

**РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК 300 ЛЕТ**

УДК 004.4:91

DOI: 10.15372/GIPR20240405

**И.В. БЫЧКОВ, А.Е. ХМЕЛЬНОВ, Р.К. ФЁДОРОВ, Е.С. ФЕРЕФЕРОВ, А.С. ГАЧЕНКО**

Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН,  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, Россия, bychkov@icc.ru, hmelnov@icc.ru,  
fedorov@icc.ru, fereferov@icc.ru, gachenko@icc.ru

**ИССЛЕДОВАНИЯ ИНСТИТУТА ДИНАМИКИ СИСТЕМ И ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ СО РАН  
В ОБЛАСТИ ГЕОИНФОРМАТИКИ: ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ, БУДУЩЕЕ**

*В ИДСТУ СО РАН работы в области создания и использования геоинформационных технологий начались на ранних этапах их применения, еще в 1990-е годы. За это время был создан ряд оригинальных геоинформационных программных библиотек и систем, других программных систем, поддерживающих отображение информации на электронных картах, а также систем для работы с пространственной информацией, созданных с использованием готовых программных решений. В данной работе представлены наиболее интересные из этих разработок в исторической перспективе. В статье рассматривается опыт, полученный в ходе выполнения таких разработок, как конвертеры для перевода между различными форматами векторных карт; информационно-справочные системы с отображением информации на карте; информационно-аналитические и OLAP-системы; системы для публикации векторных карт в Интернет/интранет; сервис получения фрагментов векторной топоосновы; оригинальный формат MRG для представления растровых данных большого объема; оригинальная библиотека для работы с триангуляциями и ряд ее применений; муниципальная ГИС и Адресный план г. Иркутска; ГИС «Инвестора» г. Иркутска; программное обеспечение для создания геопортала; обработка данных ДЗЗ с использованием нейросетей; разработки в области цифрового экологического мониторинга, выполненные в рамках крупного научного проекта «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории (БПТ)».*

**Ключевые слова:** геоинформационная система, конвертер, геопортал, WPS-сервисы, спецификации, триангуляции Делоне, анализ данных ДЗЗ.

**I.V. BYCHKOV, A.E. HMELNOV, R.K. FEDOROV, E.S. FEREFEROV, A.S. GACHENKO**

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory, Siberian Branch,  
Russian Academy of Sciences, 664033, Irkutsk, ul. Lermontova, 134, Russia, bychkov@icc.ru,  
hmelnov@icc.ru, fedorov@icc.ru, fereferov@icc.ru, gachenko@icc.ru

**RESEARCH BY THE MATROSOV INSTITUTE FOR SYSTEM DYNAMICS SB RAS  
IN THE FIELD OF GEOINFORMATICS: PAST, PRESENT, AND FUTURE**

*At IDSTU SB RAS, research efforts in the field of development and use of geoinformation technologies began at the early stages of their application, back in the 1990s. Since then we have developed a number of original geoinformation software libraries and systems, and other software systems that support presentation of information using electronic maps as well as the systems for working with spatial information created using off-the-shelf software solutions. In this article we consider the most interesting of these systems from a historical perspective. We discuss the experience gained in the course of developments, such as: converters between different vector map formats; information and reference systems with map data representation; information-analytical and OLAP systems; systems for Internet/intranet publishing of vector maps; the service for obtaining fragments of vector topographic maps; the original MRG file format for representation of big raster data; an original library for working with triangulations and some its applications; the municipal GIS and the Address Plan of Irkutsk; the system GIS Investor of Irkutsk; the geoportals software developed in the institute; the methods for processing remote sensing data using neural networks, and the*

*digital environmental monitoring platform developed within the framework of a major scientific project “Fundamentals, methods and technologies for digital monitoring and forecasting of the environmental situation of the Baikal natural territory (BNT)”.*

**Keywords:** *geographic information systems, converters, geoportal, WPS services, specifications, Delaunay triangulation, remote sensing data analysis.*

## ВВЕДЕНИЕ

В Институте динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН (ИДСТУ СО РАН) работы в области создания и использования геоинформационных технологий начались на ранних этапах их применения — еще в 1990-е гг. За это время был создан ряд оригинальных геоинформационных программных библиотек и систем, других программных систем, поддерживающих отображение информации на электронных картах, а также систем для работы с пространственной информацией, созданных с использованием готовых программных решений. В данной работе мы кратко рассмотрим наиболее интересные из этих разработок в исторической перспективе.

В 1990-е гг. финансирование науки было недостаточным, поэтому сотрудники ИДСТУ СО РАН активно участвовали в разнообразных проектах, в том числе выполняемых по договорам с предприятиями реального сектора экономики, с органами государственной и муниципальной власти и т. п. При выполнении таких работ вместе с ценным опытом решения реальных задач создавались новые технологии и программное обеспечение, которые в дальнейшем использовались для выполнения новых задач, как хозяйственных, так и научных. При создании систем, дающих характеристику реальных физических объектов, как правило, описывается и их пространственное расположение. Следующим естественным шагом является визуализация этой пространственной информации, т. е. ее отображение на карте. Поэтому многие такие проекты требовали использования геоинформационных технологий, которые в то время часто реализовывались с нуля, без привлечения готовых программных библиотек (рис. 1).

## НАУЧНЫЕ РАЗРАБОТКИ ИНСТИТУТА

**Разработка конвертеров.** Спустя некоторое время возникли задачи, для решения которых необходимо было использовать сертифицированную топооснову, созданную в рамках государственных заданий специализированными предприятиями, в частности Восточно-Сибирским аэрогеодезическим предприятием (ВостСибАГП). Тогда карты уже создавались в цифровой форме, активно шла оцифровка бумажных карт различных масштабов, для этого на данном предприятии использовалась система КАМАТ. Для передачи этой информации в электронном виде за пределы предприятия требовалось перевести эти карты в более распространенные форматы, поэтому по заказу ВостСибАГП в ИДСТУ СО РАН были разработаны конвертеры из карт системы КАМАТ в ставшие известными к тому времени форматы ГИС (MIF, Shape, SXF и т. д.).

При создании конвертеров цифровых карт требуется учитывать различные особенности ГИС, между которыми передается информация. Наиболее явно отличаются российские и зарубежные ГИС: в зарубежных чаще всего слой карты рассматривается как таблица, одним из атрибутов (семантик) которой является информация о положении объекта; для российских ГИС характерно использование классификаторов (т. е. справочников, сопоставляющих коду класса объекта как способ его отображения, так и допустимый состав атрибутов). Скорее всего, это объясняется тем, что в СССР были разработаны единые таблицы условных знаков [1], к использованию которых были приучены все картографы. За счет применения классификаторов в одном слое могут быть собраны разнородные (как по виду локализации, так и по составу атрибутов) объекты, которые иногда могут содержать несколько значений одного атрибута.

