

# INFORMATION TECHNOLOGIES FOR MONITORING OF ANTHROPOGENIC IMPACTS TO LAKE BAIKAL

Evgeniy. S. Fereferov<sup>(1)</sup>, Andrey. S. Gachenko<sup>(2)</sup>, Alexey. E. Hmelnov<sup>(1)</sup>, Roman. K. Fedorov<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS, Irkutsk, Russia

<sup>(2)</sup> Irkutsk scientific center SB RAS, Irkutsk, Russia

The article considers information technologies for monitoring pollution of lake systems. The authors created a geoportal that provides collection and generalization of the results of researches of anthropogenic impact on the ecology of Lake Baikal. Expanded on the geoportal Internet services, provide a comprehensive analysis of collected data and their geoprocessing. The open architecture of the developed geoportal allows expanding its functionality by addition of new services which can be deployed both locally, on the geoportal server, as well as on any other server in the Internet. The interoperability of software systems that implement the analysis and geodata processing functions is provided due to support of geoinformatics standards. One of the features of the developed geoportal is that users can independently operate structures of data and adjust launching of services of geoprocessing, including those services that use computing power of The Center of collective usage "Irkutsk supercomputer center Siberian Branch of the Russian Academy of Science". The authors carried out the initial filling of the system database with the results of research, thematic cartographic layers were constructed. A number of services was deployed on the geoportal in order to provide geodata processing. Authors constructed a coordinated digital model of land and bottom relief near Listvyanka using the original library of triangulation and the technology of morphing of digital maps. This model of relief allows solving the problems of analysis of the distribution of pollutants taking into account the landscape.

*Keywords: GIS, geoportal, spatial data, database, services, ecology, anthropogenic pollution.*

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОЗЕРО БАЙКАЛ

Фереферов Е.С.<sup>(1)</sup>, Гаченко А.С.<sup>(2)</sup>, Хмельнов А.Е.<sup>(1)</sup>, Фёдоров Р.К.<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск, Россия

<sup>(2)</sup> Иркутский научный центр СО РАН, г. Иркутск, Россия

В статье рассмотрены информационные технологии для проведения мониторинга загрязнения озерных систем. Авторами создан геоportal, который обеспечивает сбор и обобщение результатов исследований антропогенного воздействия на экологию озера Байкал. Развернутые на геоportале интернет-сервисы, обеспечивают проведение комплексного анализа собранных данных и их геообработку. Открытая архитектура системы позволяет расширять функциональность добавлением новых сервисов, находящихся на локальных и удаленных серверах. Программные модули, которые реализуют функции анализа и обработки геоданных, поддерживают стандарты в области геоинформатики, обеспечивая интероперабельность. Характерная черта созданного геоportала – пользователи самостоятельно управляют структурами данных и запуском сервисов геообработки, в том числе с использованием вычислительной мощности Центра коллективного пользования «Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН». Авторами проведено наполнение базы данных системы результатами исследований, построены

тематические картографические слои. С применением оригинальной библиотеки триангуляции и технологии морфинга электронных карт авторами построена согласованная цифровая модель рельефа суши и дна в районе пос. Листвянка. На основе модели рельефа проведен анализ попадания загрязнителей в озеро.

*Ключевые слова: Геоинформационные системы, геопортал, пространственные данные, интернет-сервисы, базы данных, экология, антропогенное загрязнение.*

**Введение.** Сохранение экологии уникального озера Байкал является одной из важных задач. Распространение в последние годы нитчатых водорослей, гибель моллюсков, эндемичных губок, бентосных водорослей и макрофитов, активное цветение бентосных цианобактерий свидетельствует о серьезных нарушениях в экосистеме озера [1,2] и требует проведения комплексных исследований прибрежной акватории и побережья для установления причин экологического кризиса с привлечением специалистов из таких областей знаний, как биология, химия, гидрология, геодезия, лимнология и т. д.

Проведение комплексных исследований сопряжено с обработкой больших объёмов накопленных в рамках исследований распределённых данных, необходимостью их комплексирования, анализа и требуют применения современных методов, использования информационных технологий (ИТ) и инструментальных средств для поддержки научных исследований. Из-за пространственного характера данных подходящим инструментом поддержки исследований антропогенного воздействия на экологию какой-либо территории являются геоинформационные системы (ГИС). Исследования имеют междисциплинарный характер и требуют оперативного представления материалов большого количества ученых из разных областей знаний, поэтому такая система должна быть многопользовательской.

