

Том 25, номер 5
ISSN 0207 - 4028

Сентябрь-Октябрь 2006

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ТИХООКЕАНСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР
АКАДЕМИК А.И. ХАНЧУК



<http://itig.as.khb.ru/POG>

СОДЕРЖАНИЕ

<i>B.B. Наумова.</i> Состояние и перспективы развития геоинформатики в геологических науках на Дальнем Востоке России	3
--	---

ГИС в геологических исследованиях

<i>B.B. Наумова, Р.М. Миллер, В.Дж. Ноклеберг, М.И. Патук, М.Ю. Капитанчук, Л.М. Парфенов, А.И. Ханчук, С.М. Родионов.</i> ГИС “Минеральные ресурсы, металлогенезис и тектоника Северо-Востока Азии”	8
<i>С.В. Ворошин, А.С. Зинкевич, Е.Э. Тюкова.</i> Региональные геоинформационные системы для геологических исследований: опыт создания и анализа	22
<i>В.В. Акинин, С.В. Ворошин.</i> Интеграция геохронологических баз данных и ГИС для анализа эволюции магматизма на Северо-Востоке Азии	39
<i>А.Н. Петров, И.Н. Горячев, С.М. Лямин.</i> Геометрические модели геологических структур и геоинформационные системы	51
<i>А.В. Костин, А.С. Гольцова, М.С. Лысенко, Т.В. Труфакина.</i> Прогнозирование благороднометаллических рудных узлов Западного Верхоянья (Восточная Якутия) с использованием ГИС	62

Информационные системы для геологии

<i>А.А. Сорокин.</i> Комплексная информационная система работы с фондовыми геологическими материалами “Геофонд”	72
--	----

Мониторинг природных систем

<i>А.Н. Четырбоцкий.</i> Мониторинг состояний многокомпонентных объектов в геоинформационных системах	81
<i>В.И. Синюков, В. А. Глухов, Е.П. Маева, О.В. Рыбас.</i> Геоинформационные технологии в социально-экологическом мониторинге зоны влияния Бурейской ГЭС	88
<i>Н.В. Бердников, В.Л. Рапопорт, О.В. Рыбас, Т.И. Пельых, Г.Ф. Золотухина, В.Е. Зазулина.</i> Мониторинг загрязнения экосистемы р. Амур в результате аварии на химическом заводе в г. Цзилинь (КНР): нитробензол	94

Анализ геологических полей

<i>И.Ю. Рассказов.</i> Численное моделирование современного поля тектонических напряжений в области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского поясов	104
<i>Б.А. Казанский.</i> Батиметрический анализ Тихого океана по цифровым данным ЕТОРО 2'	115

CONTENTS

<i>V.V. Naumova.</i> The status and prospects for development of geoinformatics in geological sciences in the Russian Far East	3
 GIS in geological investigations	
<i>V.V. Naumova, R.M. Miller, W.J. Nokleberg, M.I. Patuk, M.Yu. Kapitanchuk, A.I. Khanchuk, S.M. Rodionov.</i> GIS “Mineral resources, mineralogenesis, and tectonics of Northeast Asia”	8
<i>S.V. Voroshin, A.S. Zinkevich, Ye.E. Tyukova.</i> Regional geoinformation systems for geologic investigations: creation and analysis experience	22
<i>V.V. Anikin, S.V. Voroshin.</i> Integration of chronological data bases and GIS for analysis of evolution of magmatism in Northeast Asia	39
<i>A.N. Petrov, I.N. Goryachev, S.M. Lyamin.</i> Geometric models of geological structures, and geoinformation systems	51
<i>A..V. Kostin, A.S. Goltsova, M.S. Lysenko, T.V. Trufakina.</i> Application of GIS for prediction of noble metal ore clusters of West Verkhoyanye (East Yakutia)	62
 Information systems for geology	
<i>A.A. Sorokin.</i> Complex information system of work with the “Geofond” fund geological materials	72
 Monitoring of natural systems	
<i>A.N. Chetyrbotsky.</i> Monitoring of conditions of multicomponent objects in geoinformation systems	81
<i>V.I. Sinyukov, V.A. Glukhov, Ye.P. Maeva, O.V. Pybas.</i> Geoinformation technologies in social-and-ecological monitoring of the zone affected by the Bureya hydroelectric power station	88
<i>N.V. Berdnikov, V.L. Rapoport, O.V. Rybas, T.I. Pelykh, G.F. Zolotukhina, V.Ye. Zazulina.</i> Monitoring of the Amur River ecosystem pollution resulting from the accident at the chemical plant in Jilin (China): nitrobenzene	94
 Analysis of geological fields	
<i>I.Yu. Rasskazov.</i> Numerical simulation of the present-day tectonic stress field in the Central Asia and Pacific belts junction area	104
<i>B.A. Kazansky.</i> Bathymetric analysis of the Pacific Ocean based on theETOPO 2' digital data	115

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГЕОИНФОРМАТИКИ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ НАУКАХ НА ДАЛЬНЕМ ВОСТОКЕ РОССИИ

B.B. Наумова

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток

В статье приведено определение геоинформатики как самостоятельного научного направления и перечислены основные области исследований. Описано состояние исследований в геоинформатике в геологических науках в специализированных подразделениях Дальневосточного отделения Российской Академии Наук. Обрисованы перспективы совместных исследований этих подразделений.

Ключевые слова: геоинформатика, ГИС, региональные геологические ГИС, базы геологических данных, Дальний Восток.

Геология оперирует огромными объемами эмпирических данных, решая проблемы выбора стратегии поисков месторождений полезных ископаемых и развития горной промышленности. Поэтому именно она явилась одной из первых сфер научно-практической деятельности, в которой около 40 лет назад начали внедряться математические методы и компьютерные технологии.

В настоящее время геологические ведомства и горнодобывающие компании всех развитых стран мира очень активно используют ГИС в своей деятельности. И это не удивительно. Ведь они оперируют данными, имеющими отчетливую, зачастую детальную, пространственную привязку. А для хранения этих данных, быстрого удобного доступа к ним на основе местоположения и создания на их основе высококачественных карт разного назначения технология ГИС подходит наилучшим образом. Внедрение ГИС в геологическую отрасль началось несколько десятков лет назад и в значительной мере способствовало развитию самих ГИС-технологий.

ГИС-технологии в геологии использовались для решения разного класса задач: ведения баз пространственных данных; представления в картографическом виде географических планов и разрезов месторождений; проведения технико-экономического анализа месторождений; поддержки освоения и промышленной разработки месторождений полезных ископаемых и др.

Геоинформатика в качестве самостоятельного научного направления началась с этапа внедрения

ГИС-технологий и интенсивно развивается, в том числе и в геологических науках, с середины 90-х годов.

Геоинформатика – это область науки и техники, отражающая и изучающая природные и социально экономические геосистемы, их взаимодействие и развитие посредством компьютерного моделирования на основе информационных систем и технологий, баз данных и баз знаний [3].

В задачи геоинформатики входит изучение общих свойств геоинформации, закономерностей и методов ее получения, фиксации, накопления, обработки и использования, а также развитие теории, методологии и технологий создания геоинформационных систем с целью сбора, систематизации, хранения, анализа, преобразования, отображения и распространения пространственно-координированных данных.

Основные области исследований геоинформатики:

1. Теоретические и экспериментальные исследования в области развития научных и методических основ геоинформатики.
2. Технические средства сбора, регистрации, хранения, передачи и обработки геоинформации с использованием вычислительной техники.
3. Геоинформационные системы (ГИС) разного назначения, типа, пространственного охвата и тематического содержания.
4. Базы и банки цифровой информации по различным предметным областям, а также системы управления базами данных.

5. Базы знаний по разным предметным областям.

6. Математические методы, математическое, информационное, лингвистическое и программное обеспечение для ГИС.

7. Геоинформационное картографирование и другие виды геомоделирования, системный анализ многоуровневой и разнородной геоинформации.

8. Компьютерные геоизображения новых видов и типов, анимационные, мультимедийные, виртуальные и другие электронные продукты.

9. Геоинформационные инфраструктуры, методы и технологии хранения и использования геоинформации на основе распределенных баз данных и знаний.

10. Телекоммуникационные системы сбора, анализа, обработки и распространения пространственно-временной информации.

11. Взаимодействие геоинформатики, картографии и аэрокосмического зондирования.

В настоящее время исследования в области геоинформатики в геологических науках ведутся в специализированных подразделениях Дальневосточного отделения Российской Академии Наук.

ЛАБОРАТОРИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Научные исследования ведутся по теме “Основные принципы и модели накопления, передачи, хранения, обработки и представления”.

Основные направления исследований:

- Принципы разработки региональных геологических ГИС;
- Организация хранения и обеспечение доступа к массивам геологической информации в Интернет;
- Анализ геологических данных и моделирование геологических процессов с использованием математических методов.

В последние годы в лаборатории проведены следующие работы:

· Разработана концепция создания региональных геологических ГИС [4]. Она заключается в рассмотрении пространственных объектов исследования как целостной сложной системы со своей специфической внутренней организацией и причинно-следственными связями между отдельными ее элементами. Инструментом системного подхода является ГИС как способ отображения реальной действительности, при котором для изучения оригинала применяется специально построенная модель, воспроизводящая существенные свойства и характеристики исследуемого реального объекта (группы объектов) и

процесса. В этом случае данные ГИС должны быть основаны на единой геологической концепции, геологические объекты – описаны взаимосвязанными признаками, основанными на общих геологических классификациях, цифровые карты – построены на единой топографической (географической) основе и иметь согласованные между собой легенды.

· Создана ГИС “Минеральные ресурсы, металлогенезис и тектоника Северо-Востока Азии” (см. статью В.В. Наумовой с соавторами в этом номере журнала). ГИС осуществляет хранение, обработку, доступ, отображение и распространение картографической и атрибутивной информации о геологических объектах Восточной и Южной Сибири, юга Дальнего Востока России, Монголии, Северо-Восточного Китая, Кореи и Японии. Функциональные возможности созданной ГИС позволяют проводить анализ взаимосвязей и взаимозависимостей между геодинамическими, минерально-ресурсными и металлогеническими данными, что дает геологам возможность получать новую информацию о тектонических и металлогенических характеристиках и их эволюции для Северо-Востока Азии. Программы организации поисковых запросов от картографической информации в среде ArcView к описаниям в БД Access, а также обратных запросов позволяют решать нестандартные задачи поиска информации в ГИС. Созданное программное обеспечение является универсальным.

ОТДЕЛ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО КОМПЛЕКСНОГО НАУЧНО- ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА

Цель исследований: развитие методов создания региональных ГИС, совершенствование методологии анализа данных с использованием ГИС и моделирование геологических процессов на их основе.

В задачи исследований отдела входит: создание региональных ГИС конечного пользователя; разработка методических основ работы с информацией на основе ГИС-технологий [2]; анализ геологических данных с помощью ГИС; проведение моделирования на основе ГИС технологий; адаптация методов дистанционного зондирования к анализу изображений микрообъектов.

В последние годы в лаборатории развивается направление, связанное с созданием ГИС для Magadanской области [1]. Подход, используемый при этом – это компоновка тематических ГИС, направленных на решение ограниченного круга проблем. Использование открытых форматов и стандартов позволяет рассматривать их как кирпичи более крупных региональных ГИС. Именно по такому пути формируются

геологические ГИС Магаданской области. Региональная геологическая ГИС “Геология и полезные ископаемые Верхне-Колымского региона” содержит графическую и атрибутивную информацию 25 листов изданной государственной геологической карты масштаба 1: 200 000. Территория, включеная в ГИС, охватывает крупнейшую золоторудную провинцию России. Структура ГИС представлена: (1) геологическим строением – 9381 полигон; (2) дизъюнктивными нарушениями – 4073 объекта; (3) дайками и жилами – 9786 объектов; (4) месторождениями и проявлениями рудных полезных ископаемых – 2471 объект; (5) россыпными месторождениями – 1151 объект. ГИС выполнена как цельный проект в реальных географических координатах в программе ArcView GIS под Windows. Атрибутивная информация описываемой ГИС включает в себя несколько баз данных, связанных с соответствующими геологическими объектами на карте. База данных по стратифицированным подразделениям включает в себя возраст отложений, названия свит, литологический состав и мощность. База данных по интрузивным массивам состоит из данных по геологическому и абсолютному возрасту пород, названию пород, названию массивов, химическому и минеральному составу пород. База данных по дизъюнктивным нарушениям характеризует тип, направление и величину смещения. База данных по дайкам и жилам включает в себя геологический и абсолютный возраст, тип пород или жил, направление простирания. База данных по месторождениям и рудопроявлениям состоит из номера объекта, названия, трех координат, ведущего и попутных полезных компонентов и их содержания, характеристики вмещающих пород, литературных источников. База данных по россыпным месторождениям состоит из номера россыпи, названия, ведущего и попутных металлов, пробности золота и литературных источников. Геофизические данные включают в себя результаты аэромагнитной съемки территории. ГИС может служить в качестве информационно-справочной системы, но главная цель ее создания – анализ пространственных закономерностей размещения золотой минерализации, гранитоидов и главных тектонических структур Верхне-Колымского региона.

ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТА ГЕОЛОГИИ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

Одной из главных задач центра является разработка и внедрение информационных технологий для обработки различных геологических данных. Такая деятельность сводится не только к использованию ГИС-технологий для представления и визуа-

лизации данных по определенной территории, но и созданию комплексных информационных систем, построенных на применении широкого спектра методов и технологий.

В качестве примера такой разработки можно привести Информационную систему для работы с фондовой тематической информацией (на примере ФГУ “ТФИ по Амурской области”) (см. статью А.А. Сорокина в этом номере журнала).

Программный комплекс состоит из трех компонент и реализующих в своей основе технологии АРМ:

- Модуль “Программа сбора и классификации геологической и природоресурсной информации – ГеоФонд-Д” (АРМ “Оператор”).

- Модуль “Программа учета и статистики доступа к геологической и природоресурсной информации – ГеоФонд-С” (АРМ “Администратор”).

- Модуль “Программа доступа к геологической и природоресурсной информации – ГеоФонд-П” (АРМ “Пользователь”).

Возможности программ существенно расширены за счет интеграции в их состав элементов ГИС, которые реализованы с помощью элемента управления ActiveX MapInfo MapX 5.0. Основная рабочая область, на которой строится взаимодействие с пользователем, – цифровая карта региона, в рамках которой ведутся работы по сбору и учету фондовых геологических материалов. Используя разработанные компоненты, можно осуществлять операции по изменению масштаба, центрирование, манипулирование порядком расположения и способом отображения слоев карты. В противоположность статической составляющей, геологические объекты являются динамической сущностью – иными словами, выводятся на карте непосредственно в процессе отображения. Пользователь может выполнять произвольные операции с геологическими объектами – добавлять, удалять, изменять расположение, тип объекта, и др. Структурированная информация о геологических объектах, зарегистрированных в системе, хранится в базе данных MySQL. Все связи между АРМ и серверами данных и приложений построены на основе разноуровневой архитектуры “клиент-сервер” с применением протоколов TCP/IP.

ЛАБОРАТОРИЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИНСТИТУТА ТЕКТОНИКИ И ГЕОФИЗИКИ

Тема исследований лаборатории – “Геологогеофизическое моделирование важнейших структурных элементов Востока Азии на основе геоинформационных систем и технологий / Геоэкологический мониторинг”.

Основные достижения лаборатории:

- ГИС-версия тектонической карты области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского складчатых поясов масштаба 1:1 500 000.
- ГИС-обеспечение Геолого-геофизического атласа области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского складчатых поясов масштаба 1: 5 000 000.
- ГИС “Минерагеническая карта Амурской области”, масштаб 1: 500 000.

Интересные результаты получены сотрудниками лаборатории по применению ГИС-технологий в социально-экологическом мониторинге зоны влияния Бурейской ГЭС (см. статью В.И. Синюкова с соавторами в этом номере журнала). В лаборатории создана система цифровых топографических и специальных тематических карт разных масштабных уровней. Карты использованы для картографического отображения, анализа и интегрирования данных по основным разделам мониторинга: уровню заполнения водохранилища, водной среде, животному миру, ихтиологии, почвам, растительности, метеонаблюдениям.

За время работ был сформирован банк данных по дистанционному зондированию зоны Бурейской ГЭС. На основе данных SRTM в лаборатории построена трехмерная модель рельефа на всю область мониторинга. Эта модель использовалась при расчете уровней заполнения Бурейского водохранилища, анализе форм рельефа, выявлении молодых, потенциально сейсмоопасных зон разломов.

ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТА ВУЛКАНОЛОГИИ И СЕЙСМОЛОГИИ

Основная тема исследований – создание ГИС и баз данных вулканических и связанных с ними процессов, сейсмологических баз данных.

Важнейшие результаты:

- Созданы ГИС “Геодинамические полигоны Камчатки”, “Новейший вулканизм Камчатки”.
- Реализованы базы данных: “Анализы пород вулканов Камчатки” (силикатный анализ, редкие элементы, редкоземельные элементы), “Аквагеохим” (содержит химические, физико-химические параметры и газовые анализы образцов природных вод Камчатки и Курильских островов), “Геохимический мониторинг ртути” (используется для прогнозирования крупных сейсмических событий), “Аналитические данные по литогеохимии Нг”, “Каталоги голоценовых, активных и подводных вулканов Камчатки и Северо-Курильского региона”.
- Созданы цифровые карты природных ресурсов и антропогенной сферы муниципальных образова-

ний Камчатской области, карта вулканической опасности Ключевской группы вулканов, карты по районам исследований сотрудников института, прежде всего районам вулканов и термальных источников (масштабы карт 1:100 000 и 1:300 000).

Часть из представленных в этом номере журнала работ была доложена в 2004 году во Владивостоке на Международном совещании “Металлогенез Северо-Восточной Пацифики: тектоника, магматизм и металлогенез активных континентальных окраин” в рамках работы секции “ГИС и базы данных в металлогенезе и тектонике” [6].

Совместные усилия компьютерных подразделений геологических институтов ДВО РАН последние два года в основном были сосредоточены на создании Корпоративной сети Дальневосточного отделения РАН [5].

В 2005 году была создана региональная академическая телекоммуникационная сеть, объединяющая научные институты и организации Дальневосточного отделения РАН, расположенные в городах Владивосток, Хабаровск, Благовещенск, Магадан, Петропавловск-Камчатский, Южно-Сахалинск, Биробиджан, Комсомольск-на-Амуре.

Создание физического каркаса Корпоративной сети ДВО РАН осуществлено на основе объединения существующей наземной инфраструктуры ДВО РАН с вновь созданными сегментами сетей научных Северо-Восточного, Камчатского, Сахалинского центров, с использованием спутниковых симметричных дуплексных каналов связи.

Каркас сети и региональные инфраструктуры построены на основе современных технологий передачи данных с использованием наземных и спутниковых каналов связи, волоконно-оптических каналов, беспроводных оптических технологий, новейших стандартов передачи данных через медные линии. Внедряемые системы управления и контроля трафика позволяют обеспечить эффективное функционирование стандартных и корпоративных сервисов Сети.

В г. Хабаровске Корпоративная сеть ДВО РАН интегрирована в глобальные научно-образовательные сети RBNET и GLORIAD двумя каналами, суммарной емкостью 20 Мбит/сек.

В настоящий момент можно считать, что сетевая инфраструктура ДВО РАН создана, и нужно увеличивать усилия по организации использования Сети в интересах научных исследований в Дальневосточном отделении РАН.

На современном этапе развития информационных ресурсов ДВО РАН возникает задача предостав-

ления пользователям Интернет централизованного доступа к территориально распределенным, разнородным геологическим информационным ресурсам Отделения через единые пользовательские интерфейсы на основе правил организации доступа. При этом данные предполагается размещать по месту своего создания для наиболее эффективного использования в узлах Сети ДВО РАН, удаленных друг от друга на большие расстояния.

Задача может быть реализована созданием большого распределенного программно-информационного комплекса, включающего в себя множество WEB-серверов, FTP-серверов, серверов каталогов, серверов управления базами данных, собственно баз данных и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ворошин С.В., Мельник В.Г., Зинкевич А.С. Региональные геоинформационные системы по геологии и полезным ископаемым в Магаданской области. ARCREVIEW, ООО Дата+, 2000. №3 (14). С. 7.
2. Ворошин С.В. Метаморфогенное золото-кварцевое оруденение Верхнее Колымского региона и анализ закономерностей размещения месторождений методами ГИС: Автoref. дис... д-ра геол.-минер. наук. М., 2005. 42 с.
3. Лурье И.К. Геоинформатика. Учебные геоинформационные системы. Москва: МГУ, 1997.
4. Наумова В.В. Концепция создания региональных геологических ГИС (на примере ГИС “Минеральные ресурсы, минералогенезис и тектоника Северо-Восточной Азии”): Автореф. дис... д-ра геол.-минер. наук. Иркутск, 2004. 47 с.
5. Ханчук А.И., Сорокин А.А., Наумова В.В., и др. Развитие инфраструктуры распределенной информационно-вычислительной системы ДВО РАН: X Рос. конференция с участием иностранных ученых “Распределенные информационно-вычислительные ресурсы”, Новосибирск, Академгородок, Россия, 6-8 октября 2005 г. (Тез. докл). http://www.ict.nsc.ru/ws/show_abstract.dhtml.ru+127+9226.
6. Proceedings of the Interim IAGOD Conference “Metallogeny of the Pacific Northwest: Tectonics, Magmatism and Metallogeny of Active Continental Margins”, Vladivostok, Russia, 1-20 September 2004. Vladivostok: Dalnauka, 2004. P. 719.

Поступила в редакцию 20 июля 2006 г.

Рекомендована к печати А.И. Ханчуком

V.V. Naumova

The status and prospects for development of geoinformatics in geological sciences in the Russian Far East

The paper offers the definition of geoinformatics as an independent scientific trend, and the main fields of investigation of geoinformatics are cited. The status of investigations in the field of geoinformatics in geological sciences in specialized divisions of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences is described. The prospects for joint investigations in these divisions are outlined.