При экспорте в другой формат с классификаторами, как это происходит в конвертере КАМАТ — Панорама, необходимо установить соответствие между кодами объектов и определить значения семантик. Несмотря на общее происхождение классификаторов из [1], эта задача оказывается очень нетривиальной: каждому коду в исходной ГИС может соответствовать несколько кодов в результирующей ГИС, выбор конкретного кода из этого списка может определяться значениями некоторых семантик исходного объекта.

Для создания и редактирования таблиц соответствия между классификаторами необходимых для выполнения экспорта КАМАТ — Панорама было разработано отдельное приложение. В главной таблице формы (таблице соответствия кодов классов объектов) комбинации «Код объекта; Дайджест;

Код условного знака» из КАМАТ сопоставляется класс объекта и вид локализации в Панораме. Дайджестом здесь называется комбинация значений кодовых семантик исходного объекта, влияющих на выбор класса результирующего.

К теме создания конвертеров сотрудникам ИДСТУ СО РАН еще приходилось возвращаться многократно. Так, по заказу Комитета по градостроительной политике мэрии г. Иркутска были разработаны конвертеры материалов исполнительных съемок, съемок текущих изменений, материалов межевания, топографических съемок в электронном виде из ПО изыскательских и проектных организаций (Credo, Autocad, ArcView) в ГИС Панорама с соответствующим электронным классификатором для внесения изменений в дежурный цифровой топографический план города [2].

**Информационно-справочные системы.** По заказу различных организаций был разработан ряд информационно-справочных систем, предназначенных для удобного отображения и поиска информации, собранной в базе данных. В большинстве таких систем часть объектов баз данных (БД) была связана с картой, поэтому в системах были реализованы такие функции, как выделение объектов на карте по результатам запросов к БД и поиск информации в БД по объекту карты.

При создании таких систем программный код приходилось фактически полностью повторять, отличались только наименования таблиц, полей и связи между ними. После анализа этой ситуации была разработана универсальная программная библиотека — ISAPI-расширение Web-сервера IIS, предназначенная для публикации в Интернет/интранет информации из БД с использованием спецификаций структуры БД с точки зрения приложения. Также с применением спецификаций был реализован апплет — построитель запросов, позволявший находить записи в таблицах по произвольным комбинациям условий на отдельные поля и на записи подчиненных таблиц. Позднее с использованием программных библиотек для работы со спецификациями структуры БД была разработана система ГеоАРМ, позволяющая создавать приложения БД для ввода, редактирования, поиска и отображения информации из БД, а также, при необходимости, ее отображения на карте [3, 4]. Пример информационно-справочной системы, созданной по предложенной технологии, показан на рис. 2.

Для отображения карт был реализован целый ряд альтернативных подходов, которые будут далее рассмотрены в отдельном разделе. Общий принцип построения систем с картографической частью состоял в том, что взаимодействие двух подсистем (отображающей информацию из БД и картографической) происходило на клиенте (в браузере) через вызов определенных функций JavaScript, которые должны быть определены в Web-документе. При этом в БД должны присутствовать таблицы связи записей некоторых ее таблиц с картой, содержащие номера объектов карты, соответствующие каждой связанной с картой записи.

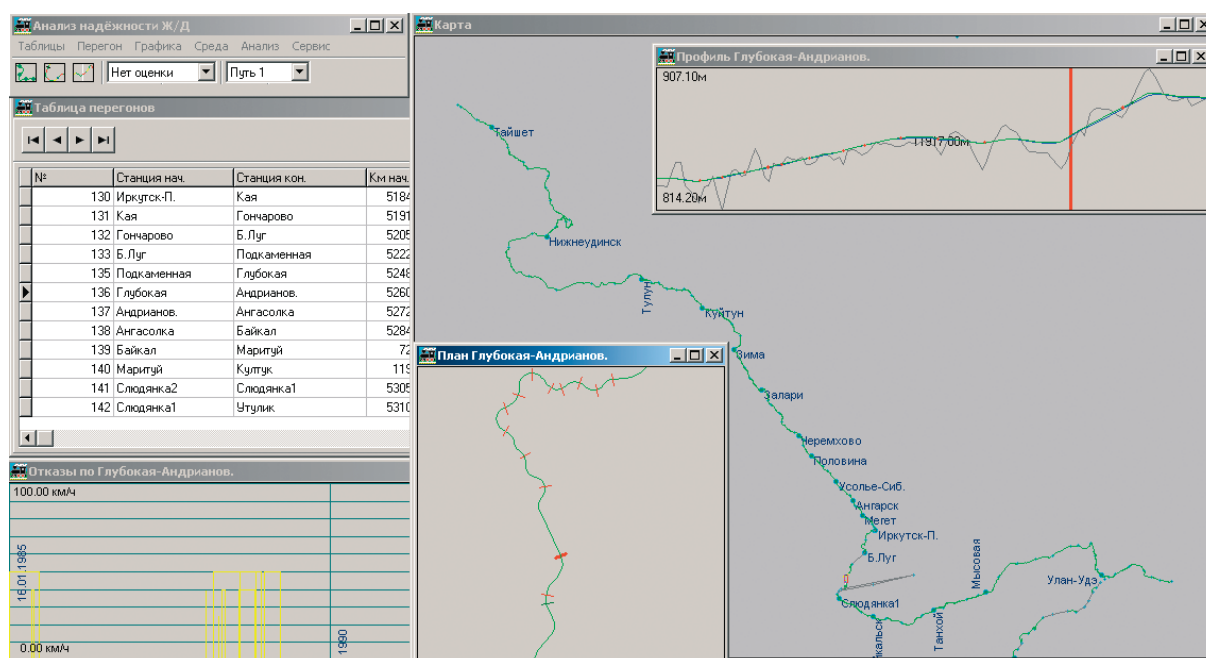


Рис. 1. Интерфейс приложения «Анализ надежности Ж/Д».