В настоящий момент интенсивно развивается подход к созданию информационных систем на базе сервис-ориентированной архитектуры (SOA – service-oriented architecture). В рамках данного подхода приложения разрабатываются в виде наборов взаимосвязанных сервисов – самостоятельных компонентов со стандартизованными интерфейсами для взаимодействия. В настоящий момент разработано и активно используется большое количество Интернет-сервисов, обеспечивающих обработку документов и хранение данных: Google Диск, Dropbox, [Облако@mail.ru](mailto:Облако@mail.ru), Яндекс Пробки. Также развиваются узкоспециализированные сервисы (например, для обработки метеоданных, геоданных, данных со спутников, хранения и анализа результатов научных экспериментов [3-6]). При создании web-сервисов в области обработки пространственных данных активно развиваются и внедряются стандарты Консорциума OGC (Open Geospatial Consortium)[7], которые позволяют формировать удобные сервисы с унифицированными методами обмена данными и пользовательским интерфейсом.

Система мониторинга антропогенного воздействия, разработанная в виде геопортала, не требует от пользователей установки на свой компьютер специализированного программного обеспечения (вся работа реализуется через web-браузер), а также такой подход обеспечивает высокую надежность хранения данных, легкий доступ к методам, моделям и алгоритмам геообработки данных, возможность расширения перечня алгоритмов и применять для ресурсоемких приложений геообработки системы высокопроизводительных вычислений.

**Архитектура web-системы антропогенного воздействия.** Разработанная в рамках проекта геоинформационная система (рис.1) имеет клиент-серверную архитектуру.

Пользователи с помощью Web-клиента получают доступ к тематическим и картографическим базам данных, к сервисам геообработки. Большинство функций созданного геопортала оформлено в виде сервисов, например, конвертация данных из одного формата в другой. Архитектура системы позволяет добавлять новые сервисы, расширяя таким образом функциональность системы.

Серверная часть геопортала состоит из таких компонентов:

*Контроллер* – модуль, обеспечивающий создание пользовательского интерфейса. В основу модуля легла технология использования структурных спецификаций. Она позволяет упростить различные аспекты разработки и сопровождения информационных систем, обеспечивающих взаимодействие с реляционными БД [8]. Структурные спецификации таблиц формируются в формате JSON и являются моделями этих таблиц. Контроллер создает таблицы, пользовательский интерфейс для работы с ними, формирует SQL-запросы на основе сформированных структурных спецификаций по заданным политикам безопасности.