Key words: geoinformatics, GIS, regional geological GIS, geological data bases, Far East, corporate network of FEB RAS, geographically distributed geological data base.

ГИС В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

УДК [004/9:553.04] (571.65)

ГИС “МИНЕРАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ, МЕТАЛЛОГЕНЕЗИС И ТЕКТОНИКА СЕВЕРО-ВОСТОКА АЗИИ”

*В.В. Наумова¹, Р.М. Миллер², В.Дж. Ноклеберг², М.И. Патук², М.Ю. Капитанчук¹,
Л.М. Парфенов⁴, А.И. Ханчук¹, С.М. Родионов³*

¹Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток

²Геологическая служба США, Менло Парк, Калифорния, США

³Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, г. Хабаровск

⁴Институт геологии алмазов и благородных металлов СО РАН, г. Якутск

ГИС “Минеральные ресурсы, металлогенезис и тектоника Северо-Востока Азии”, реализованная на основе предложенной концепции и технологии создания региональных геологических ГИС, осуществляет хранение, обработку, доступ, отображение и распространение картографической и атрибутивной информации о геологических объектах Восточной и Южной Сибири, юга Дальнего Востока России, Монголии, Северо-Восточного Китая, Кореи и Японии. Система предоставляет пользователю возможность организации многокритериальных поисковых запросов, в том числе от картографической информации к атрибутивной и наоборот. ГИС позволяет проводить анализ взаимосвязей и взаимозависимостей между геодинамическими, минерально-ресурсными и металлогеническими данными, что дает геологам возможность получать новую информацию о тектонических и металлогенических характеристиках и их эволюции для Северо-Востока Азии.

Ключевые слова: ГИС, региональные геологические ГИС, концепция создания геологических ГИС, ГИС-технологии, тектоника, минеральные ресурсы, металлогенезис, Северо-Восток Азии.

ВВЕДЕНИЕ

Современные компьютерные технологии предоставляют широкие возможности для организации хранения и экспрессного поиска геологической информации. В настоящее время геологические службы всех развитых стран мира активно используют ГИС в своей деятельности. И это неудивительно, ведь они оперируют данными, имеющими отчетливую, зачастую детальную, пространственную привязку. А для хранения этих данных, быстрого и удобного доступа к ним на основе местоположения и создания на их основе высококачественных карт разного назначения технология ГИС подходит наилучшим образом.

Одним из основополагающих принципов применения ГИС в региональных геологических исследованиях следует считать системный подход. Он заключается в рассмотрении объекта исследования как

целостной сложной системы, состоящей из ряда подсистем и имеющей функциональные зависимости и связи как внутри системы, так и между ее подсистемами. Системный подход представляет собой обобщенную методологию решения региональных геологических проблем, основанную на концепции такой системы, под которой понимается не только ее структура, но и функционирование. Инструментом системного подхода является моделирование как способ отображения реальной действительности, при котором для изучения оригинала применяется специально построенная модель, воспроизводящая существенные свойства и характеристики исследуемого реального объекта (группы объектов) и процесса.

Авторская концепция создания транснациональных геологических ГИС заключается в рассмотрении пространственных объектов исследования как целостной сложной системы, состоящей из ряда под-

систем и имеющей функциональные зависимости и связи как внутри системы, так и между ее подсистемами. В этом случае создание ГИС осуществляется в рамках единой геологической концепции. Все геологические объекты, входящие в систему, описываются комплексом признаков, основанных на общих для всего проекта геологических классификациях. Проект имеет единую топографическую (географическую) основу, все карты проекта построены на ее базовой основе и имеют согласованные между собой легенды. При таком подходе у создателей ГИС не возникает проблем со стандартизацией геологических объектов и с корректным построением ГИС [3].

ГИС-технология для целей региональной геологии, основанная на предложенной концепции создания региональных геологических ГИС [2], состоит из следующих последовательных этапов: (1) проектирование системы, при котором формализация геологических объектов и их взаимосвязей играет определяющую роль; (2) выбор технических и программных средств для реализации ГИС; (3) создание топографической (географической) основы; (4) формирование цифровых карт и атрибутивных баз данных в ГИС-среде; (5) решение информационно-поисковых задач с максимальной организацией взаимосвязи между картами и БД; (6) разработка пользовательского интерфейса.

На основе предложенной концепции и сформулированной ГИС-технологии проведено проектирование и осуществлена реализация ГИС “Минеральные ресурсы, металлогенезис и тектоника Северо-Востока Азии”.

В рамках выполнения международного проекта “Минеральные ресурсы, металлогенезис и тектоника Северо-Востока Азии” [6] собран и систематизирован огромный фактический материал по минеральным ресурсам, металлогенезису, происхождению элементов земной коры и развитию рудных систем Восточной и Южной Сибири, Дальнего Востока России, Монголии, Северо-Восточного Китая, Кореи и Японии. Этот международный проект являлся совместным проектом Российской Академии наук, Монгольской Академии наук, Чанчуньского университета наук о Земле, Корейского Института геологии, горного дела и материалов, Геологических служб Японии и Соединенных Штатов Америки.

ОСНОВНЫЕ ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИНЦИПЫ И ПОНЯТИЯ

Целевое назначение ГИС заключается в организации хранения, поиска и анализа информационного материала по геологии Северо-Востока Азии.

Основные информационные материалы, использованные при построении ГИС: географическая карта; геодинамическая карта и атрибутивные описания геодинамических объектов; карта месторождений полезных ископаемых и атрибутивные описания месторождений; металлогенические карты.

В рамках работы по Международному проекту создана геодинамическая карта Северо-Востока Азии [7] масштаба 1: 5 000 000, которая составлена в качестве основного источника информации по геологии и тектоническим структурам региона, а также как тектоническая основа для металлогенического анализа. Легенда карты включает следующие группы подразделений [4]: кратоны; террейны; перекрывающие и “сшивающие” комплексы; прочие обозначения.

Геодинамическая карта Северо-Востока Азии показывает современное размещение террейнов, перекрывающих и “сшивающих” их комплексов в пределах кайнозойских, мезозойских, палеозойских и позднедокембрийских орогенных поясов, расположенных между Северо-Азиатским и Сино-Корейским кратонами, Северным Ледовитым и Тихим океанами. Террейны этих орогенных поясов, а также перекрывающие и “сшивающие” их комплексы классифицируются однотипно, на основе принципа актуализма и моделей плитной тектоники. На карте предпринята попытка выделения террейнов в раннедокембрийском фундаменте кратонов. Путем изображения террейнов, перекрывающих и “сшивающих” комплексов карта раскрывает главные структуры орогенных поясов и время их формирования, возраст коллизии и аккреции, а также постаккреционные и постамальгамационные преобразования.

Логика описаний коренных и россыпных **месторождений полезных ископаемых**, их классификация, металлогенический анализ территории подробно описаны в работах участников международного проекта [9–11].

Выделение и описание металлогенических поясов Северо-Востока Азии, а также интерпретация их генезиса осуществлены с использованием современных понятий тектоники плит, террейнового анализа и анализа перекрывающих и «сшивающих» комплексов, с учетом результатов типизации рудных месторождений территории.

Металлогенические пояса анализировались в соответствии с геодинамическими обстановками их формирования и по различным возрастным срезам. Всего рассмотрено 12 возрастных срезов, соответ-

ствующих наиболее значимым для региона тектоническим и металлогеническим событиям:

Архей (> 2500 млн лет);
Палеопротерозой (2500–1600 млн лет);
Мезопротерозой (1600–1000 млн лет);
Неопротерозой (1000–540 млн лет);
Кембрий–силур (540–410 млн лет);
Девон–ранний карбон (410–320 млн лет);
Поздний карбон–средний триас (320–230 млн лет);
Поздний триас–ранняя юра (230–175 млн лет);
Средняя юра – ранний мел (175–96 млн лет);
Сеноман–кампан (96–72 млн лет);
Маастрихт–олигоцен (72–24 млн лет);
Миоцен–квартер (24–0 млн лет).

СТРУКТУРА ГИС “МИНЕРАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ, МЕТАЛЛОГЕНЕЗИС И ТЕКТОНИКА СЕВЕРО-ВОСТОКА АЗИИ”

В рассматриваемой ГИС сформированы следующие **информационные блоки**: “География”; “Геодинамика”; “Коренные месторождения полезных ископаемых”; “Россыпные месторождения полезных ископаемых”; “Металлогенические пояса”.

Географическая карта [5] создана в качестве базовой основы для всех картографических материалов проекта. Масштаб карты 1: 5 000 000. Карта конвертирована из опубликованных в США числовых данных.

Блок “Геодинамика” включает в себя три раздела:

“Тектоно-стратиграфические терре́йны”: терре́йны позднекембрийских и фанерозойских орогенных поясов, терре́йны в раннекембрийском кристаллическом фундаменте кратонов. Информация о 219 терре́йнах рассматриваемой территории состоит из географического положения и атрибутивного описания: идентификатор, полное имя, тип, тектоническая обстановка, авторское описание, библиографические ссылки, обобщенная стратиграфическая колонка.

“Перекрывающие и “сшивающие” комплексы”: магматические комплексы плутонических и вулканоплутонических поясов, комплексы формаций задуговых бассейнов, комплексы формаций пассивных континентальных окраин, континентальные комплексы. Информация о 224 перекрывающих и “сшивающих” комплексах состоит из географического положения и атрибутивного описания: идентификатор, полное имя, возраст, тип пород, тип комплексов, авторское описание, библиографические ссылки.

“Разломы”: разломы, окаймляющие терре́йны, главные постаккреционные разломы. Информация о разломах состоит из их географического положения и некоторых описаний: идентификатор, полное имя, тип.

В качестве результирующего документа данный блок представлен Геодинамической картой Северо-Востока Азии масштаба 1:5 000 000 [7], а также атрибутивными описаниями геодинамических объектов.

Блок “Коренные месторождения полезных ископаемых” представлен регистрационной картой масштаба 1:5 000 000 с указанием на ней точек расположения 1674 месторождений полезных ископаемых [8], а также атрибутивными описаниями месторождений.

Блок “Россыпные месторождения полезных ископаемых” представлен картой масштаба 1:5 000 000 с указанием на ней точек расположения 85 россыпных районов [8], а также атрибутивными описаниями россыпных месторождений.

Блок “Металлогенические пояса” представлен 12 картами масштаба 1:5 000 000, на которых показано расположение 282 металлогенических поясов [8], а также атрибутивными описаниями металлогенических поясов.

ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ ГИС “МИНЕРАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ, МЕТАЛЛОГЕНЕЗИС И ТЕКТОНИКА СЕВЕРО-ВОСТОКА АЗИИ”

Исходя из поставленных задач и формализации описания данных, создаваемая ГИС осуществляет следующие функции:

- осуществление хранения информации в развитой модели данных;
- объединенное управление описательными и пространственными данными;
- обеспечение прямого доступа к описательным данным в ГИС-среде;
- осуществление многоцелевого информационного поиска в картографических объектах и в объектах баз данных, а также от одного вида объектов к другому;
- предоставление пользователю возможности добавлять и редактировать информацию, включая новый картографический материал и таблицы описаний;
- предоставление пользователю возможности получать любую комбинацию картографического материала;
- предоставление пользователю возможности создавать новые тематические карты на основе использования информации, занесенной в ГИС;

- создание стандартных форм отчетов, таблиц, диаграмм, графиков;
- выполнение печати информации, включая картографическую.

Для разработки концептуальной модели или “модели предметной области” в рассматриваемой системе определены объекты и атрибуты их описания.

СТРУКТУРА АТРИБУТИВНЫХ ОПИСАНИЙ ДАННЫХ И ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ОБЪЕКТАМИ

Объект “ТЕКТОНО-СТРАТИГРАФИЧЕСКИЙ ТЕРРЕЙН” имеет следующие атрибуты описания:

- краткая аббревиатура названия террейна (соответствует аббревиатуре, вынесенной на карту);
- название террейна;
- возраст террейна;
- географическое положение;
- тектоническое положение, согласно фиксированному списку значений:
 - аккреционный клин и субдукционная зона, тип А;
 - аккреционный клин и субдукционная зона, тип В;
 - окраинно-континентальная магматическая дуга;
 - континентальный рифт;
 - кратон;
 - окраина кратона;
 - островная дуга;
 - океаническая кора и подводная гора;
 - зона субдукции;
 - турбидитовый бассейн.
- краткое описание террейна;
- литературные источники;
- обобщенная стратиграфическая колонка;
- дата последней модификации.

Объект “ПЕРЕКРЫВАЮЩИЙ ИЛИ “СШИ-ВАЮЩИЙ” КОМПЛЕКС” имеет следующие атрибуты описания:

- краткая аббревиатура названия комплекса (соответствует аббревиатуре, вынесенной на карту);
- полное название комплекса;
- возраст комплекса;
- географическое положение;
- краткое описание комплекса;
- литературные источники;
- дата последней модификации.

Объект “КОРЕННОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ” имеет следующие атрибуты описания:

- краткая аббревиатура названия месторождения;
- полное название месторождения;
- тип месторождения полезных ископаемых, согласно фиксированному списку модельных типов месторождений полезных ископаемых;

- вмещающие комплексы;
- принадлежность металлогеническому поясу, согласно фиксированному списку металлогенических поясов;

- основные металлы;
- сопутствующие металлы;
- размер месторождения, согласно фиксированному списку значений :
 - крупное;
 - среднее;
 - мелкое;
 - не определено.
- тоннаж месторождения;

- краткое описание месторождения;
- схема месторождения;
- литературные источники;
- дата последней модификации.

Объект “РОССЫПНОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ” имеет следующие атрибуты описания:

- краткая аббревиатура названия россыпи;
- полное название россыпи;
- тип россыпи;
- основные металлы;
- сопутствующие металлы;
- размер россыпи, согласно фиксированному списку значений :
 - крупное;
 - среднее;
 - мелкое;
 - не определено.
- тоннаж;

- краткое описание;
- литературные источники;
- географический регион;
- дата последней модификации.

Объект “МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИЙ ПОЯС” имеет следующие атрибуты описания:

- краткая аббревиатура названия металлогенического пояса;
- полное название металлогенического пояса;
- геологические структуры;
- возрастной интервал, согласно фиксированному списку значений:

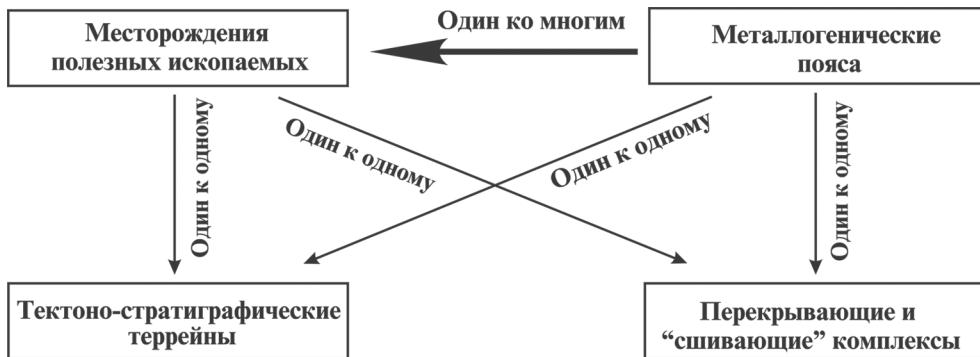


Рис. 1. Взаимосвязи между объектами в описываемой системе.

- тектоническое положение;
- геодинамическая обстановка формирования;
- географический регион;
- литературные ссылки;
- дата последней модификации.

Определены основные зависимости между объектами и признаками. Взаимосвязи типа “один к одному” характерны для отношений между следующими объектами: “коренное месторождение полезных ископаемых” и “тектоно-стратиграфический террейн”; “коренное месторождение полезных ископаемых” и “перекрывающий или “сшивающий” комплекс”; “металлогенический пояс” и “коренное месторождение полезных ископаемых”; “металлогенический пояс” и “перекрывающий или “сшивающий” комплекс”. Между объектами “металлогенический пояс” и “россыпное месторождение полезных ископаемых” – взаимосвязь “один ко многим” (рис. 1). Взаимосвязей между атрибутами объектов не установлено.

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ДАННЫХ

Концептуальная модель данных рассматриваемой системы аппроксимируется реляционной моделью данных [1].

В реляционной модели данных объекты и взаимосвязи между ними представляются с помощью таблиц. Каждая таблица представляет собой один объект и состоит из строк и столбцов. Каждый столбец в таблице является атрибутом. В соответствии с традиционной терминологией можно сказать, что столбцы таблицы представляют элементы данных, а строки – записи.

ИНФОРМАЦИОННОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГИС

Программное обеспечение ГИС: ArcView, 3.2 и Microsoft Access 2000. Цифровые карты импортировались в ArcView согласно разработанной структуре тематических слоев ГИС: 12 слоев – географическая

карта (рис. 2); 136 слоев – геодинамическая карта (рис. 3); 1 слой – регистрационная карта коренных месторождений полезных ископаемых (рис. 4); 1 слой – регистрационная карта россыпных месторождений полезных ископаемых (рис. 5); 12 слоев – карты металлогенических поясов (рис. 6).

Базы данных описаний геологических объектов создавались в Microsoft Access. Необходимость привлечения внешней для ArcView системы управления базами данных связана с тем, что атрибуты объектов, входящих в систему, описываются большими блоками текстовой информации, изображениями тектоно-стратиграфических колонок и карто-схемами месторождений. Базы данных включают следующие таблицы: “Тектоно-стратиграфические террейны”; “Перекрывающие и “сшивающие” комплексы”; “Коренные месторождения полезных ископаемых”; “Россыпные месторождения полезных ископаемых”; “Металлогенические пояса”; “Стратиграфические колонки”; “Схемы месторождений”.

Таблицы организованы в реляционную базу данных. Структура данных в БД показана на рис. 7. Подобная организация данных позволяет не только обеспечить поисковые возможности системы, но и улучшает возможность пользовательского интерфейса при уточнении запросов в режиме просмотра форм данных.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СИСТЕМЫ

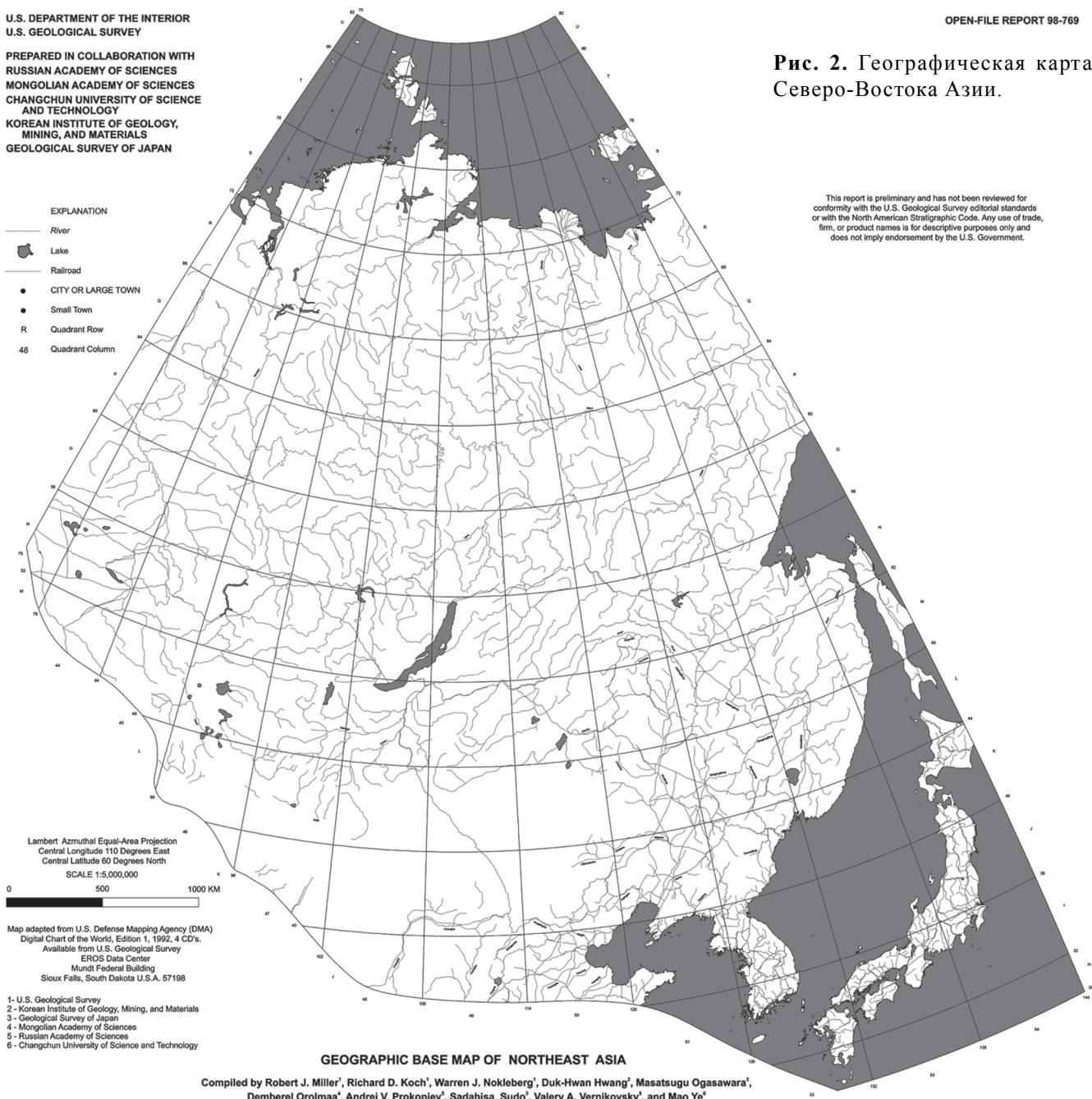
Реализованная ГИС решает следующие задачи:

- осуществляет компьютерное хранение всех видов информации;
- предоставляет прямой доступ к описательным данным в ГИС- среде;
- реализует многокритериальный информационный поиск в картографических объектах и в объектах баз данных, а также от одного вида объектов к другому;

U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR
U.S. GEOLOGICAL SURVEY

PREPARED IN COLLABORATION WITH
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
MONGOLIAN ACADEMY OF SCIENCES
CHANGCHUN UNIVERSITY OF SCIENCE
AND TECHNOLOGY
KOREAN INSTITUTE OF GEOLOGY,
MINING, AND MATERIALS
GEOLOGICAL SURVEY OF JAPAN

OPEN-FILE REPORT 98-769



- осуществляет печать всех видов информации;
- осуществляет добавление и редактирование информации, включая новый картографический материал и новые таблицы описания.