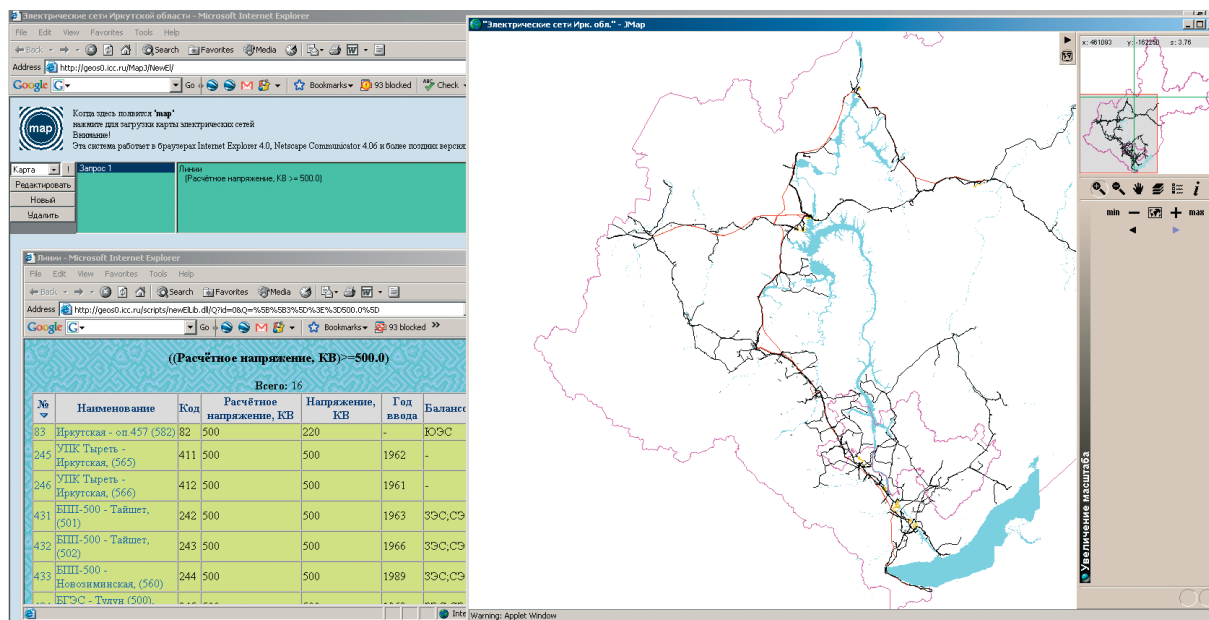


Рис. 2. Интерфейс информационно-справочной системы «Электрические сети Иркутской области». На карте красным выделены ЛЭП, выбранные запросом.

**Информационно-аналитические системы для сбора и отображения показателей по территориям.** Одним из важных видов программных систем, которые были востребованы различными органами государственной власти, являются информационно-аналитические системы, предназначенные для сбора разнородной информации о состоянии населенных пунктов (городов) и районов области (далее территорий). Основное назначение таких систем — обеспечение удобного доступа к собираемой информации с возможностью ее быстрого поиска предметными специалистами для последующего анализа, как правило, уже в других программах. В качестве инструмента анализа использовался Excel, а также статистические пакеты, такие как Statistica или SPSS.

В общем случае территории образуют иерархию (дерево). Особенностью задачи является то, что точный состав собираемых показателей, как правило, заранее не определен и может постепенно изменяться (расширяться) по мере роста «аппетита» аналитиков или сбора новой информации. Показатели также образуют иерархию. Третью иерархию образуют интервалы времени, к которым относится собираемая информация (год/квартал/месяц и т. д.). Для хранения значений используются одна или несколько таблиц, индексированных по ключам показателей, территорий и интервалов времени.

В качестве исходной информации применялись в основном статистические данные, представленные в таблицах свободной формы (не обязательно реляционных) в документах Excel и ряда других форматов. Был предложен общий подход к организации импорта такой информации в БД системы. Импорт всегда делится на две стадии: преобразование исходных данных из различных источников к реляционному виду; импорт информации из реляционных таблиц в БД системы. При импорте из реляционных таблиц используются файлы настроек, в которых указывается, какие поля реляционной таблицы связываются с показателями, а какие содержат наименование территории и интервала времени. Такие файлы настроек могут многократно применяться к файлам с общей структурой при массовом вводе данных.

Может возникнуть вопрос: почему вообще требуется разбирать статистические сборники, нельзя ли взять эти данные непосредственно из БД службы статистики? При выполнении первых из таких проектов было установлено, что в БД собирается первичная информация, например, по 200 крупнейшим предприятиям области, а итоговые статистические показатели по всей области, распространяемые в сборниках, далее вычисляются на базе этой первичной информации с использованием так называемых досчетов по определенным статистическим методикам, причем в то время эти цифры попадали сразу в сборники, минуя БД. Таким образом, более простого способа получения обработанных статистических данных тогда не было.

Еще один важный вывод был получен при выполнении первого проекта по созданию информационно-аналитической системы рассматриваемого типа. Тогда предметные специалисты сами состав-

вили иерархический перечень из порядка 800 статистических показателей, которые они хотели бы видеть в системе. В итоге оказалось, что на деле из этого перечня удалось получить менее половины показателей, поэтому в дальнейших подобных проектах уже ставилась задача удобного структурирования реально имеющихся данных.

При создании информационно-аналитической системы для Главного управления сельского хозяйства Иркутской области были выявлены ограничения предложенного подхода: приходилось создавать в дереве показателей несколько сходных по структуре поддеревьев, поскольку многие показатели собирались сразу в нескольких разрезах. Например, несколько разных показателей (таких как поголовье скота, производство мяса и т. д.) могли собираться по видам собственности и видам животных. В результате приходилось выбирать конкретный порядок расположения этих разрезов в поддеревьях, например, сначала по видам собственности, затем (ниже) — по видам животных (или наоборот).

В начале 2000-х гг. одновременно возникли две задачи по быстрой (за 2–3 месяца) реализации двух информационно-аналитических систем, которые до этого не смогли сделать предыдущие подрядчики. При этом стало понятно, что требования к системам сходные, и их можно реализовать с использованием общего программного обеспечения. При реализации данных систем была сделана попытка учесть ограничения подхода с простым деревом показателей, в котором все они зависят только от времени и территории. Для этого с каждым показателем была сопоставлена информация о разрезе, в котором он собирается. Разрез описывается измерениями, от которых он зависит, и соответствующей ему таблицей в БД, где хранятся данные. Измерениями служат как ранее использовавшиеся территория и время, так и произвольное число других перечней характеристик — и иерархических, и списочных, например, уже упомянутые виды собственности или виды животных. По современным понятиям, разработанную на этих принципах систему можно отнести к направлению OLAP, но ее преимущество состоит в том, что в ней информация из всех гиперкубов совмещается в общем дереве показателей и может по желанию пользователя отображаться в общей таблице. Так была разработана программа MDAttr [5].

**Отображение цифровых карт в Интернет/Инtranет.** В 1990-е гг. готовых решений, позволяющих отображать цифровые карты в Интернет, было очень мало, а потребность в этой возможности появилась при создании различных информационно-аналитических систем. С ГИС ESRI ArcView поставлялось расширение ArcView Internet Map Server, клиентская часть которого была реализована в виде апплета. В результате его переработки были созданы клиентские части систем для Web-публикации цифровых карт из ряда ГИС: КАМАТ, Панорама, MapInfo и т. д. При этом, естественно, создавались и серверные части, общей особенностью которых было то, что изображения фрагментов карт передавались с сервера на клиент в растровом виде. Преимущество растеризации на сервере состоит в том, что на клиент не передаются сами векторные карты.