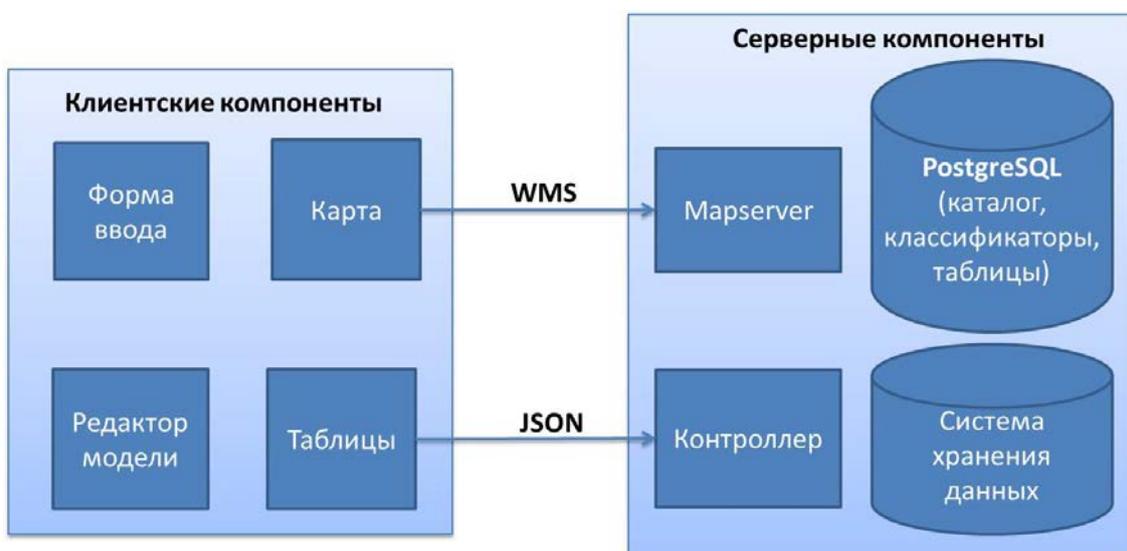


Рис. 1. Архитектура геопортала

*Система управления базами данных PostgreSQL* (вместе с расширением для обработки пространственных данных PostGIS)[9] хранит наборы данных пользователей и служебную информацию геопортала. Дополнение PostGIS позволяет сохранять пространственные данные и реализует поддержку стандартов OGC. Каждый пользователь системы получает схему базы данных, в которой он может создавать таблицы.

*Система хранения данных (СХД)* – программно-аппаратное обеспечение на базе LSI Logic Engenio 3994 с общей емкостью дисков 84 Тбайт, которое обеспечивает надежное хранение пользовательских данных, высокую скорость записи и чтения данных и бесперебойную работу.

*Mapserver* [10] – на стороне сервера генерирует изображения слоев карт по стандарту WMS. Все карты геопортала созданы в системе координат WGS 84. В дальнейшем запланировано подключить сервисы пересчета координат из других систем. Реализовано формирование тематических слоев карты на основе пользовательских данных, загруженных в БД геопортала, включая раскраску объектов карт по значениям атрибутов.

Клиентская часть геопортала через интернет поддерживает многопользовательскую работу, создание пользователями новых таблиц, ввод и редактирование данных в

реляционных таблицах заданной структуры, работу с цифровыми картами и сервисами геообработки. Интерфейс пользователя в браузере состоит из набора компонент:

*Редактор модели* – модуль, который помогает создавать и редактировать модель таблицы;

*Таблица* – модуль, который образует пользовательский интерфейс для работы с таблицами на основе jQuery Datatables;

*Форма ввода* – модуль, генерирующий интерфейс для редактирования таблицы на базе её модели;

*Каталог таблиц* – системная таблица, в которой хранятся метаданные таблиц пользователей и их структурные спецификации;

*Карта* – модуль, формирующий пользовательский интерфейс и отображающий карты на основе библиотеки с открытым исходным кодом (Leaflet) [11].

Система ввода и редактирования данных геопортала поддерживает регламентированную передачу данных WPS сервисам [12]. Во время запуска WPS сервиса пользователь выбирает в качестве входного параметра таблицу. Перед отправлением непосредственного запроса к удалённому WPS сервису выбранная таблица конвертируется в файлы формата SHP с помощью утилиты pgsq2shp, входящей в стандартный пакет СУБД PostgreSQL. В результате сервис получает HTTP ссылки на сконвертированные данные в соответствии со стандартом WPS.

Запросная подсистема представляет собой набор фильтров по каждому из полей тематической таблицы. Для каждого поля формируется форма ввода условий отбора в зависимости от его типа данных.

Загрузка документов, необходимых для формирования тематических БД геопортала осуществляется специализированным файловым менеджером, позволяющим производить все основные операции с файловой системой на сервере через браузер, в том числе загрузку и выгрузку документов с компьютера пользователя. Реализация данного модуля обеспечивает возможность удаленной загрузки данных в единое файловое хранилище. Загрузка данных проводится по протоколу HTTP. В случае, если передаваемые данные имеют большой объема или требуется обеспечить защиту данных передаваемых по открытым каналам связи, реализована возможность загрузки документов по протоколу FTPS (File Transfer Protocol + SSL). В дальнейшем пользователь может воспользоваться сервисами загрузки данных из документов в СУБД и применить для них различные методы анализа.

**Данные web-системы антропогенного воздействия.** Как фоновую подложку разработанный геопортал использует карты известных ГИС, такие как Google, ЯндексКарты, OpenStreetMap, 2GIS, Bing. К системе добавлена кадастровая карта Росреестра РФ, обеспечивающая доступ к информации об объектах недвижимости. Дополнительно пользователи могут добавлять сторонние векторные и растровые карты, включая карты с батиметрией.