ОСНОВНЫЕ БЛОКИ СИСТЕМЫ

Рассматриваемая ГИС включает следующие блоки (рис. 8):

1. Блок управления цифровой картографией (ArcView):

- 1.1 удаление/добавление тематического слоя;

- 1.2 удаление/добавление элементов слоя;
- 1.3 изменение тематического содержания слоя приемами генерализации (утрирование, обобщение, упрощение, сглаживание);
- 1.4 изменение цветовой гаммы легенды и содержания карты;
- 1.5 замена картографического способа изображения тематического содержания (например, замена точечного слоя на полигоны);
- 1.6 визуализация любой совокупности картографических слоев;

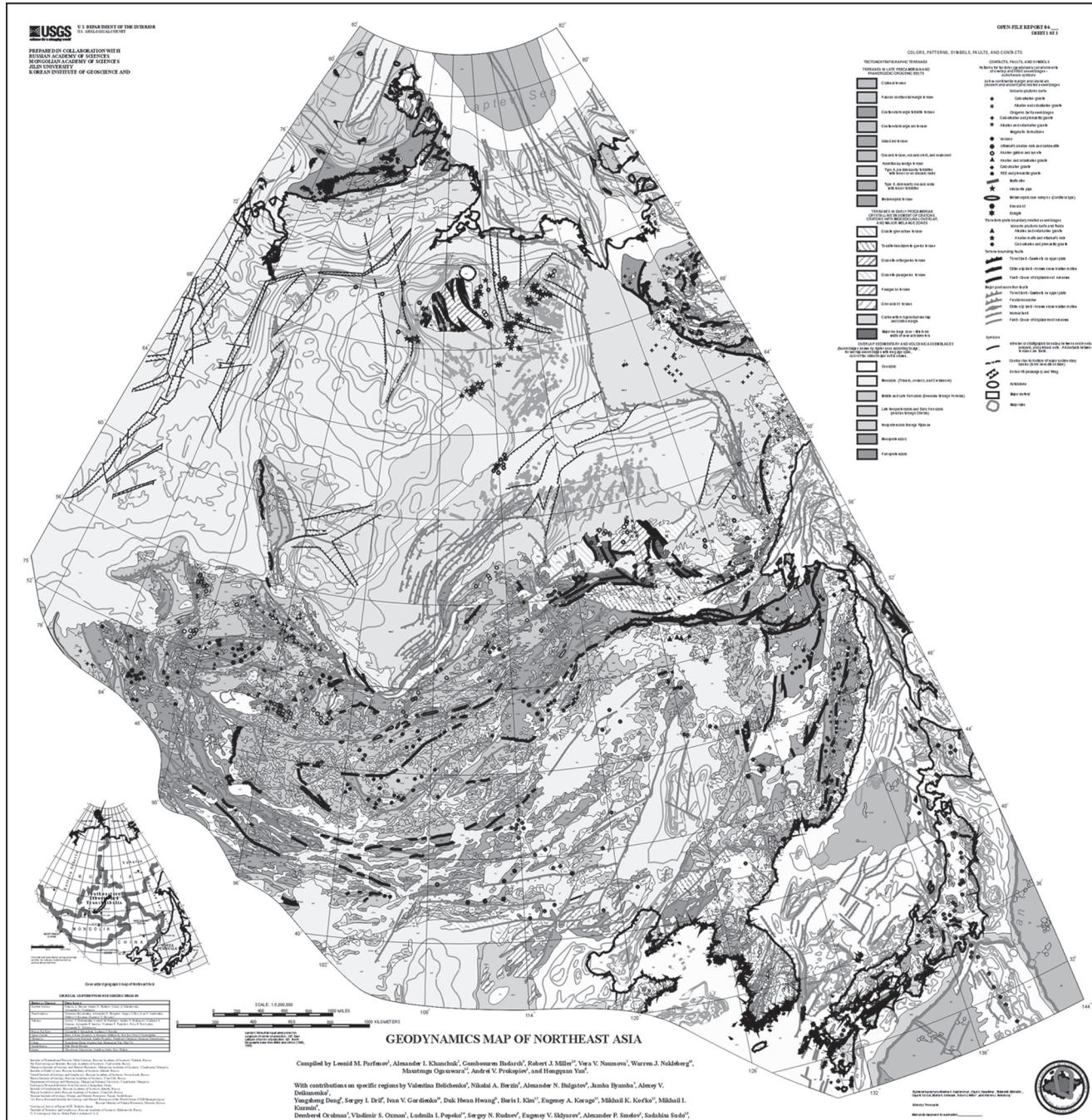


Рис. 3. Геодинамическая карта Северо-Востока Азии.

1.7 вызов сервисных функций.

2. Блок организации пространственных запросов (ArcView):

2.1 идентификация пространственных запросов;
2.2 вызов сервисных функций.

3. Аналитический блок (ArcView):

3.1 переклассификация, декомпозиция, объединение пространственных объектов;

3.2 топологические оверлеи;

3.3 буферизация;

3.4 вызов сервисных функций.

4. Блок управления реляционной БД (Access):

4.1 ввод, удаление, модификация информации;
4.2 визуализация информации;
4.3 вызов сервисных функций.

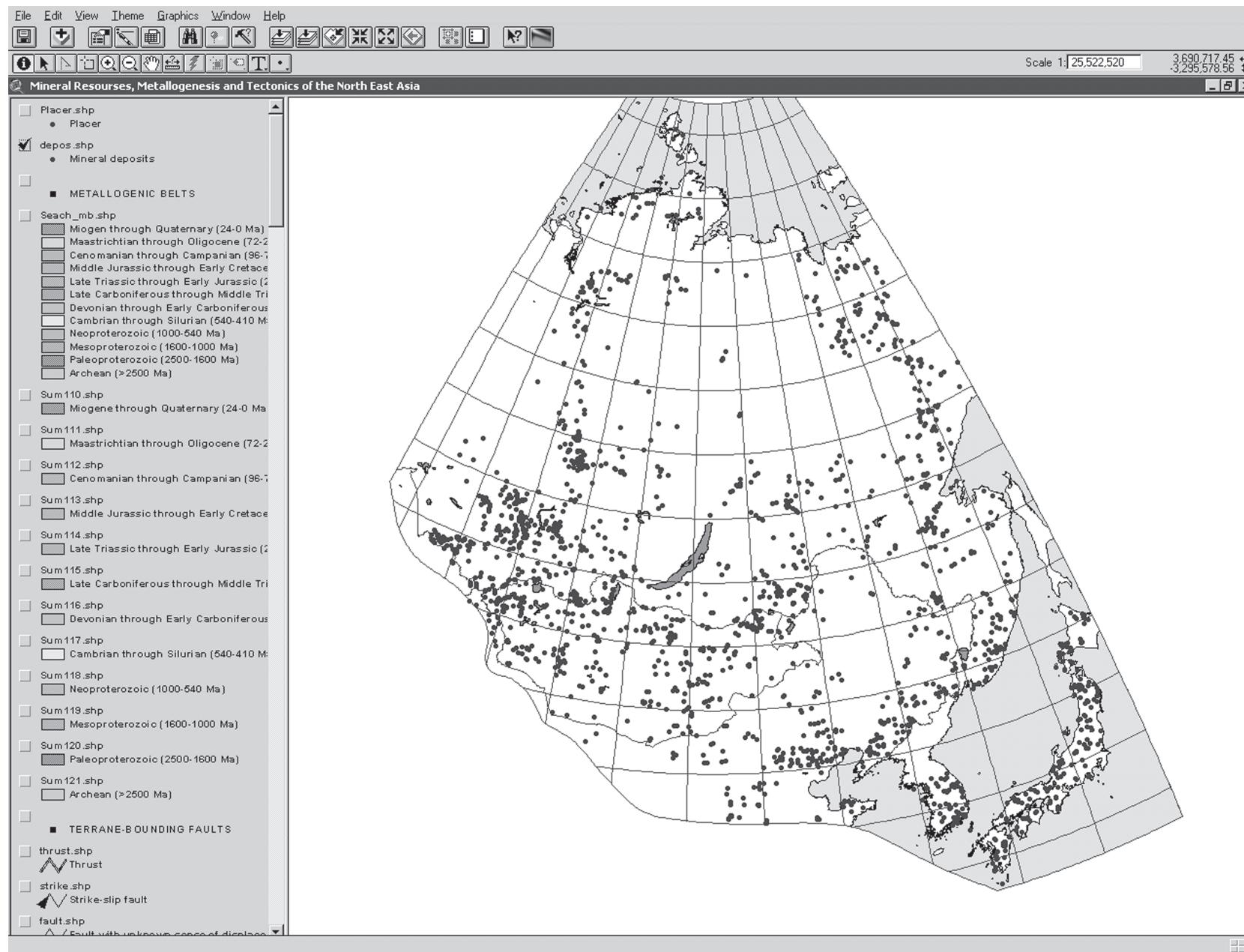


Рис. 4. Тема “Коренные месторождения полезных ископаемых” в ArcView, 3.2.

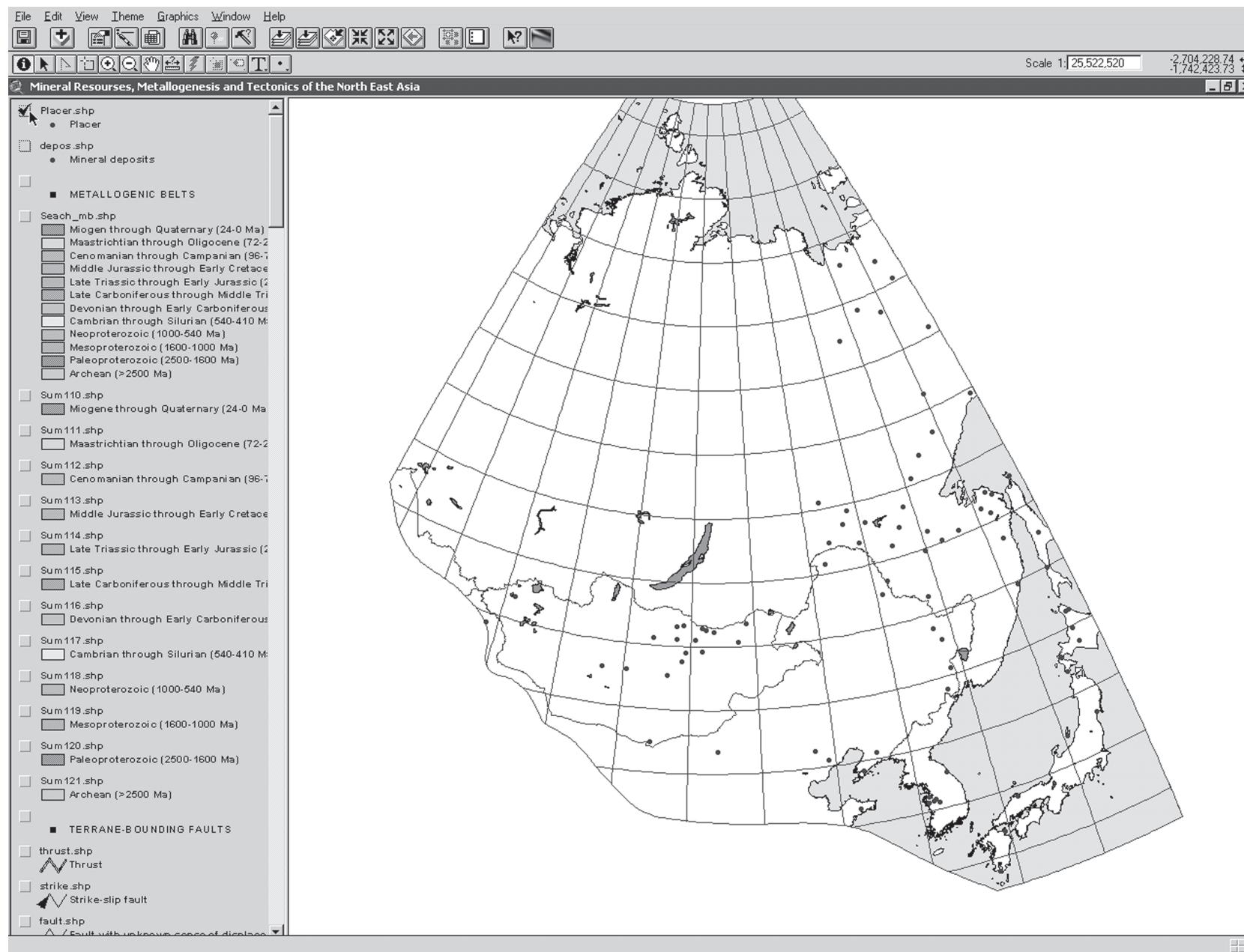


Рис. 5. Тема “Россыпные месторождения полезных ископаемых” в ArcView, 3.2.

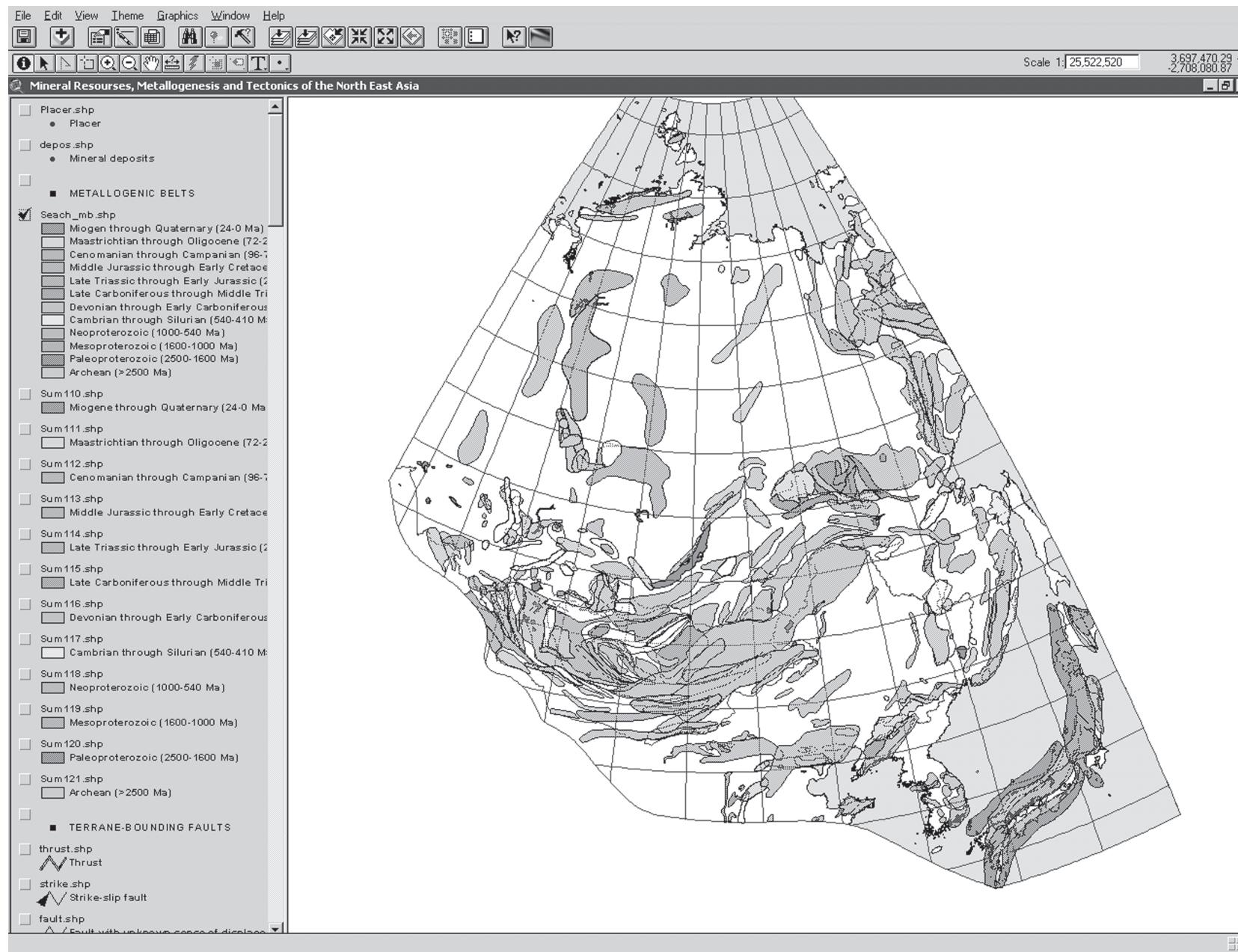


Рис. 6. Тематические слои блока “Металлогенические пояса” в ArcView, 3.2.

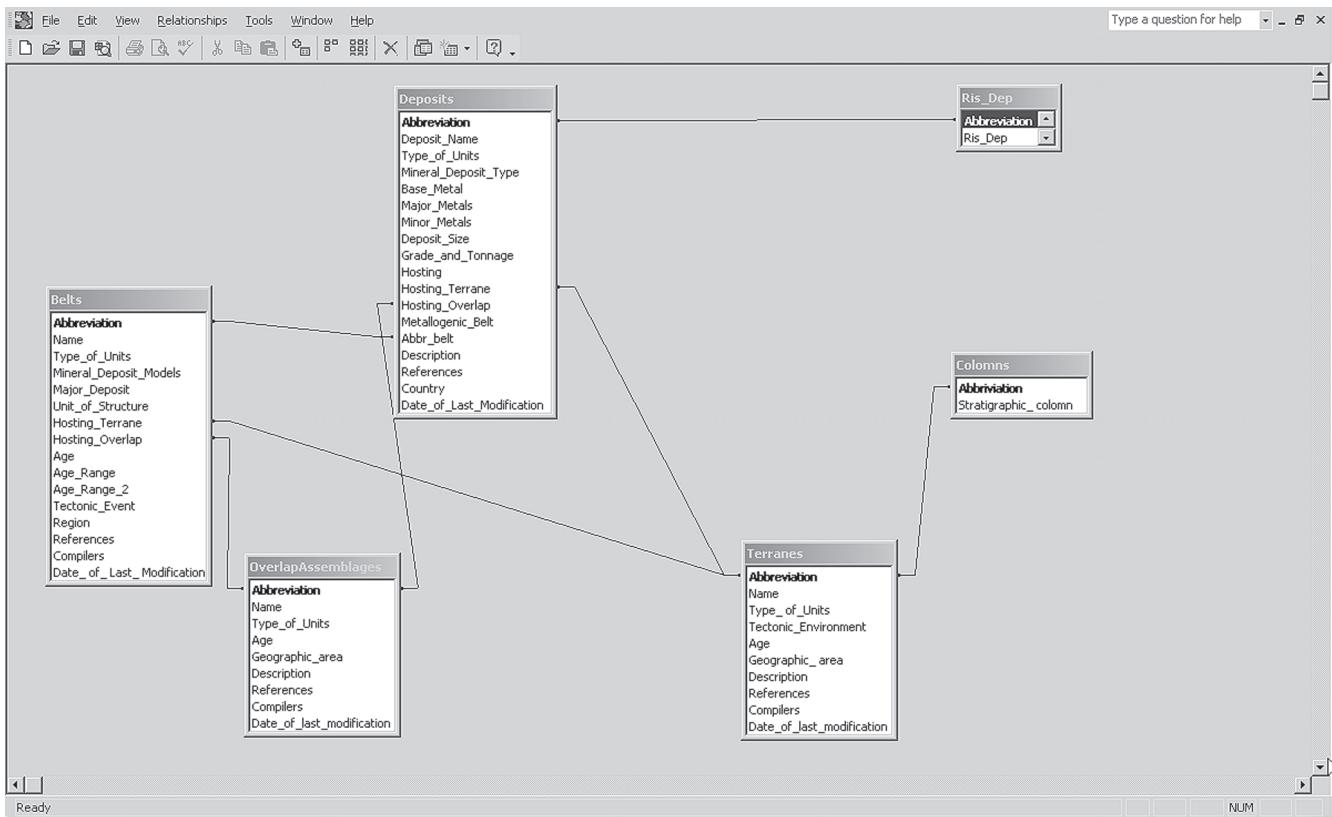


Рис. 7. Структура данных в БД Microsoft Access, 2000.



Рис. 8. Основные блоки ГИС.

5. Блок создания атрибутивных запросов (Access):

5.1 запросы на выборку;

5.2 запросы с параметрами;

5.3 перекрестные запросы;

5.4 запросы на изменение (запросы на создание таблицы, удаление, обновление, добавление записей);

5.5 запросы SQL (запросы на объединение, запросы к серверу, управляющие запросы, подчиненные запросы);

5.6 вызов сервисных функций.

6. Блок создания перекрестных запросов: (ArcView ↔ Microsoft Access).

6.1 выполнение запросов от картографической информации к атрибутивной в БД;

6.2 выполнение поисковых запросов от атрибутивной информации в БД к картографической;

6.3 вызов сервисных функций.

7. Блок пользовательского интерфейса.

Интерес представляет пользовательский интерфейс нестандартной реализации созданных автором перекрестных (между программами) поисковых запросов в системе.

РЕШЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ПОИСКОВЫХ ЗАДАЧ

Решение информационно-поисковых задач реализуется следующими блоками:

1) организация пространственных запросов (ArcView);

2) создание атрибутивных запросов (Access);

3) создание перекрестных запросов: ArcView ↔ Microsoft Access.