Недостатком растровых карт является их низкая интерактивность. С использованием этой технологии неудобно реализовывать такие возможности, как, например, всплывающие подсказки с информацией об объекте под курсором. При этом, если система рассчитана на работу в интранет, то передавать клиентскому приложению векторные карты достаточно безопасно. Поэтому был реализован еще один способ Web-публикации векторных карт — с использованием апплета, получившего векторные слои в его собственном формате. Для создания карт для этого апплета в конвертер из ГИС КАМАТ был добавлен соответствующий целевой формат. Пример работы этого апплета показан на рис. 2.

С появлением динамического HTML необходимость в использовании апплетов для отображения карт в растровом виде пропала. Было реализовано несколько вариантов клиентских интерфейсов, написанных с нуля (рис. 3). Еще через несколько лет для реализации возможности отображения карт с нашего сервера на фоне различных подложек Web-картографии (Google Maps, Yandex Maps, OpenStreetMap и т. д.) пришлось перейти на использование библиотеки LeafLet. Для отображения наших слоев в LeafLet используется ранее реализованный WMS сервер.

В последних наших проектах для публикации векторных карт используется формат SMD (Static Map Data), разработанный в ИДСТУ СО РАН. Основная идея при создании формата SMD состояла в том, что если заранее знать об отсутствии планов изменения карт, то эту информацию можно использовать для различных видов оптимизации. Были созданы конвертеры в формат SMD из ряда известных форматов (MIF, Shape, SXF). Особенность конвертера в формат SMD заключается в том, что он передает не только координаты и атрибуты объектов, но и способ их отображения, который конвертируется по возможности близко к оригиналу (некоторые условные знаки могут при этом упрощаться). Таким образом, после перевода в формат SMD внешний вид карты меняется очень незначительно, поэтому этот формат может быть использован в качестве промежуточного представления при публикации в Интернет векторных карт из различных исходных форматов (рис. 3).

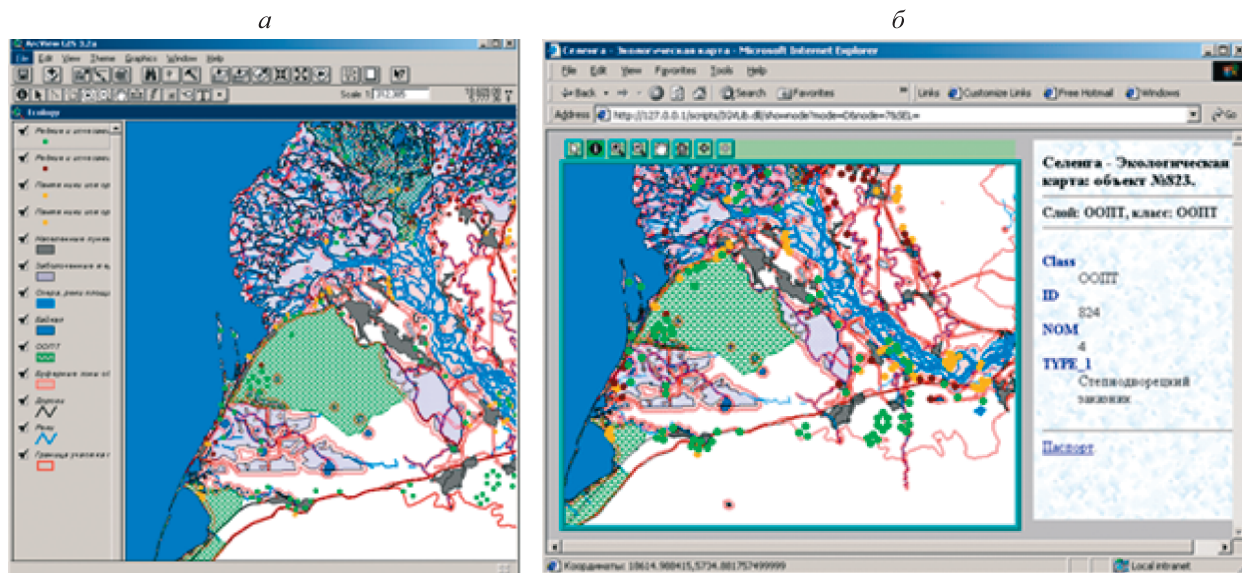


Рис. 3. Исходная карта в ArcView (а) и результат ее Web-публикации из формата SMD (б).

Основная особенность формата SMD — использование компиляции структур данных, в результате которой все данные карты объединяются в один блок памяти, для которого дополнительно создается таблица тех адресов в этом блоке, которые нуждаются в изменении после загрузки. Этот подход на порядок ускоряет загрузку данных в память, например, по сравнению с чтением тех же данных из исходного формата. В свою очередь, быстрая загрузка сокращает латентность первого обращения к карте при использовании формата SMD для web-публикации цифровых карт.

**Сервис получения фрагментов векторной топоосновы.** В ходе выполнения крупного научного проекта «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории» нам удалось получить официальную векторную топооснову Байкальской природной территории, исследованию которой был посвящен этот проект, в формате SXF ГИС Панорама. Потребовалось обеспечить удобный доступ к этой топооснове другим участникам проекта. При этом приходится учитывать следующие обстоятельства: нельзя просто опубликовать все полученные данные; большинство участников не имеют опыта работы с форматом SXF; нет смысла пытаться работать сразу со всей топоосновой, так как типичные ГИС не смогут эффективно обработать такие объемы данных.

Для решения задачи предоставления удобного доступа к фрагментам топоосновы в формате Share была разработана программа на базе ранее существовавшего конвертера из формата SXF. Дополнительно реализована возможность обрезки результирующей карты по контуру. Для выбора запрашиваемого фрагмента используется Web-интерфейс на фоне топоосновы, отображаемой из формата SMD.

Используемый конвертер, с одной стороны, объединяет данные нескольких трапеций, если все они пересекаются с запрашиваемым фрагментом, а с другой — разбивает эти данные по слоям, согласно информации из классификатора. Дополнительно для каждого слоя формируется стилевой файл (\*.qml) для QGIS, в который конвертируется информация из классификатора о способе отображения классов тех объектов, которые попали в данный слой. Кроме того, конвертером создается файл сценария на языке Python, после выполнения которого в QGIS в текущий проект добавляется группа слоев со всеми конвертированными данными, открытыми в правильном порядке.

**Формат MRG для представления растровых данных большого объема.** С появлением в открытом доступе файлов SRTM обозначилась потребность свободно просматривать эти данные как одно большое слитное изображение и, при необходимости, получать любые фрагменты этого изображения в удобном для дальнейшей обработки виде. Для этих целей был разработан формат MRG (Multi-Resolution Grid), позволяющий получать произвольные фрагменты целочисленных растровых данных большого объема, как с их базовым разрешением, так и с любыми меньшими с коэффициентом  $2^n$  разрешениями [6, 7]. Файл в формате MRG имеет меньший объем, чем исходные данные, сжатые такими архиваторами, как ZIP или RAR, но при этом, в отличие от таких архивов, допускает произ-

вольный доступ к любым фрагментам любого уровня детализации. Для многоканальных растровых данных разработан метод обратимой целочисленной декорреляции цветовых каналов, позволяющий дополнительно их сжать [8].