Тематические данные геопортала представлены собранной в результате исследований за 2016-2017 гг. информацией в виде баз данных с возможностью формирования по ним картографических слоёв (рис.2). На сегодня сформированы:

- БД содержания антропогенных загрязнителей в природных средах, которые находятся в прямой связи между собой, в рамках ландшафтно-геохимических потоков. В БД содержатся сведения о пробах воды, снега и почвы, взятых в 52 точках на территории и окрестностях п. Листвянка в различные периоды года (информация предоставлена

ИГ СО РАН) [13]. По каждой пробе указаны количественные данные по ряду загрязнителей и показателей: микробиологические показатели, нефтепродукты, температура, взвешенное вещество, минерализация, рН, катионы, анионы, микроэлементы: Mn, Ba, Al, Pb, Cu, Co, Be, Cd, Mo, Ni, Cr, Fe, Si, Zn, V, Sr, Ti;

- БД измерений удельного электрического сопротивления грунта по методам электротомографии (точки вдоль уреза воды, рис.2);
- БД химического состава воды в реках, ручьях, лунках пляжей и литерали залива Лиственничный» (показателями базы является концентрация элементов в фильтрованных пробах воды);
- БД санитарной микробиологии рек п. Листвянка (показатели базы отражают уровень содержания микроорганизмов, которые способны косвенно или непосредственно неблагоприятно влиять на здоровье людей).

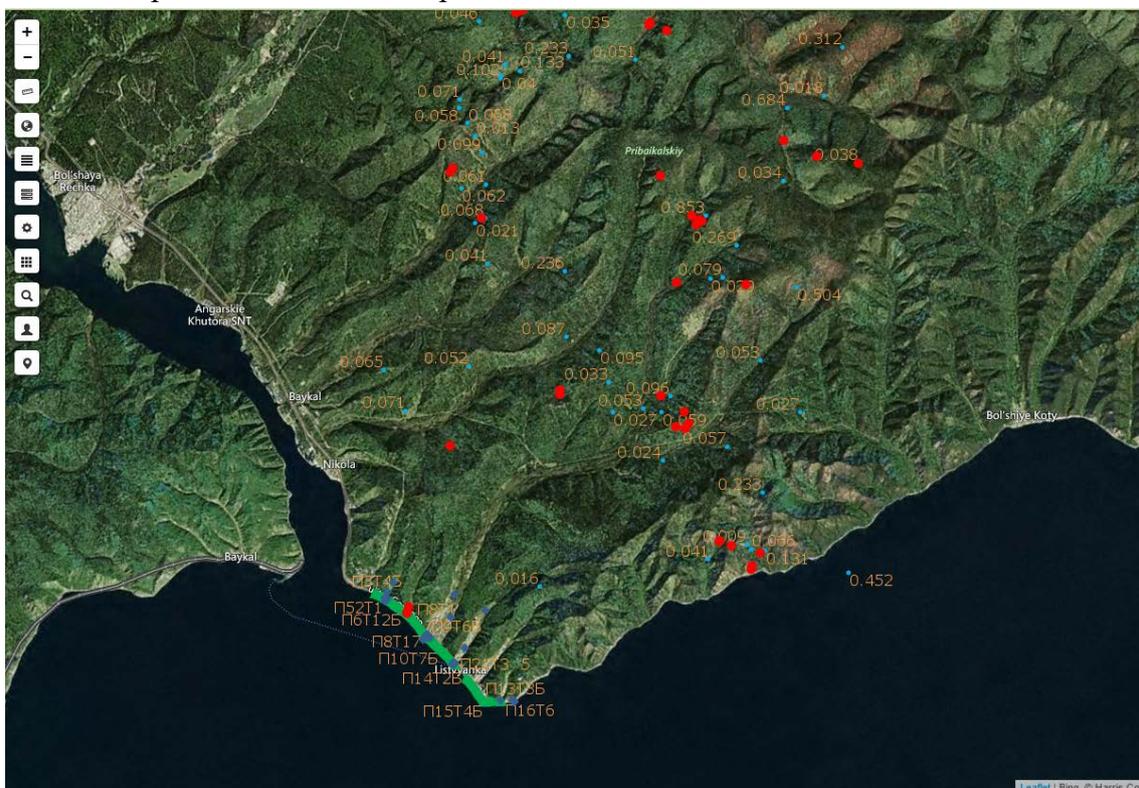


Рис. 2. Объекты с географической привязкой из БД

На основе загруженных с Публичной кадастровой карты данных об участках, находящихся в собственности (исходные данные получены в формате xml) построена тематический слой «Участки, находящихся в собственности» (Источники потенциального загрязнения бытовыми стоками).