Организация пространственных запросов реализуется стандартными средствами ArcView способом “картографического интерфейса”:

- произвольное ограничение территории выборки;

- определение границ выборки аналитическим путем (площадные геометрические примитивы, географические зоны);

- использование контуров территориальной выборки (ареалы обслуживания, административные районы и др.).

Создание запросов в Microsoft Access строится стандартными средствами программы:

- запросы на выборку;

- запросы с параметрами;

- перекрестные запросы;

- запросы на изменение (запросы на создание таблицы, удаление, обновление, добавление записей);

- запросы SQL (запросы на объединение, запросы к серверу, управляющие запросы, подчиненные запросы).

Создание перекрестных запросов:

ArcView ↔ Microsoft Access:

Созданная ГИС предоставляет пользователю возможность дополнительных, нестандартных возможностей организации запросов, реализованных в виде авторских программ.

Пользователь имеет возможность осуществить идентификацию и получить атрибутивное описание каждого объекта из любого картографического слоя в ArcView 3.2. Причем, в созданных темах (слоях) картографические объекты (точки, линии, полигоны) сгруппированы в смысловые группы объектов: тектонико-стратиграфические террейны, геологические комплексы, металлогенические пояса и т.д. Например, пользователь выделяет один из полигонов в одной из тем слоя “Террейны”, при этом цветом выделяется весь террейн, из какого бы количества полигонов он не состоял. Дальше пользователь может сделать запрос к БД атрибутивных описаний. Ответом на запрос будет запуск соответствующей формы “Террейны” в БД Microsoft Access 2000, в которой находится описание данного террейна. Эта функция реализована авторским скриптом “Send” на Avenue в ArcView 3.2. Скрипт дополнен ini-файлом, в котором пользователь должен указать место расположения БД на ПК пользователя. Скрипт может быть использован для любого количества картографических слоев. Он является универсальным и может быть применен при создании любых ГИС, в которых необходимыми являются запросы от картографической информации к атрибутивной, расположенной в реляционной БД.

В рамках работы по созданию ГИС реализованы авторская программа “SendArcView” на Microsoft Visual Basic 6.3, а также авторский скрипт “FromAccess” на Avenue для реализации многокритериальных запросов от Microsoft Access 2000 к ArcView 3.2. Программа дополнена ini-файлом, в котором пользователь должен указать путь к ГИС и к базовой программе ГИС ArcView 3.2. Таким образом, система позволяет создавать принципиально новые карты, исходя из содержательных задач, используя созданную технологию запросов. Созданное программное обеспечение является универсальным и может быть использовано в любых ГИС, в которых необходимыми являются запросы из реляционных баз данных к картам.

ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИЙ ИНТЕРФЕЙС ГИС

Пользовательский интерфейс ГИС основан на базовых возможностях ArcView, 3.2 и Microsoft Access 2000 с серией авторских дополнений.

1. Самым дружественным для пользователей образом организованы входные страницы ГИС как со стороны ArcView, 3.2, так и со стороны Microsoft Access 2000. Пользователь имеет возможность получить информацию о системе в целом и т.д.

2. В формах БД предусмотрена возможность уточнения информации. Для этого около соответствующих полей находится кнопка, нажав на которую можно получить уточнение информации по данному параметру. В качестве примера можно привести форму “Коренные месторождения полезных ископаемых”. Для данного месторождения из формы его описания простым нажатием соответствующих кнопок можно вызвать дополнительную информацию о месторождении, например схему месторождения, полное описание тектонических структур (террейна и перекрывающего или “сшивающего” комплекса), в которых расположено месторождение, а также полное описание металлогенического пояса, в ареале которого находится данное месторождение. Все эти возможности стали доступными благодаря соответствующей структуре реляционной БД.

3. Вызывая перекрестный поиск, пользователь пользуется системой автоматических меню, созданных автором для организации запросов. Пользовательские меню организованы самым дружеским для пользователя образом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, ГИС “Минеральные ресурсы, металлогенезис и тектоника Северо-Востока Азии”, реализованная на основе предложенной концепции и технологии создания региональных геологических ГИС, осуществляет хранение, обработку, доступ, отображение и распространение картографической и атрибутивной информации о геологических объектах Восточной и Южной Сибири, Дальнего Востока России, Монголии, Северо-Восточного Китая, Кореи и Японии. Система предоставляет пользователю возможность организации многокритериальных поисковых запросов, в том числе от картографической информации к атрибутивной и наоборот. ГИС позволяет проводить анализ взаимосвязей и взаимозависимостей между геодинамическими, минерально-ресурсными и металлогеническими данными, что дает геологам возможность получать новую информацию о тектонических и металлогенических характеристиках и их эволюции для Северо-Восточной Азии.

Созданные для ГИС алгоритмы и программы организации многокритериальных поисковых запросов от картографической информации в среде ArcView к атрибутивным описаниям в БД Access, а

также обратных запросов позволяют решать нестандартные задачи поиска информации в ГИС, а также создавать принципиально новые карты, исходя из поставленных геологических задач. Программное обеспечение является универсальным и может быть использовано в любых ГИС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Атрет Ш. Структурный подход к организации баз данных. М.: Финансы и статистика, 1983. С. 319.
2. Наумова В.В. ГИС-перспективные компьютерные технологии для региональной геологии. Информатика и моделирование в океанологических исследованиях. Владивосток: Дальнаука, 1999. С. 26–37.
3. Наумова В.В. Концепция создания региональных геологических ГИС (на примере ГИС «Минеральные ресурсы, минералогенезис и тектоника Северо-Востока Азии»: Автореф. дис. докт. геол.-минер. наук. Иркутск, 2004. С. 47.
4. Парфенов Л.М., Ноклеберг У.Дж., Ханчук А.И. Принципы составления и главные подразделения легенды геодинамической карты Северной и Центральной Азии, юга российского Дальнего Востока, Кореи и Японии // Тихоокеан. геология. 1998. № 3. С. 3–13.
5. Miller R.J., Koch R.D., Nokleberg W.J., Hwang Duk-Hwan, Ogasawara Masatsugu, Orolmaa Demberel, Prokopiev A.V., Sudo Sadahisa, Vernikovsky V.A., and Ye Mao, 1998, Geographic base map of Northeast Asia: U.S. Geological Survey Open-File Report 98-769, scale 1:5 000 000.
6. Nokleberg W. J., Kuzmin M. I., Badarch G. Yan H., Duk-Hwan, Ogasawara M. International Collaborative Project on Mineral Resources, Metallogenesis, and Tectonics of North East Asia. International Conference on GIS in Geology, Moscow, 13-15 November 2002, Extended Abstracts. P. 89.
7. Parfenov L.M., Khanchuk A.I., Badarch Gombosuren, Miller R.J., Naumova V.V., Nokleberg W.J., Ogasawara Masatsugu, Prokopiev A.V., and Yan Hogquan . Preliminary Northeast Asia geodynamics map, 2003: U.S. Geological Survey Open-File Report 03-2003: <http://rockyweb.cr.usgs.gov/mod/ak.html>
8. Preliminary Publications Book 2 From Project on Mineral Resources, Metallogenesis, and Tectonics of Northeast Asia, by Nokleberg W.J., Miller R.J., Naumova V.V., Khanchuk A.I., Parfenov L.M., Kuzmin M.I., Bounaeva T.M., Obolenskiy A.A., Rodionov S.M., Seminskiy Z.V. and Diggles M.F., eds., 2003: USGS Open-File Report 03-2003 (CD-ROM), <http://geopubs.wr.usgs.gov/open-file/of03-103/>.
9. Rodionov S.M. and Nokleberg W.J., 2000, Mineral deposit models for Northeast Asia [abs.], in Mineral Resources and Tectonics of Northeast Asia: Institute for Transfer of Industrial Technology, International Symposium June 8-9, Abstracts, Agency of Industrial Science and Technology Research Center, Tsukuba, Japan. P. 51–53.
10. Rodionov S.M., Obolenskiy A.A., Khanchuk A.I., Dejidmaa G., Hongquan Y., Hwang D.H. and Nokleberg W.J., 2000, Metallogenic belts of Northeast Asia: Definitions, principles, and examples [abs.], in Mineral Resources and Tectonics of Northeast Asia: Institute for Transfer of Industrial Technology, International Symposium, June 8-9, Abstracts. Agency of Industrial Science and Technology Research Center, Tsukuba,

Japan. P. 82–83.

11. Rodionov S.M., Obolenskiy A.A., Distanov E.G. et al. Introduction to Northeast Asia Metallogenic Belts. Preliminary Publications Book 2 From Project on Mineral Resources, Metallogenesis, and Tectonics of Northeast Asia,

by Nokleberg, W.J., Miller, R.J., Naumova V.V., Khanchuk A.I., Parfenov, L.M., Kuzmin, M.I., Bounaeva, T.M., Obolenskiy, A.A., Rodionov, S.M., Seminskiy, Z.V., and Diggles, M.F., eds., 2003: USGS Open-File Report 03-2003 (CD-ROM).

Поступила в редакцию 15 мая 2006 г.

Рекомендована к печати Н.П. Романовским

**V.V. Naumova, R.M. Miller, W.J. Nokleberg, M.I. Patuk, M.Yu. Kapitanchuk, A.I. Khanchuk,
S.M. Rodionov**

GIS “Mineral resources, mineralogenesis, and tectonics of Northeast Asia”

GIS “Mineral resources, mineralogenesis, and tectonics of Northeast Asia” implemented on the basis of the suggested concept and technology of establishing regional geological GIS carries out storage, processing, access, representation, and distribution of cartographical and attributive information on the geological objects of East and South Siberia, southern part of the Russian Far East, Mongolia, Northeast China, Korea, and Japan. The system offers the user an opportunity for multi-criteria retrieval requests, including those for cartographical to attributive information, and vice versa. GIS allows an analysis of interrelations and interdependencies between geodynamic, mineral, mineral resources-related, and metallogenic data, which permits the geologists to obtain new information on tectonic and metallogenic characteristics and their evolution for Northeast Asia.

Key words: GIS, regional geological GIS, concept of establishing geological GIS, GIS technologies, Northeast Asia, tectonics, mineral resources, mineralogenesis.

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ: ОПЫТ СОЗДАНИЯ И АНАЛИЗА

С.В. Ворошин, А.С. Зинкевич, Е.Э. Тюкова

Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН, г. Магадан

Приведена характеристика региональных геоинформационных систем (ГИС) по геологии и полезным ископаемым, созданных в лаборатории ГИС-технологий СВКНИИ ДВО РАН: ГИС Верхне-Колымского региона; ГИС Анмандыканского и Кубакинского рудных узлов; ГИС Колымо-Омолонского и Охотско-Колымского регионов; ГИС по россыпным месторождениям золота Центрально-Колымского региона; ГИС муниципального округа Магадана; ГИС Северо-Востока России. При компиляции и векторизации картографических материалов использована разномасштабная опубликованная первичная информация (от 1: 50 000 до 1: 1500 000). В практическом применении перечисленных ГИС четко обозначились три главных направления: 1) подготовка картографических продуктов; 2) информационно-справочные системы; 3) анализ и моделирование. Последнее направление наиболее важно для решения прогнозно-поисковых задач, при его реализации необходимо уделять серьезное внимание как качеству геологической информации, объединенной в региональные ГИС, так и генетическим моделям образования конкретных типов минерализации, на которых базируются алгоритмы анализа. Дальнейшее развитие региональных ГИС планируется за счет их объединения с другими информационными ресурсами и создания электронных атласов с доступом через Интернет.

Ключевые слова: региональные геоинформационные системы, ГИС по геологии, Северо-Восток России.

ВВЕДЕНИЕ

Под *региональными геоинформационными системами* (ГИС) понимаются территориально и тематически ограниченные ГИС, основанные на принципах совместимости и взаимной дополняемости или открытости и представляющие собой продукт конечного пользователя. Такой подход определяется как модульный и противопоставляется консолидированной информационной системе, которая содержит «все» и может создаваться бесконечно долгое время.

Актуальность создания и анализа геоинформационных систем определяется тем, что информационные ресурсы являются важнейшим национальным достоянием любой страны. Принимая во внимание ресурсную направленность экономики нашего государства, полнота и цельность информации о минерально-сырьевом комплексе будут играть одну из главных ролей в темпах промышленного развития России. При этом именно региональные геоинформационные системы относятся к главным составным частям единой информационной системы о природных ресурсах. Поэтому создание региональных ГИС

и научное обеспечение методических основ их развития выдвигаются на первоочередной план при проведении исследовательских работ в сфере геоинформатики. Не менее актуально также получение нового научного знания при помощи ГИС, что решается посредством анализа информации и моделированием на основе геоинформационных технологий.

Исходя из того, что региональные ГИС должны быть продуктом конечного пользователя, уже на стадии проектирования необходимо представлять круг задач, которые планируется решать с помощью этих систем. Другими словами, создание геоинформационных систем не может быть самоцелью. Следование рассмотренным принципам позволило создать несколько разноуровневых ГИС по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока России и выполнить ряд аналитических проектов на их основе [4, 5, 21, 23]. Это (в хронологическом порядке) ГИС по геологии и полезным ископаемым Верхне-Колымского региона (1998 г.); ГИС по геологии и полезным ископаемым Анмандыканского и Кубакинского рудных узлов (1999 г.); ГИС по геологии Колымо-Омо-

лонского региона (2001 г.); ГИС по россыпным месторождениям золота Центрально-Колымского региона (2001 г.); ГИС полезных ископаемых муниципального округа Магадана (2002 г.); ГИС по геологии Охотско-Колымского региона (2002 г.); ГИС по геологии Северо-Востока России (2004 г.). Территориальный охват и сравнительная характеристика геоинформационных систем приведены на рис. 1 и в табл. 1.

Следует отметить существование неоправданно высоких ожиданий от практического применения геологических ГИС для прогнозно-поисковых целей. В этой связи наблюдается даже некоторое скептическое отношение к возможности эффективного использования реальных проектов. Хотя ГИС предназначены для совместной обработки информации двух видов – графической и атрибутивной, – практическое применение всего набора функциональных возможностей ГИС реализуется далеко не всегда. В статье рассматривается опыт создания и анализа ГИС в лаборатории геоинформационных технологий СВКНИИ

ДВО РАН при геологических исследованиях на Северо-Востоке России. Обсуждается главным образом векторная составляющая ГИС.

ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

ГИС по геологии и полезным ископаемым Верхне-Колымского региона подготовлена в 1998 г. на основании соглашения о совместных исследованиях между компанией BHP International и СВКНИИ ДВО РАН в рамках темы “Пространственный анализ размещения золотого оруденения Верхне-Колымского региона (Россия) и районов Западной Виктории и террейна Пайн-Крик (Австралия)”. ГИС основана на 25 листах изданной государственной геологической карты масштаба 1:200 000 и выполнена как цельный проект в реальных географических координатах в программе ArcView (рис. 2). Территория, включененная в геоинформационную систему, охватывает крупнейшую золоторудную провинцию России. Структура ГИС представлена: (1) геологическим строением – 9381 полигон; (2) дисъюнктивными нарушениями – 4073 объекта; (3) дайками – 9786 объектов; (4) месторождениями и проявлениями рудных полезных ископаемых – 2471 объект; (5) россыпными месторождениями – 1151 объект. Данная система изначально проектировалась для решения прогнозных задач. Предполагалось, что анализ графической и атрибутивной информации в совокупности с применением генетических моделей рудообразования позволит составить алгоритмы для прогнозно-поисковых работ. Предварительная обработка показала высокий потенциал этой ГИС как с точки зрения эвристических возможностей, так и в плане организации оптимального управления недропользованием.

ГИС по геологии Колымо-Омолонского региона и ГИС по геологии Охотско-Колымского региона. Каждый из этих проектов захватывает приблизительно половину территории Магаданской области и соответствует по площади листам авторских геологи-

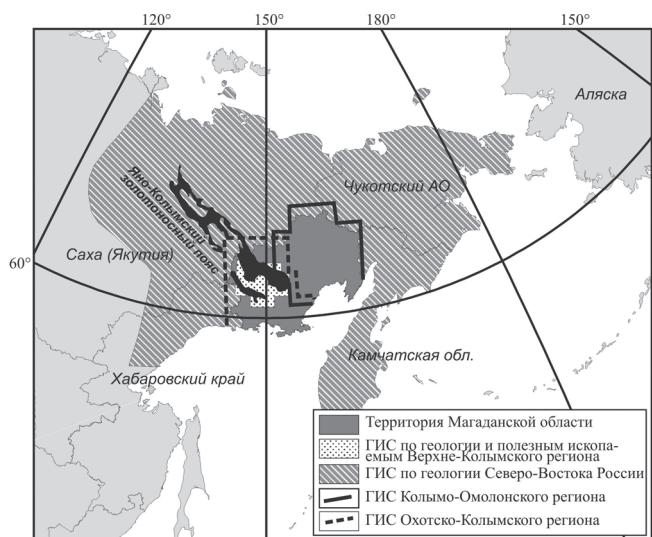


Рис. 1. Площади, включенные в региональные ГИС. Черным цветом показан Яно-Колымский золотоносный пояс.

Таблица 1. Сравнительная характеристика параметров региональных векторных ГИС геологического содержания.

Наименование ГИС	Масштаб исходной информации	Площадь, км ²	Количество объектов		
			Полигоны	Линии	Точки
Северо-Востока России	1:1 500 000	3774000	27000	11000	700
Колымо-Омолонского региона	1:500 000	306814	16781	56814	420
Охотско-Колымского региона	1:500 000	265554	14995	55528	1319
Верхне Кольмского региона	1:200 000	96493	9381	15010	2471
Анмандыканского и Кубакинского рудных узлов	1:200 000, 1:50 000	5130	707	14619	3115298
Россыпей Центрально-Колымского региона	1:500 000, 1:200 000	130668	247	1651	-
Муниципального округа Магадана	1:500 000	92261	-	7	4998

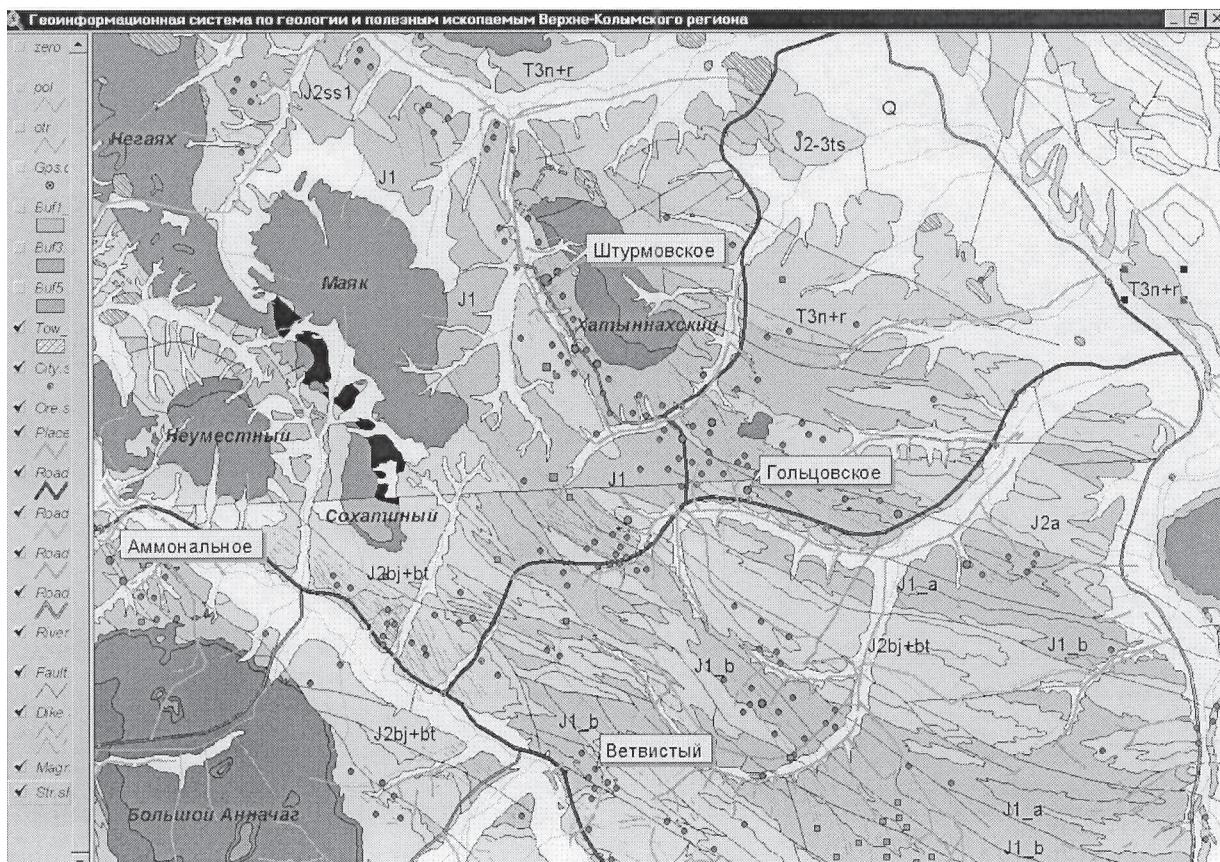


Рис. 2. Фрагмент ГИС по геологии и полезным ископаемым Верхне-Колымского региона.

ческих карт В.М. Кузнецова и др., 1998 г. и Н.Г. Маннафова и др., 1999 г. (Геологическая карта и карта полезных ископаемых Колымо-Омолонского региона (1998 г., 1:500 000, ред. А.С. Симаков); Геологическая карта и карта полезных ископаемых Охотско-Колымского региона (1999 г., 1:500 000, ред. Г.М. Сосунов)). Обе системы проектировались по заказу Комитета природных ресурсов по Магаданской области в качестве геологической векторной основы для любых региональных работ на территории Магаданской области и перекрывают всю ее площадь. Они также входят в состав Государственного банка цифровой геологической информации. Обе системы представлены в виде проектов ArcView. Области применения данных систем связаны с планированием региональных геологических и геофизических работ, например, составление легенд или проектирование геофизических профилей. Кроме того, они служат основой при составлении карт и схем металлогенического и тектонического содержания.