В 2023 г. в формате MRG была собрана целая коллекция глобальных моделей рельефа: Copernicus DEM [9], SRTM [10], FABDEM [11] и т. д., а также глобальное четырехканальное композитное изображение Hansen Forest [12]. Эти растровые изображения охватывают всю сухопутную территорию Земли с размером пикселя  $1'' \approx 30$  м. Также для формата MRG были разработаны: WMS-сервис, позволяющий публиковать эти данные для просмотра в Интернет, и WPS-сервис, позволяющий получать по запросу фрагменты растровых данных с желаемым уровнем детализации для дальнейшей обработки в формате GeoTIFF.

**Триангуляции Делоне.** Важной структурой данных, позволяющей работать с пространственной информацией, заданной на нерегулярной сетке, являются триангуляции. В ИДСТУ СО РАН разработана собственная программная библиотека для работы с триангуляциями и программа TINSmith, основанная на ее использовании [13]. Особенность библиотеки — это сочетание методов динамического хеширования [14] с использованием робастных предикатов [15]. Реализовано построение триангуляций Делоне с ограничениями и ряд более сложных оригинальных алгоритмов, позволяющих, например, строить качественную ЦМР по информации топоосновы, аппроксимировать растровые ЦМР с заданной точностью, выполнять морфинг карт, заливку треугольников по полигональному контуру и т. д.

В последние несколько лет с использованием ПО для работы с триангуляциями был выполнен целый ряд проектов по созданию совмещенных моделей рельефа (наземного с подводным) для оз. Байкал, Иркутского и ряда участков Братского водохранилища, нижнего бьефа Иркутской ГЭС [16, 17].

**Адресный план, как основа создания муниципальной ГИС.** Для Администрации г. Иркутска был разработан целый ряд программных систем в составе муниципальной геоинформационной системы (МГИС), наиболее важной и сложной из которых является «Адресный план г. Иркутска» [18]. Единый муниципальный информационный ресурс «Адресный план г. Иркутска» (далее Адресный план или АП) представляет собой «базовый» тематический слой МГИС, удостоверяющий местоположение и взаимное расположение объектов недвижимости, юридически правильные адреса которых зарегистрированы в едином общегородском справочнике адресов объектов недвижимости (Адресном реестре).

В большинстве городских информационных систем, в работе которых могут использоваться векторные карты, в качестве базовой карты города наиболее удобно использовать АП, а не полную топооснову. На топооснове содержится информация о большом количестве объектов, наличие которых затрудняет чтение карты при совмещении с другими специализированными слоями. Наличие на карте некоторых объектов и их атрибутов повышает ее уровень секретности, препятствуя использованию в открытой сети. В то же время регулярное обновление карты выполняется именно для топоосновы, поэтому наиболее эффективным способом получения актуального адресного плана является его автоматическая генерация по информации топоосновы (рис. 4).

На первом этапе создания АП была выполнена большая работа по согласованию информации об адресуемых объектах, содержащихся в Адресном реестре, на топооснове города, на карте БТИ, а также зданиях, видимых на космических снимках высокого разрешения. Для решения этих задач был создан целый ряд программ, например, предназначенных для полуавтоматического сопоставления двух векторных карт, или для сравнения векторной карты с космическим снимком [19]. Основным результатом этой работы стало уточнение информации топоосновы города.

Далее был разработан и сертифицирован конвертер адресного плана из топоосновы, выполняющий следующие операции: исключение объектов, не имеющих отношения к АП; исключение атрибутов объектов, не имеющих отношения к АП; объединение объектов топоосновы, представляющих собой единый объект с точки зрения АП, в обобщенные объекты.

Основные объекты АП (здания и улицы) являются площадными, поэтому операцию массового объединения необходимо реализовать именно для них. Для решения этой задачи был выбран подход, основанный на построении триангуляции с ограничениями по всем площадным объектам топоосновы, которые могут использоваться для формирования адресного плана [20], в ходе которого во все треугольники, находящиеся внутри контура объекта, заносится ссылка на него. При этом в триангуляции естественным образом формируется информация о соседстве между объектами. Далее используются правила из файла настроек, которые определяют, какие объекты исходной карты надо взять в результирующую, с какими соседними объектами их надо объединить, как выбрать значения атрибутов результирующего объекта.

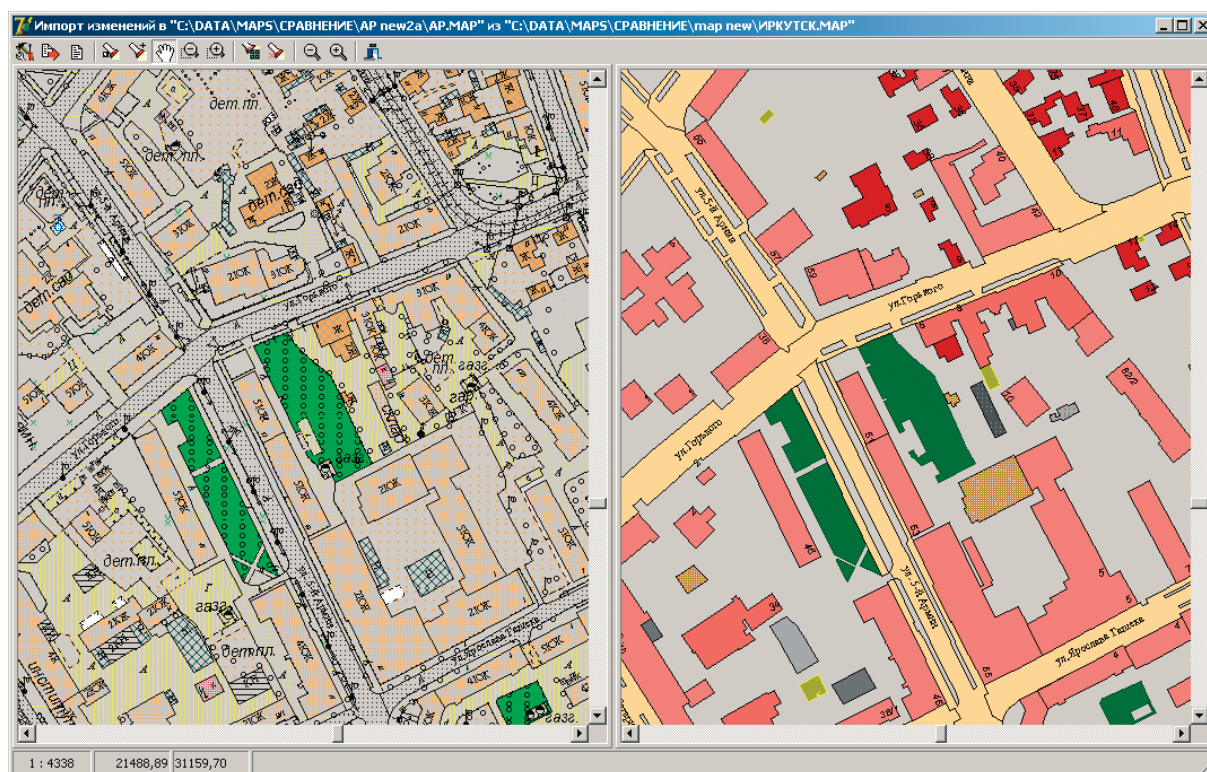


Рис. 4. Сравнение топоосновы с полученным по ней Адресным планом.