Для оценки вклада общественных учреждений в формирование бытовых загрязнителей создана БД гостиниц, расположенных на территории п. Листвянка. По каждой гостинице имеется информация о её мощности (количество номеров), наличии собственных пищеблоков и прачечных, а также пространственной привязке. Проведена работа по привязке и отображению гостиничных комплексов на космоснимке.

Была построена согласованная цифровая модель рельефа суши и дна в районе п. Листвянка с применением оригинальной библиотеки триангуляции и технологии морфинга электронных карт [14, 15]. Модель суши создана на базе топографической карты масштаба 1:25000 с сечением рельефа 5 м. Площадь фрагмента ограничена требованиями

секретности, с тем, чтобы использованный объём данных мог использоваться в свободном режиме. Модель подводного рельефа построена по данным промеров глубин в отдельных точках и изобат (рис. 3), являющиеся результатом работы эхолотационного батиметрического комплекса (данные предоставлены ЛИИ СО РАН).

В процессе построения совмещённой модели изолинии рельефа и точки планово-высотной основы обрабатывались в режиме рельефа, т.е. непосредственно использовалась заданная для них высота. Для задания отметок уреза воды был создан вспомогательный слой Water, для точек которого была задана высота, соответствующая высоте, полученной для объекта представляющего Байкал, после изменения проекции. При этом глубины отсчитываются относительно вспомогательной поверхности, построенной на этих точках. Тайкой режим Underwater используется для слоёв подводного рельефа.

Имеющиеся данные о наземном и подводном рельефе хорошо согласуются между собой, что обеспечило построение качественной совмещённой модели рельефа в районе пади Крестовская (рис. 4, 5). Для получения совмещённой модели рельефа по всей исследуемой территории требуется дополнить сведения о подводном рельефе, данные работы выдуться в настоящее время.

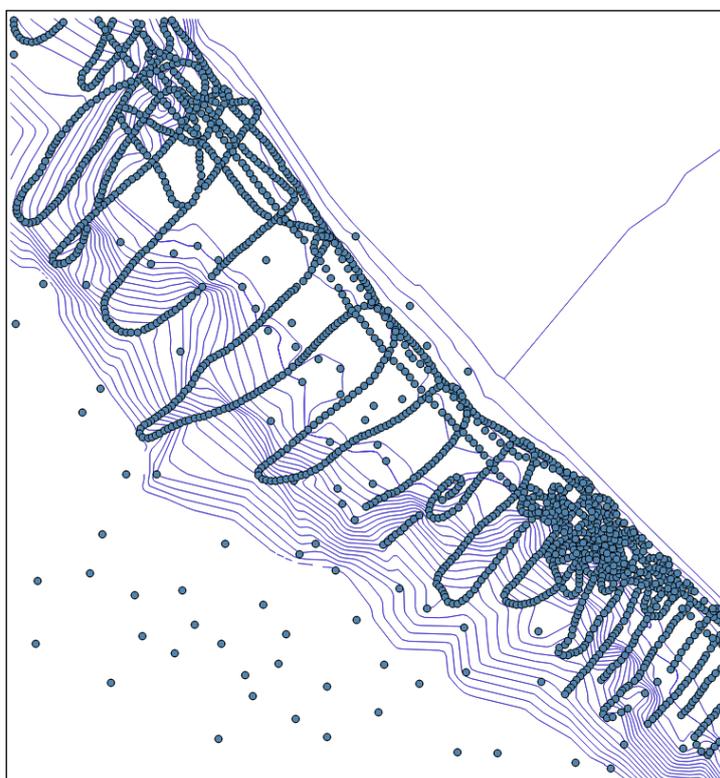


Рис. 3. Информация о подводном рельефе в районе пади Крестовской (промеры глубин: точки и изобаты)

Полученная цифровая модель помогает повысить точность во время моделирования распространения антропогенных загрязнителей с учётом рельефа местности.

На геопортале развернут ряд сервисов для решения задач обработки геоданных:

- расчёт растровой плотности точечных объектов;
- интерполяция точечных данных на регулярную сетку;
- идентификация объектов по растровому изображению;
- классификация объектов на основе метода опорных векторов;
- построение индекса растительности;

- растеризация линейных и площадных объектов;
- построение карт уклонов и направлений высот по регулярной сетке на основе данных SRTM;
- построение карт временной доступности объектов.