ГИС по геологии и полезным ископаемым Анмандыканского и Кубакинского рудных узлов создана по заказу Омолонской компании в 1999 году за

счет налоговых отчислений на воспроизводство минерально-сырьевой базы. Проект по площади охватывает приблизительно полтора номенклатурных листа карты масштаба 1:200 000 и используется при планировании геолого-разведочных работ Омолонской экспедицией. Его отличительная черта – наполнение разномасштабной информацией. В ГИС включены следующие векторные слои: стратиграфия и магматизм, четвертичные отложения, зоны измененных пород, маркирующие толщи, изолинии рельефа, реки, разломы, дайки и жилы, трещиноватость, надвиги, месторождения ирудопроявления, россыпи, геохимические потоки, развалы кварцевых жил, шлиховое опробование, штуфное опробование, гамма-поле, аномалии калия, аномалии тория, аномалии урана, гравиметрические данные. Заказчик старался сконцентрировать всю геологическую, геохимическую и геофизическую информацию, касающуюся территории, в одном проекте. Потребность в такой ГИС возникла из-за истощения запасов Кубакинского золоторудного месторождения и необходимости поисков новых рудных объектов.

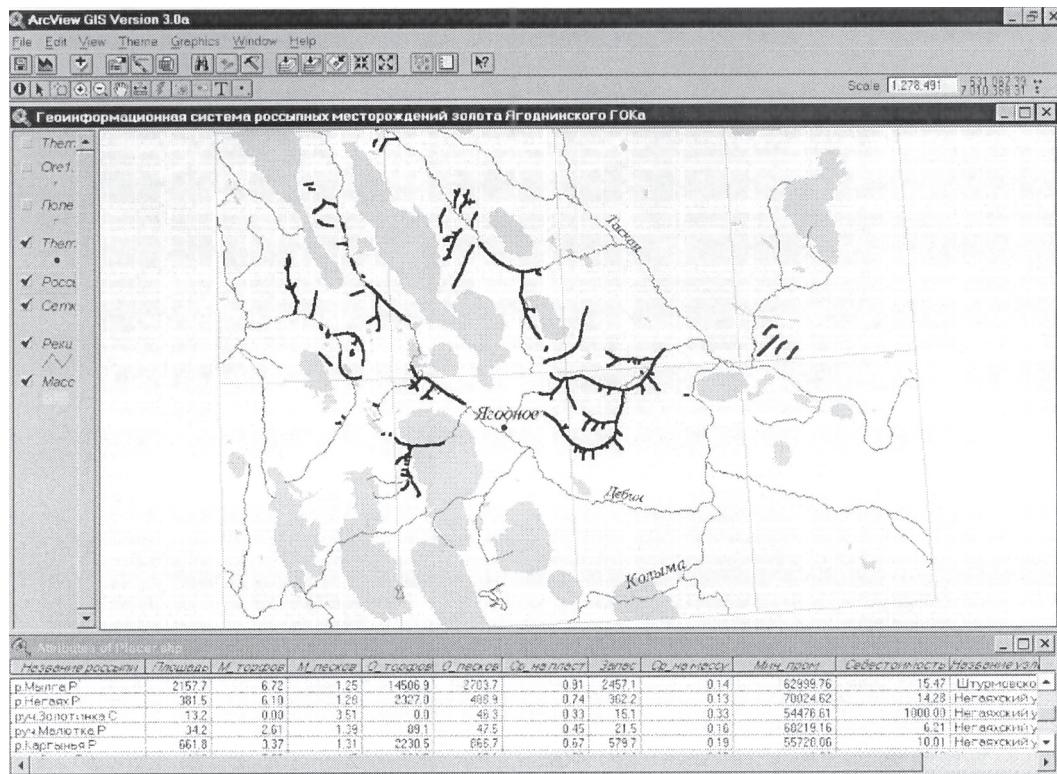


Рис. 3. Фрагмент ГИС по россыпным месторождениям золота Верхне-Колымского региона.

Россыпи Ягодинского района и таблица атрибутивных данных к ним.

ГИС по россыпным месторождениям золота Центрально-Колымского региона основана на данных о пространственном положении и горно-геологических параметрах 1651 россыпи (рис. 3). С ее помощью был проведен анализ россыпной золотоносности региона, по результатам которого составлен комплект разномасштабных карт для прогнозных целей: карта россыпной золотоносности; карта пробности россыпного золота; карта крупности россыпного золота; карта дисперсии крупности россыпного золота; карта дисперсии пробности россыпного золота; карта отношений продуктивности по россыпному золоту к потокам рассеяния.

На основе ГИС по россыпным месторождениям был подготовлен прототип геоинформационной системы оценки и управления добычи золота из россыпей [7]. Цель этого проекта – определение условий (экономических, технологических и законодательных) для наиболее эффективной отработки россыпных месторождений золота. Совместно с ГИС была создана автономная программа расчета технико-экономических показателей россыпей.

ГИС полезных ископаемых муниципального округа Магадана создана специально для местных

органов управления. Она включает в себя все известные месторождения и рудопроявления на территории округа в виде точечных объектов. Атрибутивная информация основана на кадастровых данных к картам полезных ископаемых. ГИС предназначена главным образом для информационно-справочных запросов и привязки данных по лицензированию объектов недропользования.

ГИС по геологии Северо-Востока России основана на наиболее мелкомасштабной информации из всех вышеперечисленных проектов. Эта система создана для обзорных целей, проведения региональных научно-исследовательских работ и обучения. Она наиболее интересна при проведении тектонических и металлогенических исследований. Предполагается также использовать данную ГИС в качестве основы для ведения региональных баз данных по аналитике (например, изотопные анализы и т.д.), коллекциям образцов, шлифов, аншлифов. Проект охватывает около 20 % территории России и определяется в границах Камчатской, Магаданской областей, Чукотского и Корякского АО, частично сюда относятся территории Республики Саха-Якутия и Хабаровского края. Географическим ограничением на западе служат реки Лена и

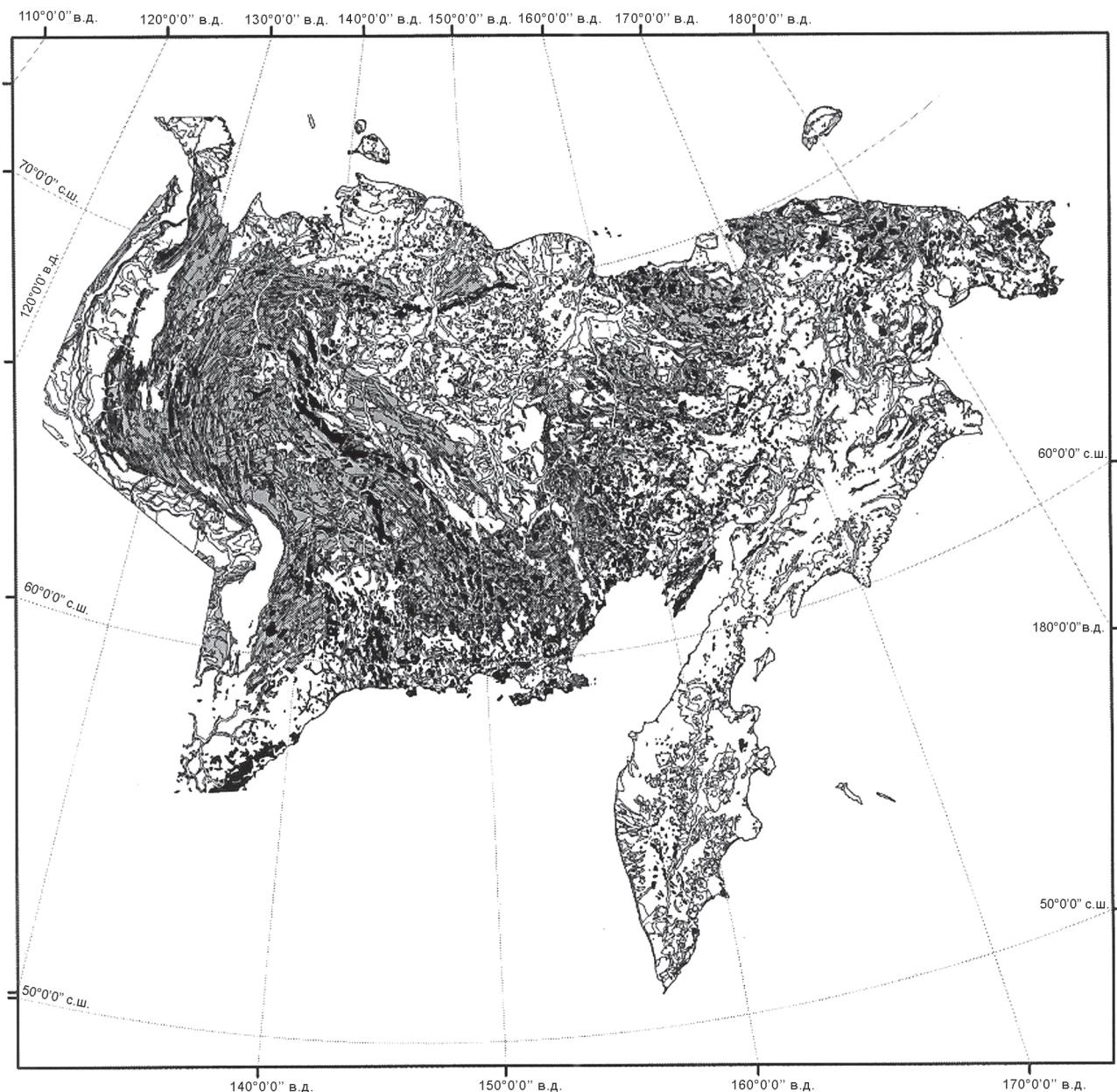


Рис. 4. Территория ГИС по геологии Северо-Востока.

Алдан с условным замыканием вдоль меридиана 135° в.д. на побережье Охотского моря (рис. 4). Источниками для формирования графической базы данных и определения координатной привязки объектов являлись изданные карты и схемы. Базовой картой послужила Геологическая карта Северо-Востока СССР масштаба 1:1 500 000, изданная под редакцией М.Е. Городинского (1980). Географическая нагрузка реализована дополнением системы слоями с данными по гидро-графии, населенным пунктам, дорожным сетям из Digital Chart of the World (ESRI, США).

Базовые программные продукты, примененные при работе над проектом, – ArcGIS (ESRI, США). Ввод графической информации реализован посредством векторизации потоком по растровой “подложке”, причем векторизация осуществлялась по уже спроектированному раству. С помощью формата данных ERDAS IMAGINE, позволяющего хранить координатную привязку растрового изображения и обладающего способностью быстро трансформироваться, задача подготовки первичных данных сводилась к выбору единой системы координат и созданию сети

опорных точек (тиков) для использования преобразованных растровых данных в одном проекте ArcMap. Полиномиальная трансформация производилась с использованием инструмента Image Geometric Correction (ERDAS IMAGINE). В качестве опорной нерегулярной сети выбиралось точное координатное положение различных географических объектов. Имея географические координаты тиков, средствами Coordinate Calculator (ERDAS IMAGINE) возможно получить координаты, эквивалентные заданному положению в мировом пространстве в любых единицах измерения используемой проекции системы координат.

Идентификация объектов и все операции по привязке и редактированию баз данных системы осуществлялась с использованием функций ArcMap. Оптимизации рабочего процесса по созданию ГИС способствовало использование сетевых многопользовательских геобаз данных, реализованных через ArcSDE (ArcGIS). На этапе согласования данных система реализована в виде послойной модели векторных примитивов, обладающих динамической связью с базой данных. Атрибутивная информация организована в виде реляционных баз данных. Созданные файлы слоев были использованы для дальнейшей компиляции геоинформационной системы. Конечные данные представлены в виде тематических слоев в формате шейп-файлов в географической системе координат.

Вся оцифрованная геологическая информация организована в виде геоинформационной системы, которая включает в себя 14 тематических слоев и насчитывает более 27 тысяч полигональных объектов, более 11 тысяч линейных и порядка 700 точечных объектов. Объем работы при реализации цифровой картографической основы может быть проиллюстрирован таким показателем, как количество объектов на единицу площади. В указанной ГИС он колеблется от 10,7 до 17,1 на 1 см² при отображении всех объектов в масштабе картографической основы.

Для удобства управления и организации полигональные векторные данные о докайнозойском фундаменте и кайнозойских отложениях были разбиты на следующие тематические слои: 1) докайнозойские стратифицированные образования; 2) кайнозойские стратифицированные образования; 3) интрузии; 4) крупные континентальные водоемы, отображаемые в виде полигонов. Раздельное представление стратифицированных и интрузивных образований обусловлено различной структурой атрибутивных таблиц для этих слоев. Выделение специального слоя континентальных водоемов необходимо для избежания "пустых мест" на общей цифровой карте и более точного отображения реальной ситуации с кайнозойскими отложениями. В случае необходимости географическая нагрузка может быть дополнена данными из известных открытых источников. Характеристика шейп-файлов полигональных слоев приведена в табл. 2. Структура таблиц атрибутивной информации полигональных тематических слоев соответствует легенде к геологической карте Северо-Востока СССР масштаба 1:1 500 000.

Из линейных слоев наиболее важен "Разрывные нарушения". Морфология разломов оцифрована с геологической карты, атрибутивная информация взята из легенды.

Точечный тематический слой «Месторождения полезных ископаемых» наиболее важен для практического применения. Данные были скомпилированы из различных источников [3, 16, 20]. Краткая характеристика его структуры приведена в табл. 3.

Как уже отмечалось, ни одна из рассмотренных ГИС не является закрытой системой, использо-

Таблица 2. Характеристика шейп-файлов полигональных слоев ГИС по геологии Северо-Востока России.

Название тематического слоя	Название Shp-файла	Количество объектов, шт	Объем, Мб
Стратиграфированные и метаморфические блоки пород докайнозойского возраста	Strat_AR_MZ	16864	24,2
Интрузии	Magma	5414	4,5
Отложения кайнозойского возраста	Strat_KZ	3970	10,8
Крупные континентальные водоемы	Lakes_rivers	1160	0,8

Таблица 3. Тематический слой "Месторождения полезных ископаемых" (точки).

Поле	Псевдоним	Описание
Название	Name	Наименование
Тип оруденения	Dep_type	Формационная принадлежность
Основные полезные компоненты	Commodities	Полезные компоненты
Металлогенический пояс	Belt_name	Принадлежность металлогеническому поясу
Геодинамическая позиция	Geodynamic	Доаккреционная, синаккреционная, постаккреционная

вание открытых форматов в их организации позволяет дополнять графику и базы данных любым количеством дополнительных объектов и записей, то есть вести мониторинг вновь появляющейся геологической информации и подстраивать системы под конкретные задачи.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ГИС

При создании региональных геологических ГИС в первую очередь предполагалось, что систематизация и анализ графической и атрибутивной информации в совокупности с применением генетических моделей рудообразования даст новый импульс прогнозно-поисковым работам в регионе. В практическом применении перечисленных ГИС четко обозначились три главных направления: 1) подготовка картографических продуктов; 2) информационно-справочные системы; 3) анализ и моделирование.

Примером работ по первому направлению может служить комплект разномасштабных карт для анализа россыпной золотоносности региона, составленных на основе ГИС по россыпным месторождениям золота Верхне-Колымского региона, а также многочисленные картографические продукты, выполненные для сопровождения различных геологических проектов.

Применение ГИС как информационно-справочных систем возрастает с течением времени, что связано с ущемлением программно-аппаратного обеспечения. Работы в данном направлении обычно предваряют исследовательские проекты и широко

используются на стадии постановки задачи. Подобно работе с картой, часто возникает необходимость сопоставления разномасштабной информации, для чего используются ГИС с ранжированной по масштабу первичной информацией. При этом, как правило, по мере уменьшения масштаба первичной информации увеличивается степень ее субъективности.

Самым важным с точки зрения практического применения ГИС является анализ и моделирование. Методические приемы анализа картографических данных в ГИС мало чем отличаются от методик обработки информации на традиционных картах. Алгоритмы получения количественных характеристик объектов и их математическая обработка общеприняты. Применение ГИС в качестве основы для анализа и моделирования позволяет задействовать весь набор их функциональных возможностей, а оперативность расчетов позволяет за короткий промежуток времени проверить большое количество предположений и гипотез и подобрать наиболее непротиворечивые из них.

Так как графическая составляющая векторных ГИС представлена тремя типами примитивов, то все виды анализа выполняются именно с ними. Это, например, расчет элементарных характеристик для точек (статистика скалярных величин), линий (длина ломаных линий и их направление), полигонов (координаты центроидов, площадь, периметр). Полученные характеристики для многих примитивов обрабатываются стандартными процедурами математического анализа и математической статистики. С точки зрения возможностей анализа очень большое значение имеет выбор примитивов для представления данных. Напри-

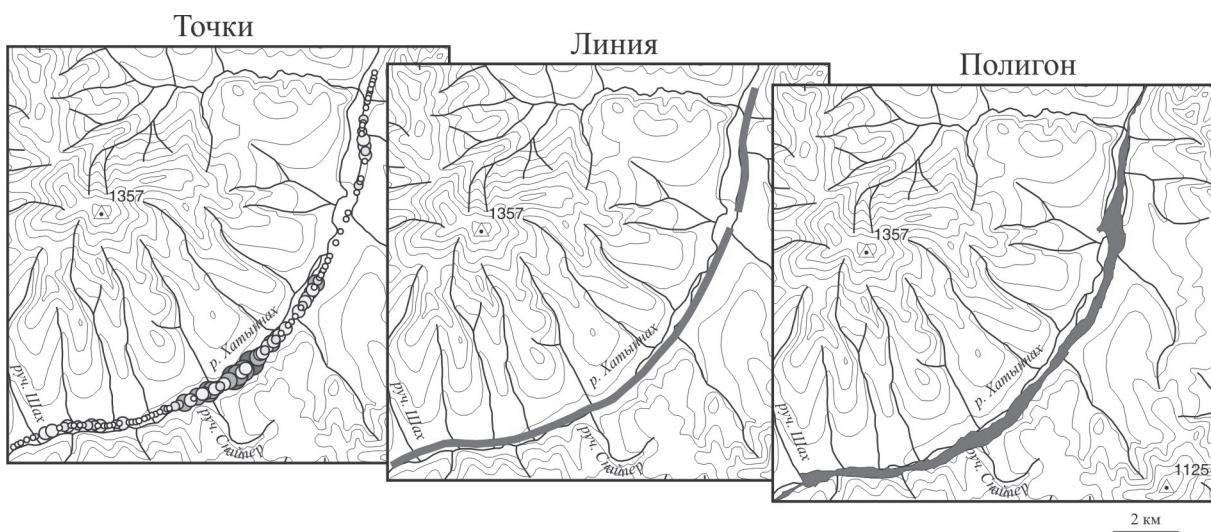


Рис. 5. Представление одного и того же объекта (россыпь р. Хатыннах, Ягоднинский район, Магаданская область) с помощью различных примитивов.

Таблица 4. Количество добытого золота в зависимости от ранга россыпей в Верхне-Колымском регионе.

Тип объекта	Количество россыпей	Сумма добытого Au (т)
Уникальные месторождения Au (>100 т Au)	3	443,2
Очень крупные месторождения Au (25-100 т Au)	15	705,7
Крупные месторождения Au (5-25 т Au)	75	636,6
Средние месторождения Au (1-5 т Au)	227	503,4
Мелкие месторождения Au (0,2-1 т Au)	254	132,7
Очень мелкие месторождения Au (<0,2 т Au)	247	22,4
Всего	821	2444

Таблица 5. Ранг и количество добытого золота преобразованных в точки россыпных объектов Верхне-Колымского региона.

Тип объекта	Количество точек	Сумма добытого Au (т)
Уникальные месторождения Au (>100 т Au)	0	0
Очень крупные месторождения Au (25-100 т Au)	14	490,0
Крупные месторождения Au (5-25 т Au)	70	728,1
Средние месторождения Au (1-5 т Au)	392	831,5
Мелкие месторождения Au (0,2-1 т Au)	661	323,2
Очень мелкие месторождения Au (<0,2 т Au)	854	71,2
Всего	1991	2444

Таблица 6. Насыщенность золоторудными объектами (экстенсивность оруденения, по С.С. Смирнову [12]) главных стратиграфических подразделений Верхне-Колымского региона.

Возраст	Площадь выходов отложений, км ²	Количество объектов	Площадь выходов, приходящаяся на 1 объект, км ²	Количество объектов на 1 км ²
Юра	19835	658	30	0,033
Триас	21651	596	36	0,028
Пермь	16427	383	43	0,023
Всего	57913	1637	35	0,028

мер, одну и ту же россыпь можно представить в виде полигона (-ов), линии (-ий) или набора точек (рис. 5). В зависимости от формы представления будут меняться и процедуры анализа. Например, атрибутивные данные для россыпей Верхне-Колымского региона, представленных в виде линий и точек, отражены в табл. 4, 5, из которых видно, что, хотя общее количество добытого золота не меняется, количество объектов увеличивается при точечном представлении данных. При этом, естественно, меняется и ранг объектов, и их пространственное размещение.

Картометрические функции (измерение расстояний, площадей, объемов и направлений), вычисление которых ранее представляло трудоемкую ручную операцию, с возникновением ГИС получили новую жизнь. В частности, площадь полигонов используется для подсчета выходов на поверхность и объемов геологических тел, относящихся к разным формациям пород. Расчет площади – автоматическая операция, выполняемая при создании графического при-

митива или изменении его пространственных координат. Поэтому основной смысл анализа площадей заключается в сравнении полученных значений между собой и выявлении закономерностей распределения полигональных объектов на изучаемой территории в зависимости от атрибутивных данных. Примером расчета может служить оценка выходов на поверхность стратифицированных образований Верхне-Колымского региона и их насыщенность золоторудными объектами (табл. 6).