Другим многоплановым проектом, выполненным по заказу Администрации г. Иркутска, была разработка муниципальной информационной системы обеспечения градостроительной деятельности, при создании подсистем которой активно использовалась система ГеоАРМ. При реализации первоочередных задач ИСОГД был сделан акцент на создание ряда подсистем, обеспечивающих автоматизацию и ускорение процесса предоставления земельных участков [21].

**ГИС «Инвестора» г. Иркутска.** С целью повышения инвестиционной привлекательности территорий муниципалитетов разрабатываются и внедряются инвестиционные карты или ГИС «Инвестора». Создание таких систем требует интеграции информации о городской территории, содержащейся в БД и на электронных картах из большого количества существующих муниципальных информационных систем (МИС). В ИДСТУ СО РАН была разработана система ГИС «Инвестора» г. Иркутска [22].

Основным элементом ГИС «Инвестора» являлся информационный WEB-ресурс, который разработан на основе оригинальных технологий публикации пространственных и тематических данных с использованием механизмов декларативных спецификаций. Система позволяла получить интегральную информацию по выбранному пользователем фрагменту карты, например, найти число жителей в интересующем районе.

В качестве базовой топоосновы использовался Адресный план г. Иркутска. Информация для ГИС «Инвестора» извлекалась из тематических слоев МГИС и других МИС. Кроме того, у системы была собственная БД, предназначенная для хранения служебной информации, а также для быстрого добавления табличных данных, получаемых из внешних источников.

**Поддержка научных исследований (Геопортал).** С развитием сетей передачи данных возникла новая задача обеспечения обмена данными и методами их обработки между учеными разных предметных областей и организаций. Для решения этой задачи в 2008 г. началась разработка геопортала [23], который первоначально предполагалось использовать для сбора и предоставления метаданных. Они должны были описывать данные, владельцев, права доступа и ссылку на ресурс, на котором эти данные опубликованы. Эта версия геопортала не нашла применения, так как достаточно немного данных было готово к опубликованию.

На тот момент отсутствовали развитые инструменты для сбора и публикации пространственных данных в сети Интернет. Поэтому с 2010 г. в рамках геопортала началась разработка сервисов ввода и редактирования реляционных данных (система зарегистрирована под названием «Фарамант»).



С 2012 г. на основе сервисов ввода и редактирования реляционных данных создан, работает и постоянно развивается геопортал «Информационно-аналитическая система по фитообразию Байкальской Сибири» для проведения инвентаризации данных гербарных коллекций и аналитической поддержки ботанических исследований. Он разрабатывается совместно с отделом Сибирского института физиологии и биологии растений СО РАН «Биоразнообразие и природные ресурсы» и предназначен для публикации в электронном виде большого количества гербарных листов, до этого находившихся в основном в бумажном виде.

На основе ПО геопортала совместно с Институтом географии им. В.Б. Сочавы СО РАН (ИГ СО РАН) был создан «Экологический атлас Байкальского региона». В ходе работы над ним процесс добавления сервисов был автоматизирован для того, чтобы специалисты ИГ СО РАН могли создавать новые сервисы ввода и редактирования реляционных данных самостоятельно. Были значительно расширены возможности геопортала по стилизации карт при использовании только браузера.

В 2010 г. начался проект Российского фонда фундаментальных исследований совместно с монгольскими коллегами, касающийся моделирования загрязнений г. Улан-Батора. В рамках проекта ставилась задача предоставления инструмента для проведения сценарного моделирования. При этом постоянно разрабатывались новые методы обработки данных, развертывание и сопровождение которых на рабочих компьютерах монгольских коллег оказалось достаточно сложным процессом. Было принято решение проводить его на базе геопортала и предоставить удаленный доступ для запуска. Это привело к созданию нового направления — разработки вычислительных сервисов. Для унификации использования сервисов применялись стандарты Open Geospatial Consortium, что позволило подключать сервисы, разработанные разными коллективами, и реализовать геопортал как единую точку доступа к многообразным ресурсам и сервисам обработки. Его основными функциями являются: формирование готовых наборов карт, загрузка и выгрузка данных, регламентация доступа к ним, создание собственных данных, встроенный картографический web-клиент для просмотра картографических web-служб, применение сервисов обработки данных и т. д.

Сейчас геопортал в основном воспринимается как средство web-картографирования, в том числе с использованием спутниковых снимков. Геопортал представляет собой средство не только визуализации, но и сбора и анализа данных, т. е. является полноценной информационной системой (ИС), автоматизирующей и объединяющей работу исследователей, с развитыми функциями пространственного анализа.

**Обработка данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).** Байкальская природная территория (БПТ) обладает обширными и частично труднодоступными площадями. Большая площадь, сложный рельеф и слабая доступность БПТ обосновывают актуальность использования данных ДЗЗ (спутники миссии Sentinel-2, Канопус-В и т. д.) для ведения цифрового экологического мониторинга. В 2022 г. началась разработка методов, сервисов и компонентов обработки данных ДЗЗ [24].

С помощью сервисов ввода и редактирования реляционных данных разработаны следующие сервисы: каталог данных ДЗЗ; описание классов подстилающей поверхности ДЗЗ; каталог формирования обучающей выборки.

Для организации удобного поиска космоснимков и быстрого доступа к ним в рамках каталога данных ДЗЗ добавлена возможность отображения снимков на карте и реализованы компоненты загрузки космоснимков в системы хранения данных (СХД). Реализован поиск снимков с учетом типа сенсора, облачности, положения и даты.

Разработаны методы классификации пикселей космоснимков среднего разрешения, которые позволяют для каждого пикселя определить его класс — растительность, открытая почва, вода, антропогенные объекты и т. д. Для классификации космоснимков Sentinel-2 применялась сверточная нейронная сеть, принимающая решение о классификации пикселя по его окрестности  $64 \times 64$  пикселя (рис. 5). Обучение нейросети проводилось на 12 классах по 2300 образцов в каждом.