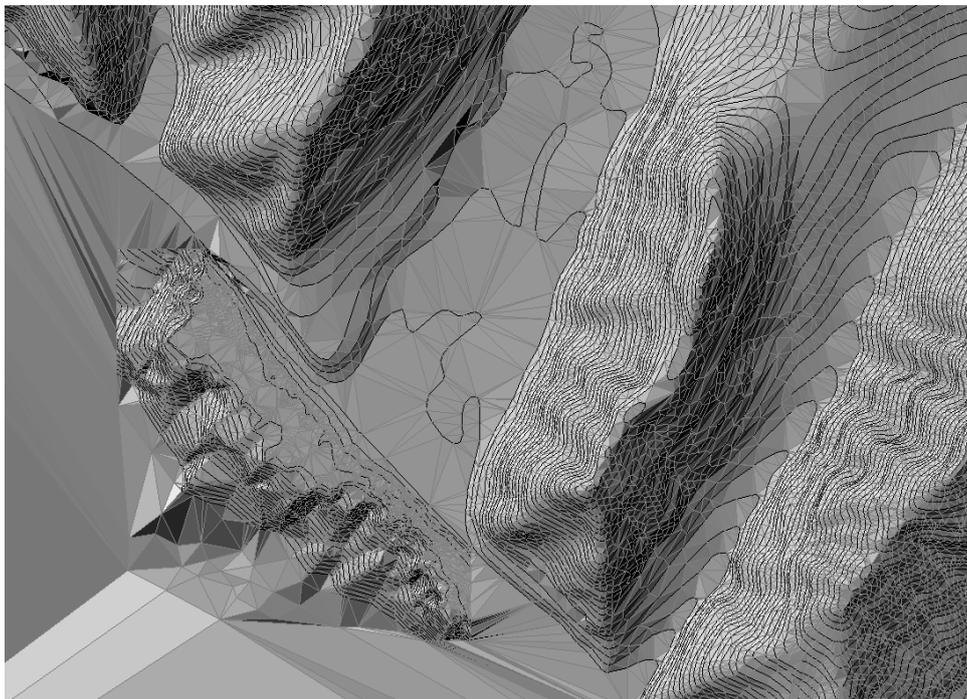


Рис. 4. Фрагмент полученной триангуляции для совмещённой модели рельефа в области, для которой имеется информация о подводном рельефе

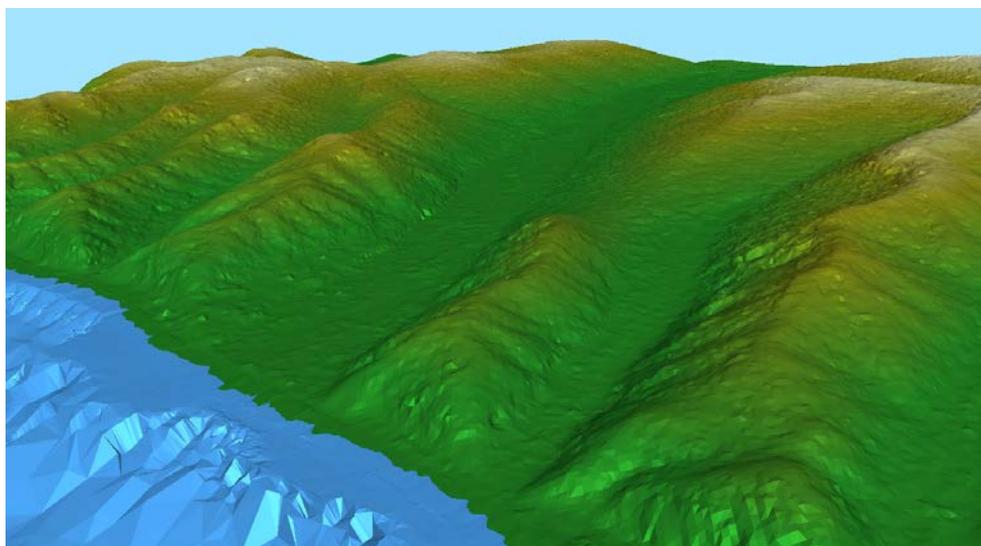


Рис. 5. Совмещённая трёхмерная модель рельефа

**Заключение.** Разработанная авторами информационно-аналитическая система позволила объединить усилия учёных и повысить качественно уровень исследований антропогенного воздействия на экологию прибрежной зоны озера Байкал. Благодаря открытой архитектуре системы ее функциональность расширяется добавлением новых сервисов, находящихся на локальных и удаленных серверах. Программные модули, в которых реализованы функции анализа и обработки геоданных, поддерживают стандарты в области геоинформатики, повышая интероперабельность системы. Аккумулированные