К числу более сложных относятся комбинированные расчеты, примером которых может служить количественная оценка интенсивности гранитоидного магматизма по изолиниям распространенности пород на дневной поверхности (плотность распространения на плоскостном срезе) для территории Дальнего Востока, выполненная Н.П. Романовским [11] с помощью палеток. В ГИС данная задача решается последовательным выполнением вычислений площадей полигонов, образованием нового то-

чечного слоя и анализом плотности распределения точек на плоскости.

Морфометрические функции до сих пор очень мало применяются для анализа картографической информации именно в силу своей трудоемкости. Хотя показатели формы геологических тел, которые составляют основу геологической карты, могут характеризовать генезис объектов. Например, количественная характеристика формы интрузивных массивов в плане (показатель изометричности), зависящая от свойств расплава и тектонической обстановки внедрения, была рассчитана С.В. Беловым [1] для прогноза вольфрамового оруденения. Первые публикации по анализу формы (shape analysis) геологических объектов с помощью ГИС применительно к прогнозированию в металлогенических провинциях были сделаны австралийскими исследователями [15]. Похожие исследования были проведены нами по Верхне-Колымскому региону [8]. Под анализом формы понимается определение (расчет) количественных показателей полигонов с последующим выявлением статистических закономерностей распределения рассчитанных показателей на анализируемой территории. Зависимость формы геологических объектов от условий их образования предполагает дальнейшее практическое использование полученных показателей. В частности, можно выявлять локальные участки, соответствующие эталонным объектам (например, крупным месторождениям), и проводить поиск аналогичных площадей в пределах отдельных провинций, другими словами, проводить классификацию металлогенических провинций с использованием эталонных значений и прогнозировать оруденение на основе коэффициентов схожести формы. Морфометрический анализ, в большинстве случаев, имеет дело с фигурами неправильной формы. Алгоритмы анализа реализованы нами в виде расширения (модуля) ArcView с использованием Dynamic Link Library (dll), написанной на языке C++ в среде Microsoft Visual C++ 6.0 [8]. В зависимости от конкретных задач анализа вычисляются такие показатели, как фактор формы круга (округлость) или насколько рассматриваемая фигура близка к кругу, то есть фигуре, площадь которой ограничена минимальным периметром; блочность; квадратность и другие.

При анализе полигонов геологической карты невозможно упростить задачу к вычислению только одного показателя. Действительно, исследователь не может заранее определить, что важнее: насколько форма объектов близка к кругу, эллипсу или прямоугольнику? Преобладание одной из форм может выясниться только в процессе анализа, поэтому наибо-

лее рационально использование мультиплективных показателей, объединяющих в себе значения нескольких параметров. Какие параметры наиболее эффективны для вычисления мультиплективных показателей, в каждом конкретном случае можно определить с помощью корреляционного анализа.

Построение буферных зон используется в том случае, когда требуется определить пространственные области, окружающие графический примитив. Наиболее характерный пример использования данной операции – моделирование зон роговиков вокруг гранитоидных массивов.

Анализ близости основывается на выявлении двух ближайших точек среди заданного множества (поиск кратчайшего расстояния). Аналогом этой операции, выполненной ручными измерениями на геологической карте, являются расчеты распространенности золоторудных месторождений в зависимости от расстояния до границы гранитоидных интрузий или метаморфической изограды хлорит-биотит в террейне Мегума, Канада [19]. Аналогичные вычисления, выполненные методами ГИС, применены при анализе пространственного распределения золото-кварцевых месторождений относительно гранитоидов на территории Верхне-Колымского региона (рис. 6).

Посредством комбинирования операций оверлейного анализа решаются достаточно сложные задачи количественного изучения закономерностей распределения данных в пространстве. Например, вычисление зависимости удельной золотоносности территории от распространенности гранитоидов на поверхности включает следующие операции: 1) создание нового полигонального слоя, состоящего из равномерной сети элементарных ячеек, которые полностью перекрывают анализируемую площадь; 2) про-

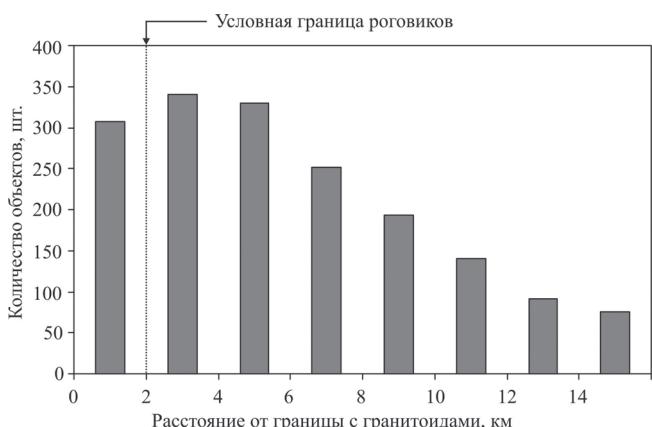


Рис. 6. Распространенность золоторудных объектов в зависимости от расстояния до гранитоидов и роговиков в Верхне-Колымском регионе.

ведение операции отсечения (clip) площади каждой элементарной ячейкой; 3) расчет показателей внутри каждой ячейки путем последовательного перебора объектов; 4) присвоение центру (точке) ячейки среднего или средневзвешенного числового значения для объектов, попавших в область отсечения; 5) создание новых точечных слоев, атрибутивным данным соответствуют вычисленные значения; 6) построение изолиний и расчет корреляционных связей (рис. 7).

Указанная работа была проведена для проверки возможной зависимости экстенсивности золото-кварцевого оруденения (количества объектов на единицу площади) от коэффициента насыщенности вмещающих пород гранитоидами (относительной площади гранитоидов на современной поверхности) на площади, ограниченной Верхояно-Колымским складчато-надвиговым поясом, Кулар-Нерским турбидитовым террейном, Полоусно-Дебинским террейном аккреционного клина, Нагонджинским турбидитовым террейном и Вилигинским перикратонным турбидитовым террейном. Известно, что золото-кварцевые месторождения Северо-Восточной Азии, приуроченные к метатурбидитовым террейнам, имеют близкие пространственно-временные связи с гранитоидными интрузиями, что явилось основанием для многолетних дискуссий относительно генезиса руд. ГИС-технологии позволили на количественном уровне подойти к решению вопросов пространственной связи гранитоидного магматизма и золотого оруденения. Ранее, с использованием ГИС, была вычислена зависимость между насыщенностью различных металлогенических провинций гранитоидами и количеством промышленного золота [6]. Проведенные исследования показывают возможность использования аналогичных показателей для выделения наиболее перспективных площадей в пределах отдельных золотоносных провинций.

Границы террейнов взяты с GIS Compilation of Geophysical, Geologic, and Tectonic Data for Circum-North Pacific [16], границы гранитоидов – с ГИС по геологии Северо-Востока СССР. В результате проведенных расчетов было выявлено, что максимальное количество золоторудных месторождений попадает в интервал 0–15 % насыщенности гранитоидами, со средним значением 7,7 % при окружности радиусом 20 км и 8,8 % при окружности радиусом 40 км [22]. При ячейке радиусом 40 км распределение ближе всего соответствует нормальному. Таким образом, зону с относительной площадью гранитоидов от 5 до 10 % можно считать наиболее благоприятной для размещения золото-кварцевых месторождений. С геологической точки зрения, выделенные зоны могут

интерпретироваться как периферические части гранитно-метаморфических куполов, которые благоприятны для размещения золото-кварцевого оруденения.

Измерение стереологических параметров выполняется для характеристики объемной (трехмерной) структуры объектов, при этом основой для их расчета служат значения площади и периметра примитива, полученные с карты. Как правило, эти параметры используются для описания структур, элементы которых связаны между собой в пространстве. Трехмерное моделирование в сочетании с другими функциональными возможностями ГИС было применено для расчета баланса между рудной и россыпной золотоносностью в Дегдекан-Арга-Юряхском рудном узле Верхне-Колымского региона [10]. Величина эрозионного среза и количество золота, сконцентрированного в россыпях, дают возможность с помощью балансовых расчетов оценить гипотетическое количество рудного золота на единицу объема эродированных пород. Проведение балансовых расчетов интересно также с точки зрения прогнозирования рудных объектов, локализованных ниже современной поверхности.

Предлагаемая модель баланса рудной и россыпной золотоносности основывается на ряде постулируемых положений. Во-первых, запасы золота в аллювиальных россыпях соответствуют геологическим запасам золота, освободившегося из золотосодержащих руд в экзогенных процессах, с учетом показателя россыпеобразующей продуктивности коренных источников. Во-вторых, современный рельеф бассейнов представляет собой случайный срез всего объема пород, вмещающих золото-кварцевое оруденение, и характеризует их золотоносность в этом объеме. Расчлененность рельефа позволяет рассматривать его как поверхность, варьирующую по координате Z от самой низкой высотной отметки днища долины до самой высокой отметки водораздела и производящую случайную выборку срезанных ею золоторудных объектов. Площадь поверхности бассейнов с учетом рельефа своей разностью с площадью проекции бассейна на горизонтальную плоскость численно показывает расчлененность рельефа и вероятность охвата им большего количества рудных тел. Характер зависимости частоты встречаемости золоторудных объектов от абсолютных высот их выходов соответствует распределению интервалов высот рельефа по занимаемым площадям (рис. 8). Таким образом, поверхность рельефа несет информацию о золотоносности некоторого объема вмещающих пород на высоту превышения долин.

На основе постулируемых положений, расчет баланса рудного и россыпного золота сводится к вы-

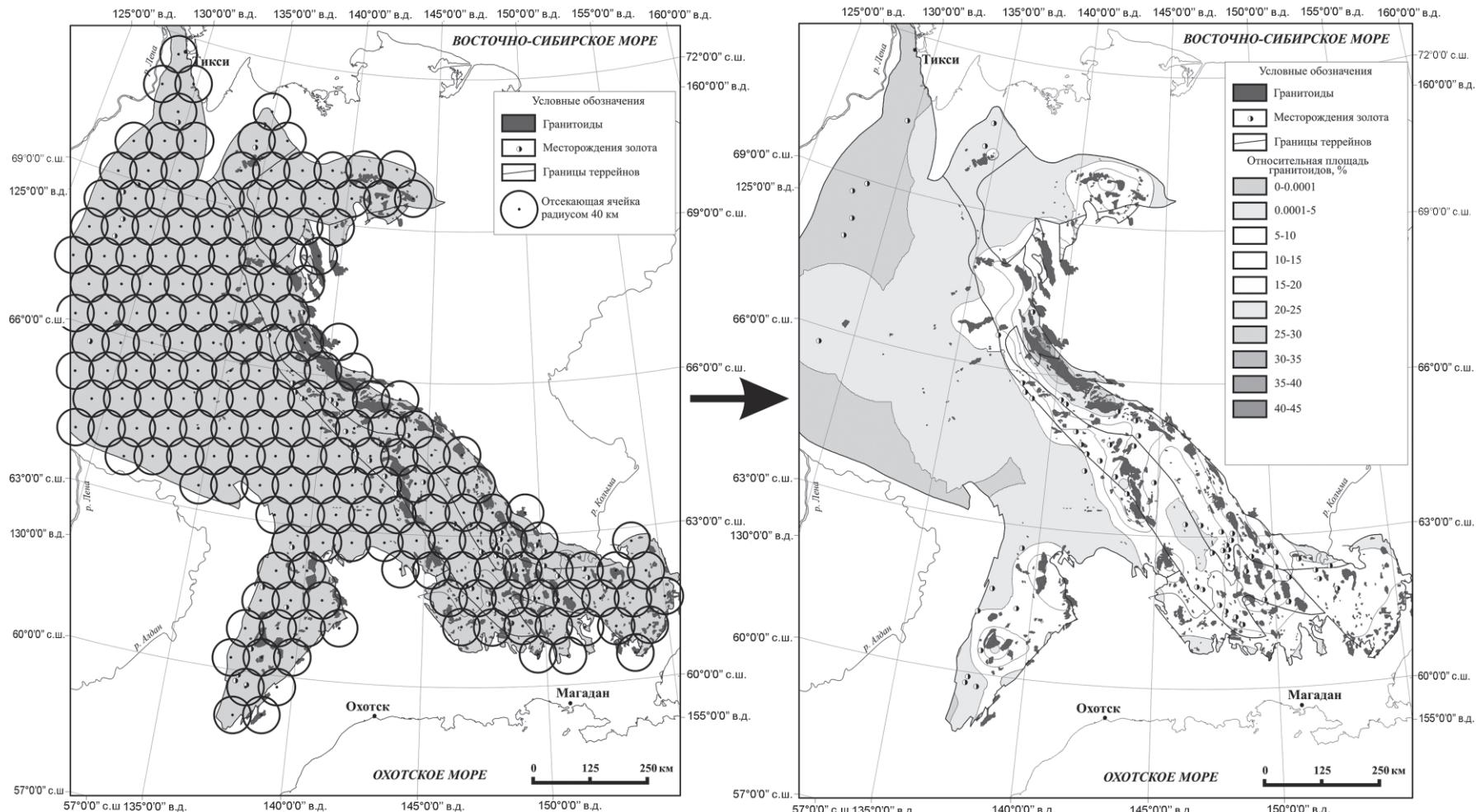


Рис. 7. Анализ зависимости экстенсивности золотого оруденения (количество золоторудных месторождений на единицу площади) на территории от распространенности гранитоидов на поверхности с помощью отсекающей ячейки.

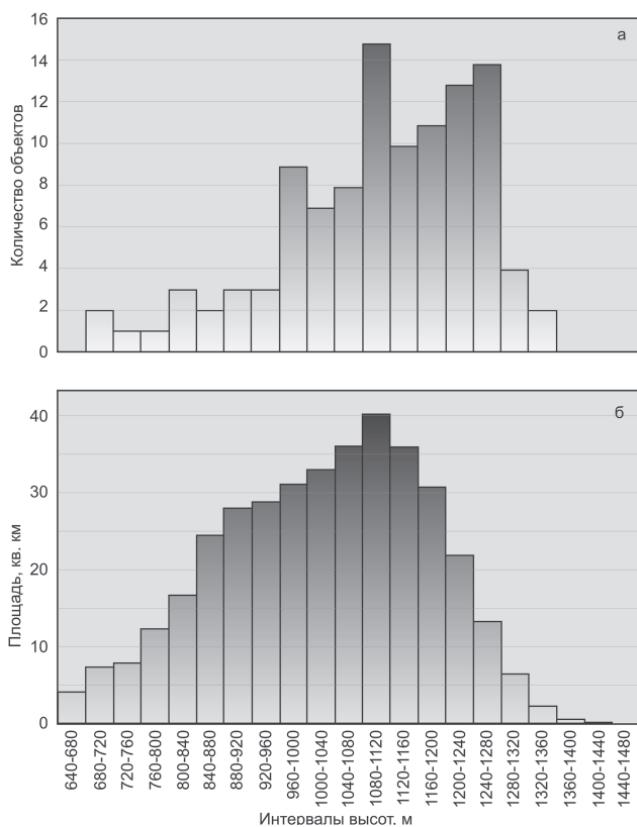


Рис. 8. Характер размещения рудных объектов Дегдекан-Арга-Юряхского рудного узла по высоте.

а – абсолютные отметки рельефа, б – распределение интервалов высот рельефа в зависимости от занимаемой площади.

числению гипотетического количества рудного золота, содержащегося в объеме пород, эродированных при формировании бассейна водотоков, и выявлению (или подбору) условий, при которых он будет соответствовать количеству россыпного золота. Уравнение баланса имеет следующий вид:

$$P = (V \times C \times E)/100,$$

где Р – количество золота, добываемого из россыпей бассейна водотока, т; V – объем эродированных пород, вмещающих золотоносную минерализацию, км^3 ; С – удельная объемная золотоносность вмещающих пород, $\text{т}/\text{км}^3$; Е – показатель россыпнообразующей продуктивности коренных источников, %.

Для проведения расчетов на основе ГИС-технологий была скомпилирована цифровая векторная модель территории Дегдекан-Арга-Юряхского узла. В ГИС включены графические и атрибутивные данные, представленные в виде локальных шейп-файлов и SDE классов многопользовательской геобазы данных по темам: рельеф, гидрография, рудные и россыпные

месторождения золота. Векторная модель Дегдекан-Арга-Юряхского узла послужила основой для построения TIN-поверхностей выбранных бассейнов в модуле 3D Analyst. Нерегулярная триангуляционная сеть (TIN) построена по точкам, каждой из которых сопоставлено значение, соответствующее высоте. По этим точкам производится построение сети треугольников, т. е. триангуляция, которая образует непрерывную поверхность в трехмерном пространстве (рис. 9). Построение TIN-поверхностей производилось для каждого бассейна в отдельности в пределах границ полигонов слоя «Контуры бассейнов». Стандартный интерфейс ArcMap с помощью функций анализа поверхности (Surface Analysis) модуля 3D Analyst позволил без привлечения дополнительного программного обеспечения вычислить площади проекций на горизонтальную плоскость, площади поверхностей с учетом рельефа и объемы эродированных пород для выделенных бассейнов.

Расчет производился на основе нормированной объемной золотоносности, не зависящей от других показателей баланса и оцененной по данным о разведке и эксплуатации коренных месторождений, проявлений и пунктов минерализации золота, известных на территории узла. Исходя из принятого уравнения баланса, задача определения величины эрозионного среза сводится к определению величины объема эродированных пород, на который нужно распространить рассчитанную по коренным источникам золотоносность эродированных пород, чтобы при определенной россыпной продуктивности этих коренных источников в бассейне было накоплено имеющееся количество россыпного золота.

Полученные результаты показывают, что россыпи Дегдекан-Арга-Юряхского узла были сформированы за счет золото-кварцевых месторождений (60 %), рудопроявлений (20 %) и пунктов минерализации (20 %). По мере изменения характера коренных источников с юго-востока на северо-запад (от концентрированного крупного источника в бассейне руч. Дегдекан до многочисленных рассеянных пунктов минерализации в бассейне р. Арга-Юрях) меняется и удельная золотоносность от 1,8 до 0,2 т/км³, при среднем значении 0,5 кг/км³. Таким образом, формирование крупных россыпей узла возможно как за счет концентрированных крупных источников жильного типа (руч. Дегдекан), так и обширных полей мелких прожилковых проявлений (руч. Улахан-Аурум).

ОБСУЖДЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Применение функциональных возможностей ГИС для прогнозно-поисковых целей в настоящее время оставляет желать лучшего. Анализ закономер-

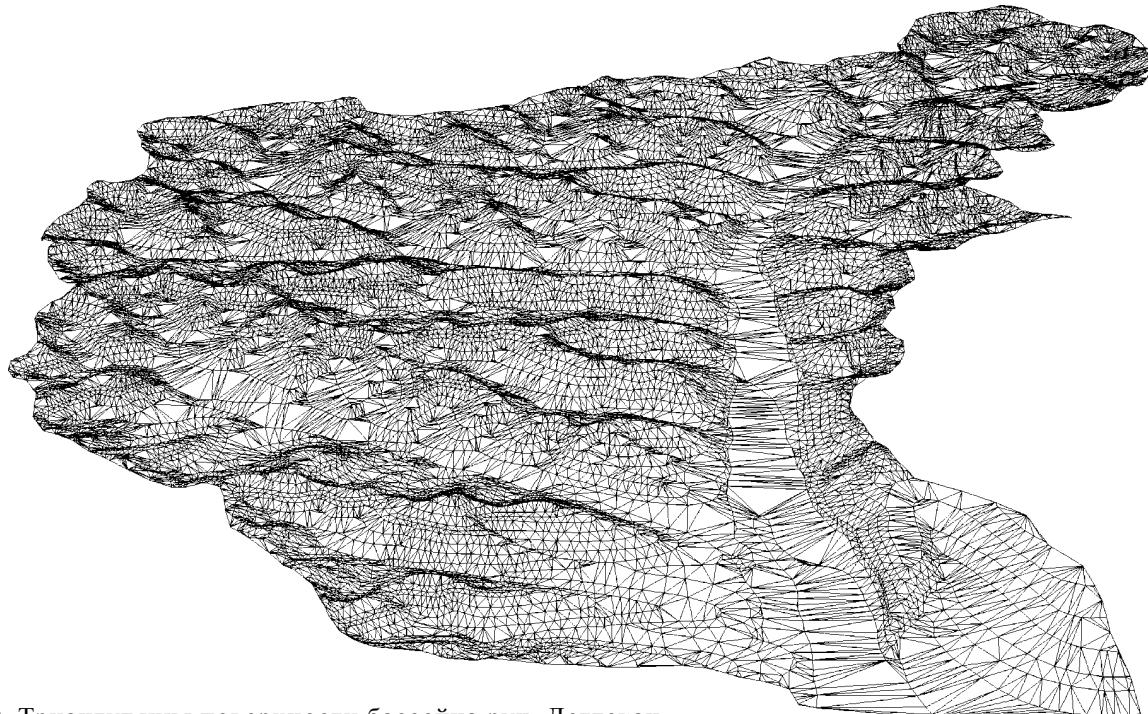


Рис. 9. Триангуляция поверхности бассейна руч. Дегдекан.

ностей размещения месторождений подразумевает выявление зависимостей между геологическими признаками и пространственной локализацией объектов того или иного типа. Наибольшую методическую проблему на стадии подготовки данных для анализа представляет собой перевод геологических признаков на карте в количественные показатели в ГИС. Плохая структуризация информации, ее субъективность, не-представительность – причины, не позволяющие использовать функциональные возможности ГИС в полном объеме. В то же время, в геохимии и геофизике хорошо разработаны решения для анализа пространственного распределения точек (например, преобразование нерегулярной сети в регулярную, построение карт изолиний и т. д.). Различные алгоритмы анализа линий хорошо известны из методов структурной геологии, применяемых при изучении трещин. Появились также примеры применения статистического анализа сложных полигональных объектов в ГИС, составляющих главную содержащую нагрузку геологических карт.