Для оценки результатов работы классификатора произведена разметка космоснимков, не участвовавших в обучении, и сформирована верификационная выборка. По результатам классификации проведено попиксельное сравнение с выполненной разметкой. Средняя точность составляет 0,9414. Результаты классификации могут использоваться для мониторинга состояния лесного фонда, оценки влияния изменений климата на ландшафт, анализа динамики застройки, инвентаризации сельхозугодий и т. д.

**Цифровой экологический мониторинг.** Значимый вклад в развитие ГИС-технологий в ИДСТУ СО РАН внес крупный научный проект «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории

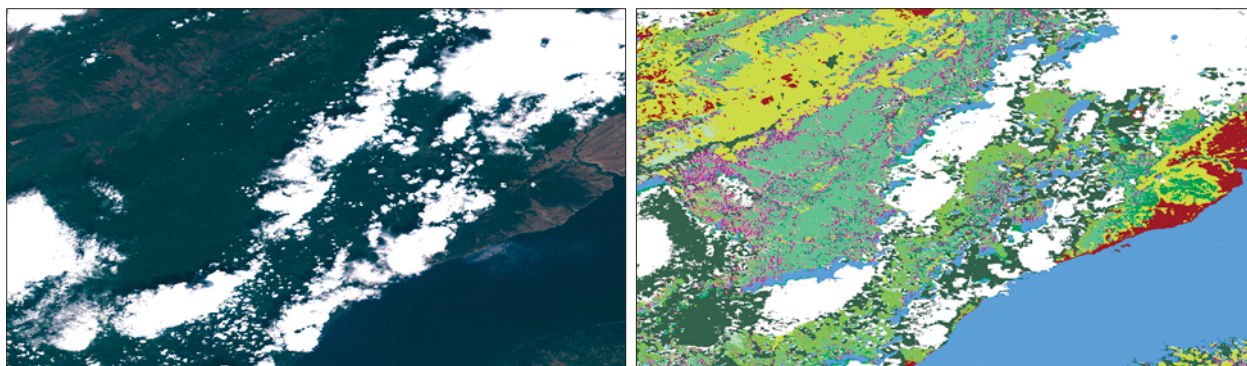


Рис. 5. Результаты классификации космоснимка нейронной сетью.

(БПТ)» [25]. В рамках проекта в Центре коллективного пользования «Интегрированная информационно-вычислительная сеть ИИЦ ФАНО» (Телекоммуникационный центр коллективного пользования «Интегрированная информационно-вычислительная сеть Иркутского научно-образовательного комплекса») (ЦКП ИИВС ИРНОК) разработана и развернута цифровая платформа (ЦП) [26], обеспечивающая сбор данных от распределенной сети комплексного экологического мониторинга, хранение, обработку больших массивов гетерогенных пространственно-временных данных, а также анализ и прогнозирование экологической обстановки на основе комплекса математических моделей, сервисов и методов машинного обучения.

Цифровая платформа мониторинга БПТ включает средства доставки, хранения пространственно-временных данных в СХД и их обработки на основе цифровых сервис-ориентированных и сквозных технологий, декларативных спецификаций и интеллектуализации, а также инфраструктуру развертывания прикладных систем, средства разработки и интеграции прикладных сервисов участниками мониторинга БПТ для принятия решений. Для повышения эффективности проведения прикладных научных исследований и интеграции прикладных сервисов ЦП разработана на основе вычислительной модели композиции сервисов, которая позволяет объединять сервисы, созданные разными коллективами. В рамках модели предложен метод автоматической композиции сервисов на основе статистических данных.

В основе Цифровой платформы мониторинга БПТ лежит разработанное в ИДСТУ СО РАН ПО геопортала. Для хранения и совместного доступа к информации используется система NextCloud. Для обработки данных может применяться среда Jupyter Notebook. Для организации многопользовательской работы используется JupyterHub, который позволяет настраивать рабочее пространство: директории пользователей, выбранный Docker образ, заданные характеристики вычислительных узлов и другие параметры. Интеграция JupyterHub, NextCloud и геопортала происходит на уровне системы хранения данных и общей схемы авторизации. Регистрация пользователей производится в системе NextCloud, при этом ему предоставляется директория в СХД, в которой могут храниться собственные данные. Эта директория также доступна в геопортале и Jupyter Notebook. Особое внимание в рамках КНП уделяется методам мониторинга на основе обработки данных ДЗЗ. Собран значительный объем информации: космоснимки Sentinel-2 на Иркутскую область и Республику Бурятия за три года занимают более 57 терабайт (21 тыс. снимков).

В результате работ по КНП разработаны и развернуты несколько десятков сервисов, баз данных и слоев карт, таких как: получения и обработки данных ДЗЗ; предоставления цифровой топоосновы; моделирования динамики лесных ресурсов; сейсмического районирования; БД уровней отдельных рек (Иркут, Селенга, Баргузин), и т. д.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За рассмотренный период времени в ИДСТУ СО РАН было выполнено много проектов и программных разработок, в той или иной степени использующих технологии ГИС. Часть из них были по необходимости кратко рассмотрены в данной статье, а некоторые разработки были более подробно описаны в вышедших ранее публикациях.

Особенностью коллектива ИДСТУ СО РАН является то, что его представители не ограничиваются освоением и конфигурированием готовых программ, а иногда создают свои программные библиотеки, форматы данных, алгоритмы и методы обработки пространственных данных.

Исследования в области ГИС не теряют свою актуальность хотя бы потому, что постоянно растут объемы доступных пространственных данных и возможности вычислительной техники, что позволяет сегодня работать с такими объемами данных, о которых еще недавно нельзя было и мечтать. Например, сейчас можно в одном файле сохранить с возможностью быстрого произвольного доступа глобальную модель рельефа с разрешением 30 м/пиксель или массово обрабатывать все полученные за десяток лет космоснимки некоторой территории, как это было описано в данной статье.