данные позволяют вычислить интегральные показатели, несущие информацию об антропогенном влиянии на природную среду за указанный отрезок времени. Работа выполнена в рамках Интеграционной программы ИНЦ СО РАН «Фундаментальные исследования и прорывные технологии как основа опережающего развития Байкальского региона и его межрегиональных связей», проект «Научное обоснование перспективных технологий организации комплексного мониторинга озёрных экологических систем».

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-07-00554-а, 18-07-00758-а), интеграционной программы ИНЦ СО РАН. Результаты получены при использовании ЦКП «Интегрированная информационно-вычислительная сеть Иркутского научно-образовательного комплекса» (<http://net.icc.ru>).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сутурин А.Н., Чебыкин Е.П., Мальник В.В., Ханаев И.В., Минаев А.В., Минаев В.В. Роль антропогенных факторов в развитии экологического стресса в литорали озера Байкал (акватория пос. Листвянка) // География и природные ресурсы. 2016. № S6. С. 43-54.
- [2] Грачев М. А. «Авоська и авось». Экологический кризис на Байкале: загадка века//Наука из первых рук. 2016. Т. 68, № 2. С. 6-19.
- [3] Кадочников А.А., Якубайлик О.Э. Сервис-ориентированные веб-системы для обработки геопространственных данных // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. 2015. Т 13. № 1. С. 37-45.
- [4] Юрин А.Ю., Дородных Н.О. Web-сервис для автоматизированного формирования продукционных баз знаний на основе концептуальных моделей // Программные продукты и системы. 2014. № 4 (108). С. 103-107.
- [5] Попов Б.Н., Ефременко Д.С. API метеорологических web-сервисов // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2014. № 1 (12). С. 42-50.
- [6] Нечаевский А.В., Пряхина Д.И., Ужинский А.В. Разработка веб-сервиса для моделирования систем хранения и обработки данных физических экспериментов // Системный анализ в науке и образовании. 2015. № 4 (30). С. 28-35.
- [7] Geospatial and location standards [Электронный ресурс] – <http://www.opengeospatial.org/> (дата обращения: 07.07.2018).
- [8] Фереферов Е.С., Бычков И.В., Хмельнов А.Е. Технология разработки приложений баз данных на основе декларативных спецификаций // Вычислительные технологии. 2014. Т. 19, № 5. С. 85–100.
- [9] PostgreSQL: The PostgreSQL Global Development Group [Электронный ресурс]. – <http://www.postgresql.org/> (дата обращения: 15.06.2018).
- [10] Mapserver [Электронный ресурс]. – <http://mapserver.org/> (дата обращения: 07.06.2018).
- [11] LeafLet – a JavaScript Library for Interactive Maps [Электронный ресурс]. <http://leafletjs.com/> (дата обращения: 20.05.2018).
- [12] OGC® WPS 2.0 Interface Standard [Электронный ресурс]. – <http://docs.opengeospatial.org/is/14-065/14-065.html> (дата обращения: 11.06.2018).
- [13] Белозерцева И.А., Воробьева И.Б., Власова Н.В., Янчук М.С., Лопатина Д.Н. Химический состав снега акватории озера Байкал и прилегающей территории

//География и природные ресурсы. 2017. № 1. С. 90-99

- [14] Хмельнов А.Е., Гаченко А.С. Реализация совмещения неточной модели рельефа речного дна с моделью надводного рельефа // Вестник Бурятского государственного университета. Математика, информатика. 2016. № 2. С. 77-84.
- [15] Bychkov I., Gachenko A., Ruginov G., Hmelnov A. 3-D modeling of Angara river bed // CEUR Workshop Proceedings. 2017. Vol. 1839. pp. 26-32.