Одно из необходимых условий успешного применения ГИС для металлогенических и прогнозно-поисковых целей – следование конкретным генетическим моделям оруденения, что подчеркивается в ряде методических работ [13]. Для разных металлогенических провинций и моделей используются различные факторы контроля оруденения. Например, для орогенных золоторудных месторождений

Блока Илгарн (Западная Австралия) при анализе ГИС принимались во внимание [17]: 1) близость к границам зон зеленосланцевого метаморфизма и гранитоидов, ориентировка и кривизна этих границ; 2) близость к сегментам разломов определенной ориентировки; 3) близость к конкретным литологическим контактам, которые также характеризуются определенной направленностью; 4) близость к антиклинальным структурам; 5) наличие вмещающих пород определенного состава и свойств, например, долеритов. В результате анализа ГИС были выделены аномальные участки, которые занимают менее 0,3% всей площади и содержат 16 % уже известных месторождений, из которых было добыто более 80% золота региона.

При прогнозировании золоторудных месторождений эпимерального и порфирового типов в центральных Андах учитывались другие параметры [14]: 1) литология и стратиграфия вмещающих пород; 2) литологические и стратиграфические контакты; 3) структурные нарушения; 4) глубина и угол падения зоны Беньоффа, смоделированные по сейсмическим данным. В результате последовательного совмещения зон, благоприятных для оруденения, по каждому параметру были выделены наиболее благоприятные для оруденения участки, которые включают около 24 % всех месторождений региона, содержащих приблизительно 51 % золота.

Пространственно-статистический подход [2] был применен нами для анализа золотоносности Яно-Колымского металлогенического пояса. Расчеты проводились на основе описанных выше ГИС для металлогенических единиц разных рангов: от провинций до рудных узлов. Была использована метаморфогенная модель образования золото-кварцевых месторождений. Источниками рудного вещества и растворов для золото-кварцевых месторождений послужили терригенные углеродсодержащие породы верхоянского комплекса. Мобилизация флюидов (воды и углекислоты) и рудных компонентов в осадочных породах происходила при температуре и давлении, приблизительно соответствующих биотитовой изограде прогрессивного метаморфизма, что отвечает зоне перехода между зеленосланцевой и амфиболитовой или зеленосланцевой и роговиковой фациями метаморфизма. Золото-кварцевые месторождения, за исключением метаморфизованных объектов, локализуются в толщах с пиритом над фронтом пирротинизации, приблизительно совпадающим с поверхностью биотитовой изограды.

Геологические объекты и методы их анализа приведены в табл. 7. При оверлейном анализе рассчитывались упоминавшаяся выше плотность распространения гранитоидов, насыщенность стратиграфических подразделений месторождениями и рудопроявлениями (экстенсивность оруденения), продуктивность орудения и другие параметры. В результате были оконтурены зоны, наиболее благоприятные для размещения минерализации на современном уровне эрозионного среза [9, 22]. Подчеркнем, что параметры для анализа информации разных масштабов отличались между собой. Например, при крупномасштабных исследованиях появляется возможность использовать такие объекты, как маркирующие слои, которые не отображаются на картах мелкого масштаба, в то же время, вычисление плотности пространственного распределения гранитоидов имеет смысл только при анализе региональной информации.

За последние годы произошли серьезные качественные изменения возможностей серийных про-

граммных продуктов. Во многие из них были включены инструменты для пространственного моделирования и статистического анализа пространственно распределенных данных. Для решения задач прогнозирования стали применяться методы распознавания образов, нечеткой логики, нейронных сетей [18]. Многие вычисления, которые раньше требовали дополнительного программирования со стороны пользователей, стали возможны как стандартные операции. Это отражает общую тенденцию к максимальному упрощению схем обработки данных (использованию готовых сценариев) по мере роста количества исследовательских проектов на основе геологических ГИС. В то же время, большинство пользователей ориентировано на применение ГИС в качестве информационно-справочных ресурсов. Поэтому вполне оправдано создание на основе ГИС информационных систем с готовыми схемами запросов. Одним из компонентов подобных систем должны быть региональные электронные тематические коллекции пространственно привязанных растровых изображений геологических обнажений, образцов (взаимоотношения, текстурно-структурные характеристики, фауна, флора и т.д.), прозрачных и полированных шлифов, пластиинок, а также связанных с ними аналитических данных.

Начало этой работе положено организацией и систематизацией картографической информации о геологии и полезных ископаемых региона в виде единого Электронного атласа Северо-Востока России, доступного в Internet (<http://atlas.magis.ru/>). Форма представления данных подразумевает возможность их использования пользователями разного уровня подготовленности (рис. 10). Структура данных в интернет-версии обусловлена, с одной стороны, содержанием атласа, а с другой стороны – ограничениями применявшимся программных продуктов, в частности ArcIMS (ESRI, США). На данном этапе работы вся информация разбита на несколько крупных блоков: география, геология, биоразнообразие. Геологический блок полностью основан на ГИС по геологии Северо-Востока России.

Таблица 7. Методы анализа геологических объектов, представленных в виде векторных примитивов в ГИС.

Геологические объекты	Графические примитивы	Методы анализа
Стратиграфические и литологические подразделения; интрузивные образования	Полигоны	Анализ плотности пространственного распространения, анализ направлений, анализ формы
Разрывные нарушения; дайки; жилы, зоны прожилкования; маркирующие горизонты, россыпи	Линии	Анализ плотности пространственного распространения, анализ направлений, анализ продуктивности (для россыпей)
Месторождения, рудопроявления и пункты минерализации	Точки	Анализ плотности пространственного распространения, анализ продуктивности

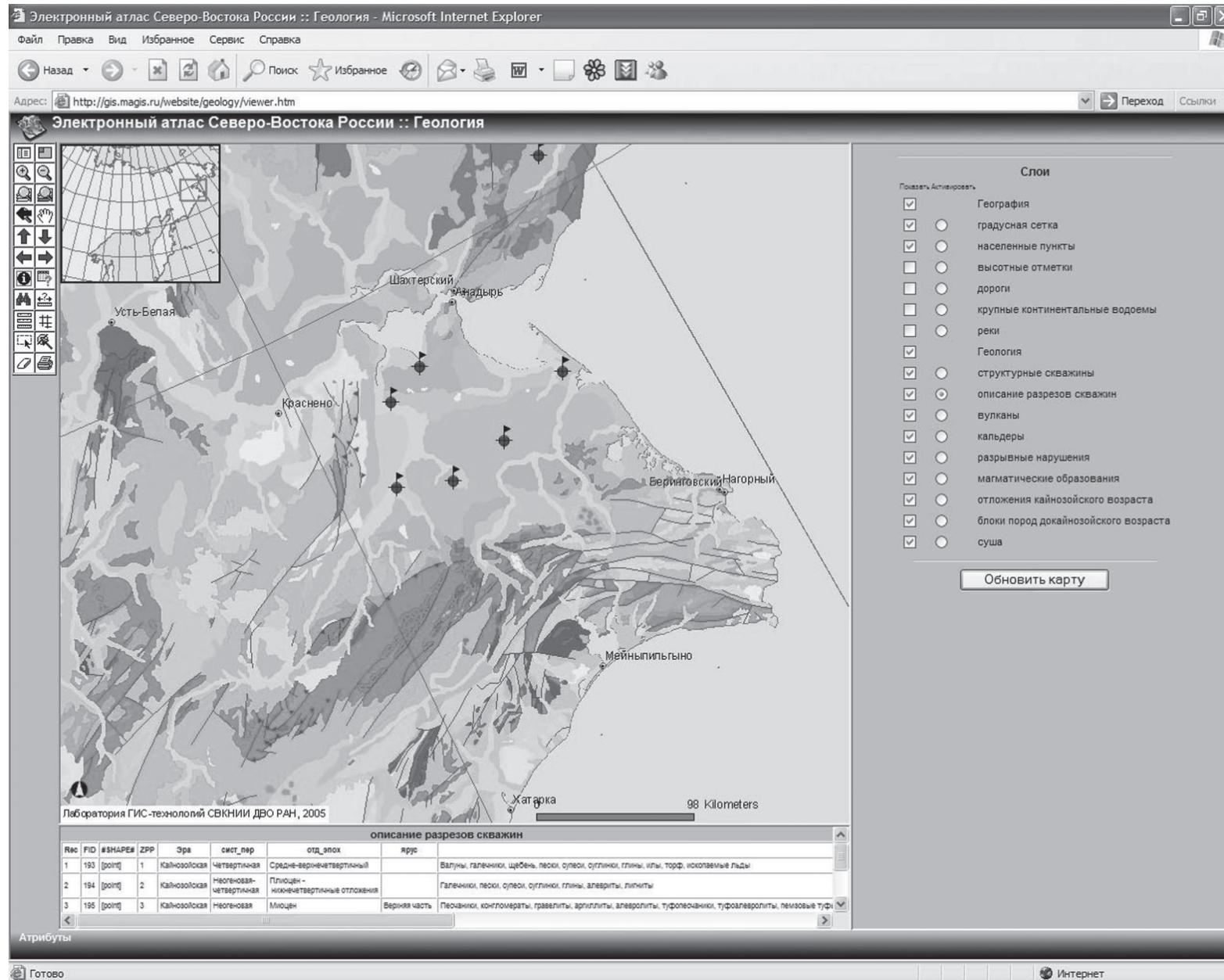


Рис. 10. Фрагмент Электронного атласа Северо-Востока России.

Переход между блоками и управление внутри них осуществляется с помощью стандартного HTML-интерфейса. Разветвленная иерархичная структура атласа привела к необходимости создания большого количества автономных проектов ArcGIS, связь между которыми осуществляется также с помощью HTML-интерфейса. Такая организация облегчает восприятие многочисленных наборов данных, но в то же время существенно снижает аналитические возможности системы.

Электронные коллекции пока формируются автономно на базе HTML технологий (<http://www.magis.ru/texture/index.htm>). В дальнейшем предполагается их интеграция в единую систему электронного атласа. Пространственное положение будет определяться как с помощью географических координат, так и с помощью привязки к объектам, например, месторождениям.

Таким образом, созданные на территории Северо-Востока России региональные векторные ГИС по геологии и полезным ископаемым служат каркасом для подготовки новых картографических продуктов, в качестве информационно-справочных систем, для прогнозно-поисковых целей на основе анализа и моделирования пространственной информации. При решении прогнозно-поисковых задач необходимо серьезное внимание уделять как качеству геологической информации, скомпилированной в региональные ГИС, так и генетическим моделям образования конкретных типов минерализации, на которых базируются алгоритмы анализа. Дальнейшее развитие региональных ГИС планируется за счет их объединения с другими информационными ресурсами и создания электронных атласов с доступом через Интернет.

БЛАГОДАРНОСТИ

Поддержка работе оказана ДВО РАН (грант № 04-1-01-010), РФФИ-ДВО РАН “Дальний Восток” № 06-04-96049, Программой Отделения наук о Земле РАН «Фундаментальные проблемы геологии и геохимии нефти и газа и развитие нефтегазового комплекса России» (гранты 2004-2005 гг.) и ООО ДАТА+. Постоянное внимание и методическая помощь оказывалась Объединенным научным советом РАН по проблемам геоинформатики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов С.В. Хоггарская вольфрамоносная провинция (Центральная Африка) / Геология руд. месторождений. 1999. Т. 41, № 1. С. 15–35.
2. Богацкий В.В., Коллеганов Ю.М., Суганов Б.И. Пространственно-статистический анализ геологического строения и размещения полезных ископаемых. М.: Недра, 1976. 104 с.
3. Вознесенский С.Д., Огородов В.А., Маннафов Н.Г. и др. Объясн. зап. к геологической карте и карте полезных ископаемых Охотско-Колымского региона м-ба 1:500 000 в 4-х кн. Магадан. 1999.
4. Ворошин С.В. Геоинформационная система по геологии и полезным ископаемым Верхне-Колымского региона – прототип компьютерной организации геологической информации // Колымские вести. 1998. № 1. С. 32–33.
5. Ворошин С.В., Мельник В.Г., Зинкевич А.С. Региональные геоинформационные системы по геологии и полезным ископаемым в Магаданской области. ARCREVIEW, ООО Дата+. 2000. № 3 (14). С 7.
6. Ворошин С.В., Гончаров В.И., Зинкевич А.С., Мельник В.Г. Удельная золотоносность металлогенических провинций и гранитоидный магматизм // Докл. РАН. 2002. Т. 387, № 6. С. 801–805.
7. Гальцева Н.В., Ворошин С.В., Мельник В.Г., Лапшин Ю.В. Мониторинг как основа управления золотодобывающей отраслью региона // Минеральные ресурсы России. 1999. № 6. С. 41–45.
8. Голубенко И.С., Ручкин Ю.А., Ворошин С.В. Двухмерный анализ формы полигональных объектов в геоинформационных системах геологического содержания // Геоинформатика. 2003. № 3. С. 3–12.
9. Голубенко И.С., Ворошин С.В. Геоинформационный анализ пространственных закономерностей размещения золотой минерализации в Дегдекан-Арга-Юряхском рудно-rossыпном узле // Геоинформатика. 2005. № 3. С. 3–16.
10. Зинкевич А.С., Ворошин С.В. Применение ГИС-технологий для расчета баланса рудного и россыпного золота (на примере Дегдекан-Арга-Юряхского рудно-россыпного узла, Магаданская область) // Геоинформатика. 2005. № 2. С. 12–21.
11. Романовский Н.П. Способ количественной оценки проявлений гранитоидного магматизма при глубинных геологогеофизических исследованиях (на примере Дальнего Востока СССР) // Тихоокеан. геология. 1984. № 1. С. 113–120.
12. Смирнов С.С. К оценке оловорудных районов // Сов. геология. 1941, № 3. С. 3–16.
13. Создание Государственных геологических карт на базе ГИС ИНТЕГРО: Методические рекомендации. М.: ГНЦ ВНИИГеосистем, 2001. 208 с.
14. Billa M., Cassard D., Lips A.L.W., Bouchot V., Tourliure, Stein G., Guillou-Frottier L. Predicting gold-rich epithermal and porphyry systems in the central Andes with a continental-scale metallogenic GIS // Ore Geol. Rev. V. 25. 2004. P. 39–67.
15. Gardoll S.J., Groves D.I., Knox-Robinson C.M., Yun G.Y. and Elliott N. Developing the tools for geological shape analysis, with regional- to local- scale examples from the Kalgoorlie Terrane of Western Australia // Australian Journal of Earth Sciences. N 5. 2000. P. 943–953.
16. Greninger M.L., Klempner S.L., Nokleberg W.J. Geographic Information System (GIS) Compilation of Geophysical, Geologic, and Tectonic Data for the Circum-North Pacific // U.S. Geological Survey Open-File Report 99-422, Version 1.0. 1999.
17. Groves D.I., Goldfarb R.J., Knox-Robinson C.M., Ojala J., Gardoll S., Yun G.Y., Holyland P. Late-kinematic timing of orogenic gold deposits and significance for computer-based

- exploration techniques with emphasis on the Yilgarn Block, Western Australia // *Ore Geol. Rev.* V. 17. 2000. P. 1–38.
18. Kemp L.D., Bonham-Carter G.F., Raines G.L., Looney C.G. Arc-SDM: extension for spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural network analysis. 2001. <http://ntserv.gis.nrcan.gc.ca/sdm/>.
 19. Mawer C.K. The bedding-concordant gold-quartz veins of the Meguma Group, Nova Scotia, in Turbidite-hosted gold deposits, Editors: Keppie, J.Duncan, Boyle, R.W., and Haynes, S.J., Geological Association of Canada Special Paper 32, 1986. P. 135–148.
 20. Nokleberg W.J., West T.D., Dawson K.M. et al. Summary terrane, mineral deposit, and metallogenic belt maps of the Russian Far East, Alaska, and the Canadian Cordillera // U.S. Geological Survey Open-File Report 98–136. 1998.
 21. Voroshin S.V., Melnik V.G., Zinkyevich A.S., Tyukova Ye.E. The regional GIS on geology in the Magadan region // International Conference “GIS in Geology” Extended abstracts. Moscow: Vernadsky SGM RAS. 2002. P. 114–116.
 22. Voroshin S.V., Zinkevich A.S. Spatial analysis of the granitoid and gold-quartz deposits distribution in the Yano-Kolyma belt by the GIS // II International Conference “GIS in Geology” Extended abstracts. Moscow: Vernadsky SGM RAS, VNII Geosystem. 2004. P. 102.
 23. Voroshin S.V., Melnik V.G., Zinkevich A.S. Development of geological GIS in Magadan Region / Proceedings of the Interim IAGOD Conference. Vladivostok. Russia. 1–20 September 2004. Metallogeny of the Pacific Northwest: Tectonics, Magmatism and Metallogeny of Active Continental Margins / Vladivostok: Dalnauka. 2004. P. 612–615.

Поступила в редакцию 19 мая 2006 г.

Рекомендована к печати Н.А. Горячевым

S.V. Voroshin, A.S. Zinkevich, Ye.E. Tyukova

Regional geoinformation systems for geologic investigations: creation and analysis experience

The paper offers the results of the development and application of the regional geological and mineral resources GIS compiled at the GIS laboratory of the North-East Integrated Research Institute, FEB RAS, to conduct research throughout Northeast Russia: GIS regarding geology and mineral resources of the Upper Kolyma region; geology and mineral resources of the Anmandykan and Kubaka mineral districts; geology of the Kolyma-Omolon region; gold placer deposits of the Central Kolyma region; mineral resources of the Magadan municipal district; geology of the Okhotsk-Kolyma region; and geology of Northeast Russia. The initial maps were of different scale: 1:50000 to 1:1500000. Three principal aspects of geological GIS application in the Magadan region are discussed: (1) maps or atlases preparation; (2) reference systems; and (3) analysis and modeling. The third aspect is most important for prospecting and forecast. Besides the quality of the initial geological information it is important to focus attention on the genetic models of formation of particular mineralization types for spatial analysis and modeling. In future we plan to combine regional GIS with other information resources and to create E-atlases to be accessed through Internet.

Key words: regional geoinformation systems, geology-related GIS, Northeast Russia.

ИНТЕГРАЦИЯ ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ БАЗ ДАННЫХ И ГИС ДЛЯ АНАЛИЗА
ЭВОЛЮЦИИ МАГМАТИЗМА НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ АЗИИ

B.B. Акинин, С.В. Ворошин

Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН, г. Магадан

Представлен первый вариант региональной информационной системы, объединяющей геохронологическую базу данных ГЕОХРОН и ГИС по геологии Северо-Востока России. Рассмотрено текущее состояние баз данных, ограничения некоторых изотопных методов датирования и рекомендации по представлению информации. Продемонстрированы некоторые потенциальные возможности использования интегрированной информации на примерах исследования эволюции магматической активности всего региона, оценки вулканической активности в Охотско-Чукотском вулкано-плутоническом поясе, анализа плотности пространственного размещения гранитоидов и золоторудных месторождений в Яно-Колымском золотоносном поясе.

Ключевые слова: изотопная геохронология, базы данных, ГИС, Северо-Восток Азии.

ВВЕДЕНИЕ

Фундаментальная цель геохронологических исследований – реконструкция эволюции процессов на Земле в глобальном и региональном масштабе. Время является важнейшим фактором при любых геологических построениях, будь то «относительный» возраст, определяемый на основе биостратиграфических и других корреляций, или «абсолютный» возраст, определяемый методами изотопной геохронологии. Прогресс в развитии прецизионных изотопно-геохронологических методов, связанный с успехами микроопробования, повышения точности и надежности определения возраста и термальной истории геологических объектов, возрастанием аналитических возможностей лабораторий в целом, мотивирует геологов к использованию изотопных датировок в качестве ключевого параметра при интерпретациях и моделировании геологических процессов.

Базы данных радиометрического возраста являются важнейшей составной частью создаваемой сейчас мировым научным сообществом киберинфраструктуры ХРОНОС (CHRONOS – <http://www.chronosnetwork.org>). Приоритетными данными для создаваемой онлайновой базы радиометрических данных ERRAD будут: 1) даты, напрямую калибрующие или ограничивающие геологическую шкалу Земли для последних 600 млн лет; 2) даты интрузивных и эфузивных пород, которые могут быть ис-

пользованы для ограничения возраста пород, содержащих органические остатки (в случае секущих или несогласных взаимоотношений); 3) докембрийские даты, представляющие информацию об истории планеты до появления животных (<http://earthref.org>). Совершенно очевидно, что получаемые для этих целей датировки должны быть выполнены с помощью современных прецизионных методов изотопного датирования, неоднократно воспроизведенных в ряде лабораторий и разными методами.

Северо-Восток Азии относится к потенциальным геологическим полигонам для решения обозначенных выше задач, и уже сейчас можно ставить вопрос о проведении систематических прецизионных геохронологических измерений на ряде объектов. Существующие на сегодняшний момент архивные радиометрические датировки (главным образом K-Ar и Rb-Sr изохронные по валу) не удовлетворяют во многих случаях современным требованиям точности и надежности, однако могут быть использованы как предварительные данные. Одним из таких примеров является база данных ГЕОХРОН, созданная в 1996 г. в СВКНИИ ДВО РАН [1]. Также совершенно очевидно, что для полноценного геологического анализа одной только базы данных, пусть даже с очень хорошо разработанной структурой, не достаточно. Наилучшее для геолога решение может быть достигнуто при комбинировании геохронологической базы данных с геоинформационной системой геологического

содержания. Такая интеграция позволит оперативно решать следующие задачи: 1) выполнение информационно-справочных запросов; 2) визуализацию данных, создание картографических материалов; 3) проведение количественных расчетов, оперирующих с площадями и объемами пород; 4) анализ пространственного распределения типов и комплексов пород; 5) проведение геодинамических, тектонических и металлогенических реконструкций; 6) пространственное моделирование различных геологических процессов. Например, можно предметно обсуждать вопросы выделения магматических комплексов в пространстве, рассчитывать объем и продуктивность вулканических извержений и пространственно-временные особенности эволюции магматических и рудных процессов.

