible in Machine-Readable Formats. Lobachevskii J. Math. 2025. Vol. 46. P. 1495–1510. <https://doi.org/10.1134/S1995080225606150>
5. Avramenko Y.V., Popova A.K., Fedorov R.K. Cloud service of Geoportal ISDCT SB RAS for machine learning // CEUR Workshop Proceedings: 4th Scientific-Practical Workshop Information Technologies: Algorithms, Models, Systems (ITAMS 2021, Irkutsk, 14 September 2021). 2021. Vol. 2984. P. 6-10. DOI: 10.1007/978-3-030-59506-7_13. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2984/paper2.pdf>.

Научно-организационный отдел
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова
Сибирского отделения Российской академии наук
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 134
E-mail: rio@icc.ru

Подписано к печати 25.08.2025 г.
Формат бумаги 60×84 1/8, объем 9,42 п.л.
Заказ 1. Тираж 1 экз.

Отпечатано в ИДСТУ СО РАН