Наши дальнейшие исследования в области ГИС направлены на разработку новых методов извлечения информации из данных ДЗЗ, включая современные методы машинного обучения, поддержку использования новых типов пространственных данных, применение и разработку новых алгоритмов обработки и анализа пространственных данных, развитие возможностей ПО геопортала для организации совместной работы исследователей из разных предметных областей.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках гранта на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (075-15-2024-533, проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Условные** знаки для топографических планов масштабов 1:5 000, 1:2 000, 1:1 000, 1:500 / Роскартография. — М.: ФГУП «Картогеоцентр», 2005 г.
2. **Бычков И.В., Хмельнов А.Е., Федоров Р.К., Шигаров А.О., Ружников Г.М.** Система преобразования картографической информации из формата DXF в формат ГИС «Панорама» // Горный информационно-аналитический бюлл. — 2009. — № S18. — С. 191–194.
3. **Фереферов Е.С., Бычков И.В., Хмельнов А.Е.** Технология разработки приложений баз данных на основе декларативных спецификаций // Вычисл. технологии. — 2014. — Т. 19, № 5. — С. 85–100.
4. **Bychkov I.V., Hmelnov A.E., Fereferov E.S., Ruznikov G.M., Gachenko A.S.** Methods and tools for automation of development of information systems using specifications of database applications // Proc. of the 3rd Russian-Pacific Conf. on Computer Technology and Applications (RPC 2018) [Электронный ресурс]. — <https://ieeexplore.ieee.org/document/8482170> (дата обращения 05.06.2024).
5. **Хмельнов А.Е., Бычков И.В., Маджара Т.И., Ружников Г.М., Гаченко А.С., Фереферов Е.С.** Внедрение современных информационных технологий в региональных проектах // Вестн. Новосиб. ун-та. Сер. Информ. технологии. — 2008. — Т. 6, № 1. — С. 15–24.
6. **Хмельнов А.Е.** Формат файлов MRG для компактного представления и высокоскоростной декомпрессии матриц высот большого объема // Вычислит. технологии. — 2015. — Т. 20, № 1. — С. 63–74.
7. **Хмельнов А.Е.** Алгоритмы сжатия без потерь разностных целочисленных последовательностей при помощи оптимизации их разбиения на интервалы с постоянной битовой глубиной значений // Вычислит. технологии. — 2015. — Т. 20, № 3. — С. 75–98.
8. **Хмельнов А.Е.** Обратимая целочисленная аппроксимация преобразований цветового пространства для сжатия без потерь цветных растровых данных большого объема // Компьютерная оптика. — 2022. — Т. 46, № 3. — С. 492–505. — DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1052
9. **Copernicus DEM** — Global and European Digital Elevation Model (COP-DEM) [Электронный ресурс]. — <https://spacedata.copernicus.eu/collections/-copernicus-digital-elevation-model> (дата обращения 05.06.2024).
10. **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Global.** Distributed by OpenTopography [Электронный ресурс]. — <https://portal.opentopography.org/-datasetMetadata?otCollectionID=OT.042013.4326.1> (дата обращения 05.06.2024).
11. **Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J.** A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // 2022 Environ. Res. Lett. 17 024016 [Электронный ресурс]. — <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac4d4f/pdf> (дата обращения 05.06.2024).
12. **Hansen M.C., Potapov P., Moore R., Hancher M.** High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. Science 342,850-853(2013) [Электронный ресурс]. — <https://www.researchgate.net/publication/258529161-High-Resolution-Global-Maps-of-21st-Century-Forest-Cover-Change> (дата обращения 05.06.2024).
13. **Gachenko A.S., Hmelnov A.E., Hmelnova T.F., Ruznikov G.M.** The use of triangulation processing algorithms for the construction of combined model of the underwater and above-water terrain of the bed of the Bratsk Reservoir // Proc. 1st Intern. Geographical Conf. of North Asian Countries on China-Mongolia-Russia Economic Corridor: Geographical and Environmental Factors and Territorial Development Opportunities. — 2018. — Vol. 190, N 1 [Электронный ресурс]. — <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/17551315/190/1/-012028/pdf> (дата обращения 05.06.2024).
14. **Скворцов А.В.** Триангуляция Делоне и ее применение. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2002. — 128 с.
15. **Shewchuk J.R.** Adaptive precision floating-point arithmetic and fast robust geometric predicates // Discrete & Computational Geometry. — 1997. — N 18. — P. 305–363.

16. Хмельнов А.Е., Гаченко А.С. Источники информации о подводном, прибрежном и наземном рельефе и их применение для построения совмещенных моделей рельефа // Вычислит. технологии. — 2022. — Т. 27, № 5. — С. 55–68. — DOI: 10.25743/ICT.2022.27.5.006
17. Хмельнов А.Е., Гаченко А.С. Алгоритмы уточнения модели прибрежного рельефа по данным воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки // Вычислит. технологии. — 2023. — Т. 28, № 6. — С. 57–67. — DOI: 10.25743/ICT.2023.28.6.006
18. Ружников Г.М., Хмельнов А.Е., Фереферов Е.С., Гаченко А.С., Федоров Р.К., Попова А.К., Новицкий Ю.А., Парамонов В.В., Шигаров А.О., Бычков И.В. Технология создания и ведения информационной системы «Адресный план» с использованием крупномасштабных электронных карт // Горный информационно-аналитический бюлл. — 2009. — № S18. — С. 176–180.
19. Фёдоров Р.К., Бычков И.В., Ружников Г.М., Хмельнов А.Е., Гаченко А.С., Фереферов Е.С., Шигаров А.О. Программная система актуализации векторной карты зданий и сооружений по космоснимку // Горный информационно-аналитический бюлл. (науч.-техн. журнал). — 2009. — Т. 18, № 12. — С. 141–145.
20. Ружников Г.М., Хмельнов А.Е., Новицкий Ю.А., Бычков И.В. Генерализация площадных объектов векторной карты с использованием алгоритмов обработки триангуляции // Горный информационно-аналитический бюлл. — 2009. — № S17. — С. 158–162.
21. Хмельнов А.Е., Фереферов Е.С., Гаченко А.С., Ружников Г.М. Муниципальная информационная система обеспечения градостроительной деятельности // Вычисл. технологии. — 2008. — Т. 13, № S1. — С. 11–16.
22. Хмельнов А.Е., Ружников Г.М., Гаченко А.С., Михайлов А.А. Применение ГИС- и WEB-технологий для создания геоинформационной системы «Инвестор» // Вычисл. технологии и Вестн. КАЗНУ: совм. Вып. Сер. Математика, механика, информатика. — 2015. — Т. 20, № 3 (86). — С. 235–241.
23. Бычков И.В., Ружников Г.М., Парамонов В.В., Шумилов А.С., Федоров Р.К. Инфраструктурный подход к обработке пространственных данных в задачах управления территориальным развитием // Вычисл. технологии. — 2018. — Т. 23, № 4. — С. 15–31. — DOI: 10.25743/ICT.2018.23.16488
24. Avramenko Y.V., Popova A.K., Fedorov R.K. Sentinel-2 data classifications for the Baikal natural area // Proc. of SPIE: 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics (Moscow, 5–9 July 2021). — 2021. — Vol. 11916. — P. 302–305. — DOI: 10.1117/12.2603482
25. Бычков И.В., Гладкочуб Д.П., Ружников Г.М. Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории. — Новосибирск: СО РАН, 2022. — 345 с.
26. Бычков И.В., Маджара Т.И., Новопашин А.П., Фереферов Е.С., Феоктистов А.Г., Федоров Р.К. Информационно-вычислительные ресурсы ИРНОК: инфраструктура, данные, приложения // Вычисл. технологии. — 2023. — Т. 28, № 3. — С. 117–135.

*Поступила в редакцию 10.06.2024*

*После доработки 19.06.2024*

*Принята к публикации 11.07.2024*