Первый вариант такой объединенной системы, выполненный на основе ГИС по геологии Северо-Востока России [24] и базы данных ГЕОХРОН [1], некоторые возможности и примеры использования мы представляем в настоящей статье.

ПРИНЦИПЫ ИНТЕГРАЦИИ ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ В ГИС

ГИС скомпилирована на основе Геологической карты Северо-Востока СССР масштаба 1:1 500 000 [8], изданной под редакцией М.Е. Городинского в 1980 г. (более детальная характеристика ГИС приводится в статье С.В. Ворошина и др. в этом же номере журнала). Информация о геологии (без учета разрывных нарушений) разделена на полигональные векторные слои с атрибутивной информацией, соответствующей легенде (табл. 1, 2, 3). Это кайнозойские стратифицированные образования (3970 объектов), докайнозойские стратифицированные образования (16864 объекта) и интрузии (5414 объектов). Как видно из таблиц, все полигоны характеризуются возрастом, соответствующим геохронологической шкале. В идеале каждому из указанных полигональных объектов должна соответствовать запись с числовым значением возраста. К сожалению, пока это не достижимо, а числовые значения имеются главным образом для магматических образований, причем отнесенным как к статифицированным образованиям (вулканиты), так и к интрузиям. Данные по датировкам организованы в виде отдельного точечного слоя. Атрибуты точек могут быть легко присвоены полигонам стандартными средствами ГИС. Однако существует ряд неопределенностей, связанных с наличием нескольких различающихся между собой датировок одного и того же геологического объекта и фациальной изменчивостью геологических тел, показанных в 1:1 500 000 масштабе в виде одного полигона.

Таблица 1. Тематический слой “Отложения кайнозойского возраста”.

Название поля	Тип данных
Эра	Текст
Система	Текст
Отдел	Текст
Литология	Текст
Состав и генезис	Текст
Площадь, кв. км	Число

Таблица 2. Тематический слой “Стратифицированные и метаморфические блоки пород докайнозойского возраста”.

Название поля	Тип данных
Эра	Текст
Система	Текст
Отдел	Текст
Литология	Текст
Площадь, кв. км	Число

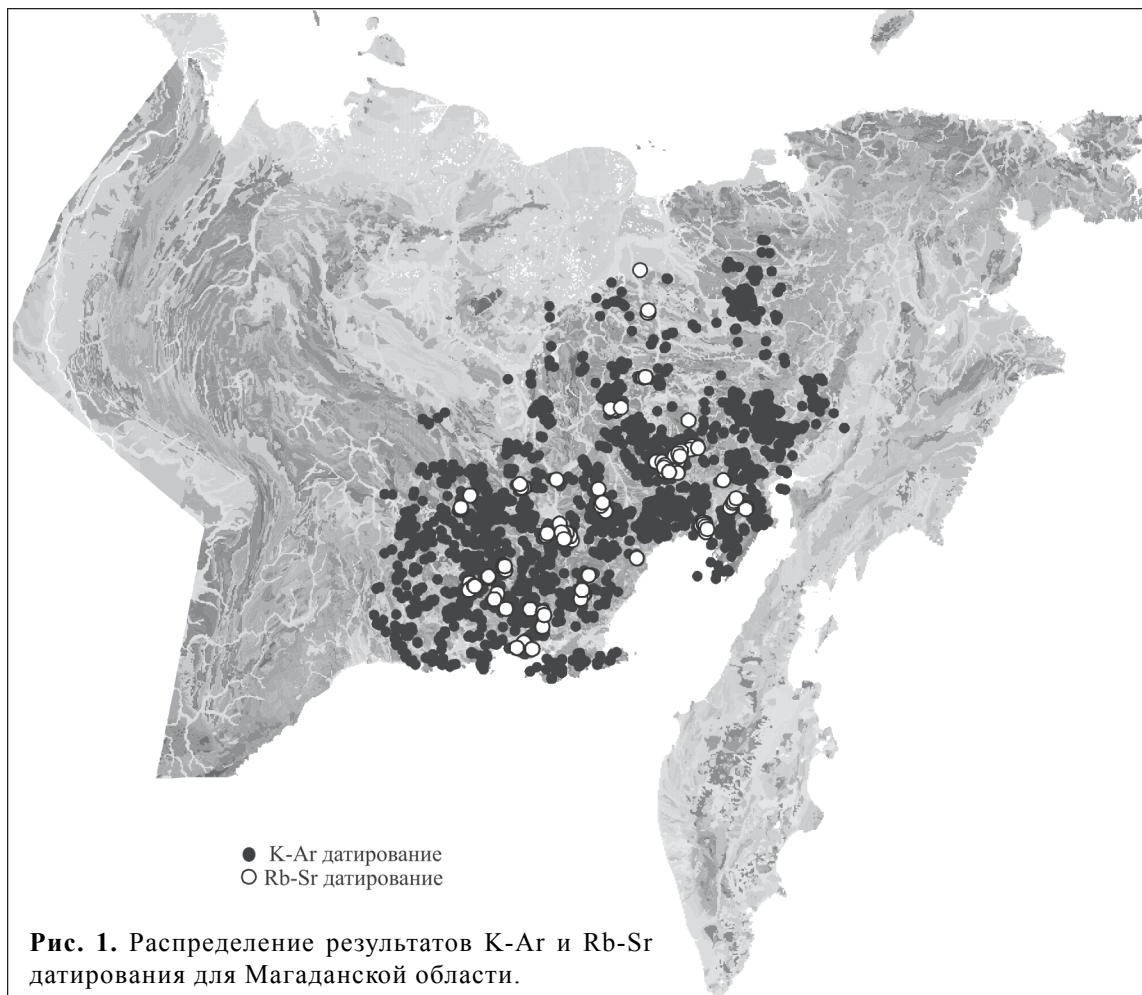
Таблица 3. Тематический слой “Магматические образования”.

Название поля	Тип данных
Эра	Текст
Период	Текст
Эпоха	Текст
Фация	Текст
Петрография	Текст
Площадь, кв. км	Число

Таким образом, числовое значение возраста в атрибутивной таблице полигонов в большинстве случаев будет представлять собой экспертную оценку, выбранную из нескольких дат и соответствующую наиболее распространенной (в конкретном полигоне) фациальной разновидности пород. Экспертная (авторская) оценка датировок также связана с необходимостью выбора значений из нескольких видов изотопных датировок, что обсуждается далее.

Не все значения датировок соответствуют полигонам на карте. Довольно значительное количество определений относится либо к дайкам, либо к жилам, которые в мелком масштабе могут быть отображены только внemасштабными символами – точками или линиями. Естественно, что пространственный анализ таких данных требует других методических подходов.

Пространственное распределение имеющихся на сегодня датировок по Магаданской области отражено на рис. 1. Для Якутии, Чукотки и Камчатки информация также имеется, в текущий момент выполняется уточнение пространственной привязки проб



из [9]. Объединение баз данных по изотопным датировкам, созданных в разных лабораториях, и включение их в ГИС по геологии Северо-Востока России в будущем не составит большого труда при соблюдении некоторых принципов и структуры организации этой информации, которые рассмотрены ниже.

АНАЛИЗ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ БАЗЫ ДАННЫХ “ГЕОХРОН”

База данных ГЕОХРОН включает архивные результаты изотопного датирования минералов, горных пород и руд Северо-Востока России из более чем 8000 образцов. Главным образом это результаты K-Ar и Rb-Sr датирования пород, в значительно меньшей степени – новые $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ и U-Pb датировки минералов (76 проб). Структура этих файлов принципиально не поменялась с момента создания первого варианта БД [1] и включает всю необходимую геологическую информацию, начиная с названия пород и минералов, названия свит или интрузий и кончая автором коллекции и исходным номером пробы (табл.

4; рис. 2). В последнем варианте базы данных содержатся и 3020 геохронологических датировок по Аляске, скомпилированные в [23].

Появившиеся в последнее время $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ и U-Pb датировки минералов более прецизионны и надежны, зачастую существенно отличаются более узкими интервалами значений дат, чем в K-Ar и Rb-Sr методах, что иногда радикально меняет наши представления о возрасте и продолжительности развития магматических и рудных комплексов [2, 11, 17–20]. В этой связи необходимы некоторые универсальные классификаторы достоверности информации, помещаемой в базе данных. Главным и необходимым условием является раскрытие как можно более полной информации о датируемом объекте (full disclosure по [22]), географического положения отобранный пробы и деталей аналитических измерений (лаборатория, количество измерений, средневзвешенное значение, СКВО, вероятность и т.п.). В случае наличия такого рода данных остается возможность воспроизведения аналитических измерений (обращение к автору для

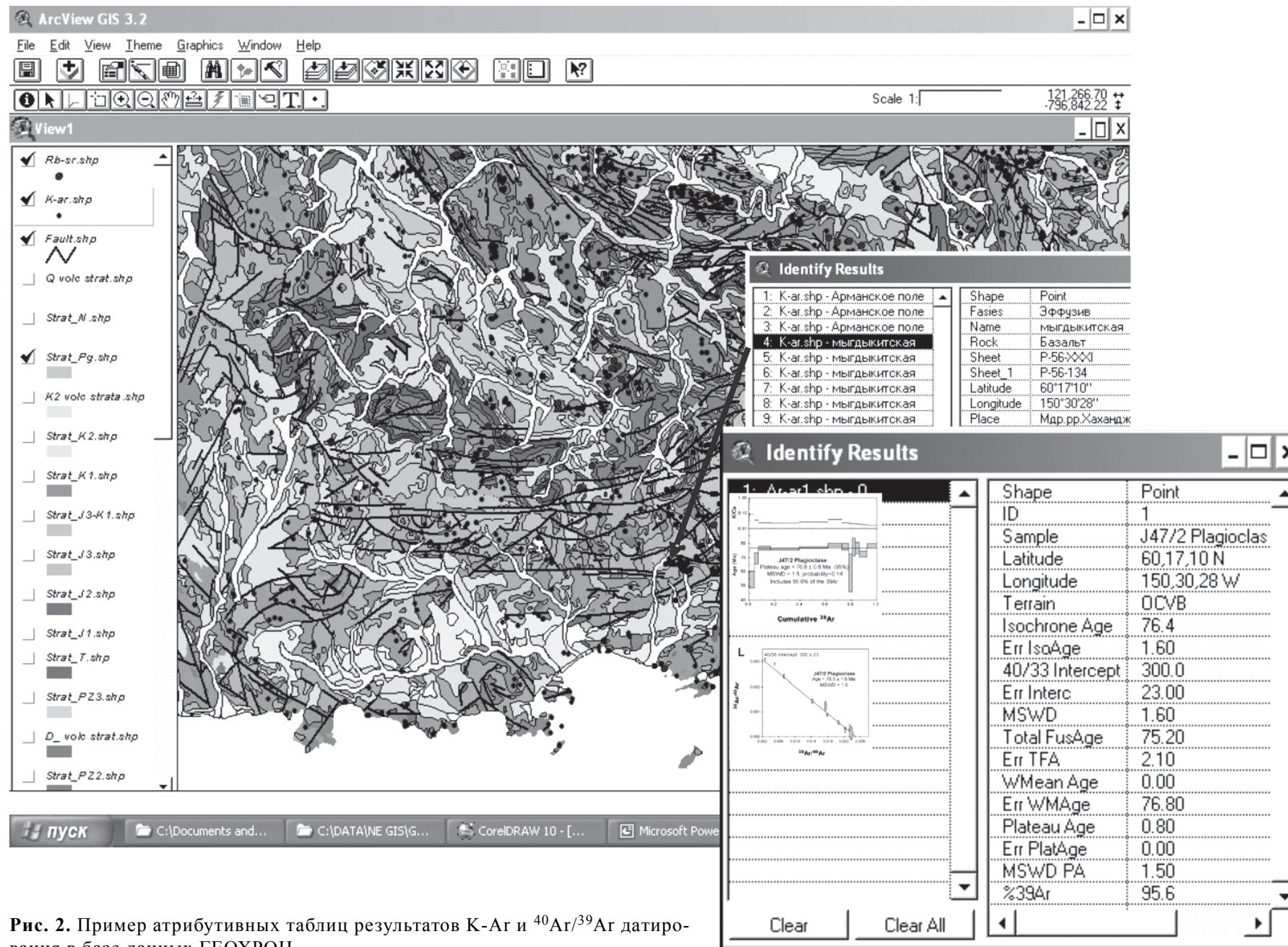


Рис. 2. Пример атрибутивных таблиц результатов К-Арг и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования в базе данных ГЕОХРОН.

Таблица 4. Структура некоторых таблиц базы данных ГЕОХРОН.

Геологическое описание

Содержание поля	Тип данных
Уникальный номер пробы	Число
Террейн (тектоническая структура)	Текст
Анализируемый материал	Текст
Название горной породы/минерала	Текст
Тип геологических образований (эффузив, интрузив, дайка, жила и т.д.)	Текст
Название свиты/интрузии/вулкана	Текст
Авторский номер пробы	Текст
Широта	Число
Долгота	Число
Номенклатура листа карты м-ба 1:200 000	Текст
Номенклатура листа карты м-ба 1:100 000	Текст
Предполагаемый геологический возраст	Текст
Географическое местоположение пробы (название рек, горных вершин и т.п.)	Текст
Фамилия и инициалы автора коллекции	Текст
Год отбора пробы	Число
Экспедиция/организация	Текст
Полевая партия/отряд	Текст
Ссылка на публикацию, где использована изотопная датировка	Текст

Результаты K-Ag датирования

Содержание поля	Тип данных
Уникальный номер пробы	Число
Лабораторный номер пробы	Текст
Номер сообщения, выданного заказчику	Текст
Лаборатория, выполнившая анализ	Текст
Концентрация калия, мас.%	Число
Концентрация аргона, нг/г	Число
Ошибка определения концентрации аргона	Число
K-Ag- дата, млн лет	Число
Ошибка определения даты, млн лет	Число
Используемая константа распада	Число

Результаты Ar-Ar датирования

Содержание поля	Тип данных
Уникальный номер пробы	Число
Лабораторный номер пробы	Текст
Лаборатория, выполнившая анализ	Текст
Метод анализа (step heating, laser)	Текст
Изохронный возраст	Число
Ошибка изохронной даты (2s)	Число
40Ar/36Ar пересечение на изохроне	Число
Ошибка пересечения для изохроны (2s)	Число
СКВО изохронного возраста	Число
Средневзвешенный возраст плато	Число
Ошибка возраста по плато	Число
СКВО для возраста плато	Число
Процент выделившегося 39Ar для плато	Число
Количество фракций в плато	Число
Отношение Ca/K	Число
Принятый возраст, млн лет	Число
Ссылка на файл с исходными данными	Текст

получения пробы или отбор новой с использованием систем спутникового позиционирования), коррекции дат в случаях уточнения констант радиоактивного распада, предметного обсуждения надежности приведенной даты. Последнее обстоятельство особенно важно, т.к. зачастую геолог приводит в публикации только изотопные даты, в том числе полученные современными методами, без ясного понимания, что оценить надежность и значение таких цифр в силу открытого поведения всех изотопных систем невозможно. В качестве разъяснения можно привести пример, когда публикуются $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ даты без указания расхождения возраста плато и изохроны, без графика плато и информации о количестве выделившегося при нагреве ^{39}Ar при расчете дат, без СКВО, вероятности и т.п. (напр. [6, 7]).

Качество и надежность архивных данных (K-Ar метод и Rb-Sr изохронный метод) особенно трудно оценить. Тут не существует универсальных принятых подходов для интерпретации и расчетов, и поэтому единственным вариантом остается приведение всех без исключения дат. На практике же нередко часть точек в приводимых публикациях исключаются (особенно при расчете Rb-Sr изохроны), что нарушает объективность оценок, нередко приводит к ошибочным результатам. Сложность интерпретации и расчета геохронологических дат в этих методах, составляющих главный массив данных в БД ГЕОХРОН, привела нас к необходимости создания специальных полей в базе данных, которые содержат уже интерпретированные значения для каких либо единых геологических тел (интрузий, свит, руд). Такой упрощенный уровень является авторским и может быть открыт для непрофессиональных пользователей.

ПРИМЕРЫ АНАЛИЗА ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Простейшим примером анализа геохронологической информации является анализ магматической активности в заданном интервале времени. Так, при подсчете площадей выходов интрузивных и эфузивных пород от плейстоцена до докембра на весь Северо-Восток Азии подтвердился хорошо известный факт о пике магматизма в мелу (рис. 3). Этот период отвечает завершению аккреции террейнов и началу консолидации земной коры на палеоокраине континента, формированию окраинно-континентального Охотско-Чукотского вулкано-плутонического пояса. Наиболее существенные тектоно-магматические события происходили в это время и в прилегающей океанической части Палеопацифики. Закартированные выходы магматических пород мелового возраста занимают до 40 % от всей площади магматитов

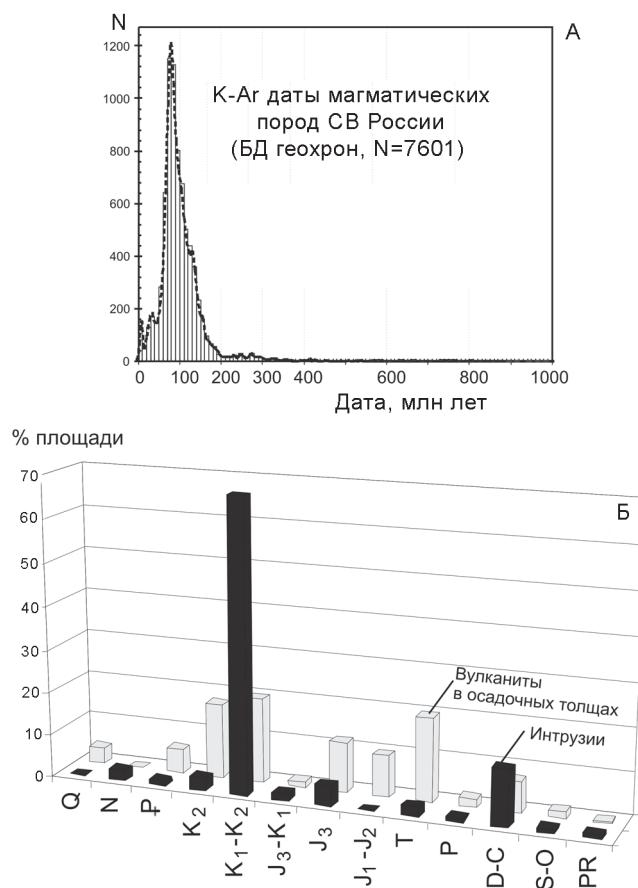


Рис. 3. Мезозойский максимум магматизма на Северо-Востоке Азии.

А – гистограмма распределения К-Ар дат в базе данных ГЕОХРОН. Б – гистограмма распределения площади интрузивных и вулканических образований в ГИС Атлас СВ России.

Северо-Востока России. На долю интрузивных образований приходится 11485 км^2 , а на долю эфузивных (включая неразделенные вулканогенно-осадочные толщи и собственно лавовые и пирокластические фации) – около 523697 км^2 . Условная магматическая активность в единицу времени, рассчитанная как отношение площади выходов магматитов на длительность каждого интересующего нас периода геологической шкалы времени, наибольшая для плеистоцене и составляет 29360 км^2 за 1 млн лет. Если учитывать только интрузивную составляющую, то наибольшие темпы магматической активности характерны для мела – 2466 км^2 за 1 млн лет. Анализируя магматическую активность, необходимо иметь в виду условность приводимых оценок, связанную с эрозионным срезом региона. Так, площади интрузивных пород конечно же не отражают реальные объемы внедренной магмы именно из-за отсутствия дан-

ных о распространении интрузий на глубинных и эродированных уровнях.

Большая часть изотопных датировок в БД ГЕОХРОН относится также к меловому периоду, однако здесь необходимо учитывать, что большинство К-Ар дат показывают не возраст кристаллизации магматитов, а возраст термальных событий, фиксирующих остывание пород до температуры блокирования (*closure temperature*) данной изотопной системы. Вычленить долю наложенных термальных событий в общем объеме меловых дат на данном этапе геохронологической изученности не представляется возможным.

Второй по площади (объему) пик магматизма приходится в современных границах Северо-Востока на юру, если учитывать и осадочные толщи с вулканической составляющей. Однако доля туфов и лав в осадочных образованиях при отсутствии их разделения в легендах к карте (и соответственно в атрибутивных таблицах ГИС) вычислена быть не может, поэтому более правильной может быть оценка площади только интрузивных и субвулканических образований. При таком подходе второй по площади после мела пик интрузивного магматизма приходится на девон (20671 км^2) – период рифтогенеза на Охотском и Омолонском массивах.

Особенный интерес представляет анализ вулканической активности в Охотско-Чукотском вулканогенном поясе (ОЧВП) (рис. 4). Общий объем альб-кампанских отложений, слагающих ОЧВП, мы оцениваем из материалов ГИС в $2,9 \text{ млн км}^3$ (при принятой средней мощности в 1 км), что почти в 3 раза больше, чем это считалось раньше. Так, по данным В.Ф.Белого и И.Н.Котляра, общий объем извергнутых вулканических формаций составляет в ОЧВП около 1043–1122 тыс. км^3 [4, 10] за период около 25 млн лет от среднего альба до сантона [5]. Таким образом, скорость вулканических накоплений составляла около $0,05 \text{ км}^3/\text{год}$, что представляется нам недостаточным, учитывая гигантскую протяженность пояса (более 3000 км). Последние прецизионные измерения возраста с помощью U-Pb SHRIMP датирования циркона и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования фенокристаллов санидина, биотита и амфибала в лавах показывают, что возраст главного объема вулканических накоплений во внешней зоне ОЧВП приходится на турон – ранний кампан (90–81 млн лет) [2]. В структурах Пегтымельского прогиба на Чукотке, Арманской вулканоструктуре в Северном Приохотье реконструируется катастрофический характер вулканизма, когда главный объем известково-щелочных вулканитов был извергнут в течение 2–5

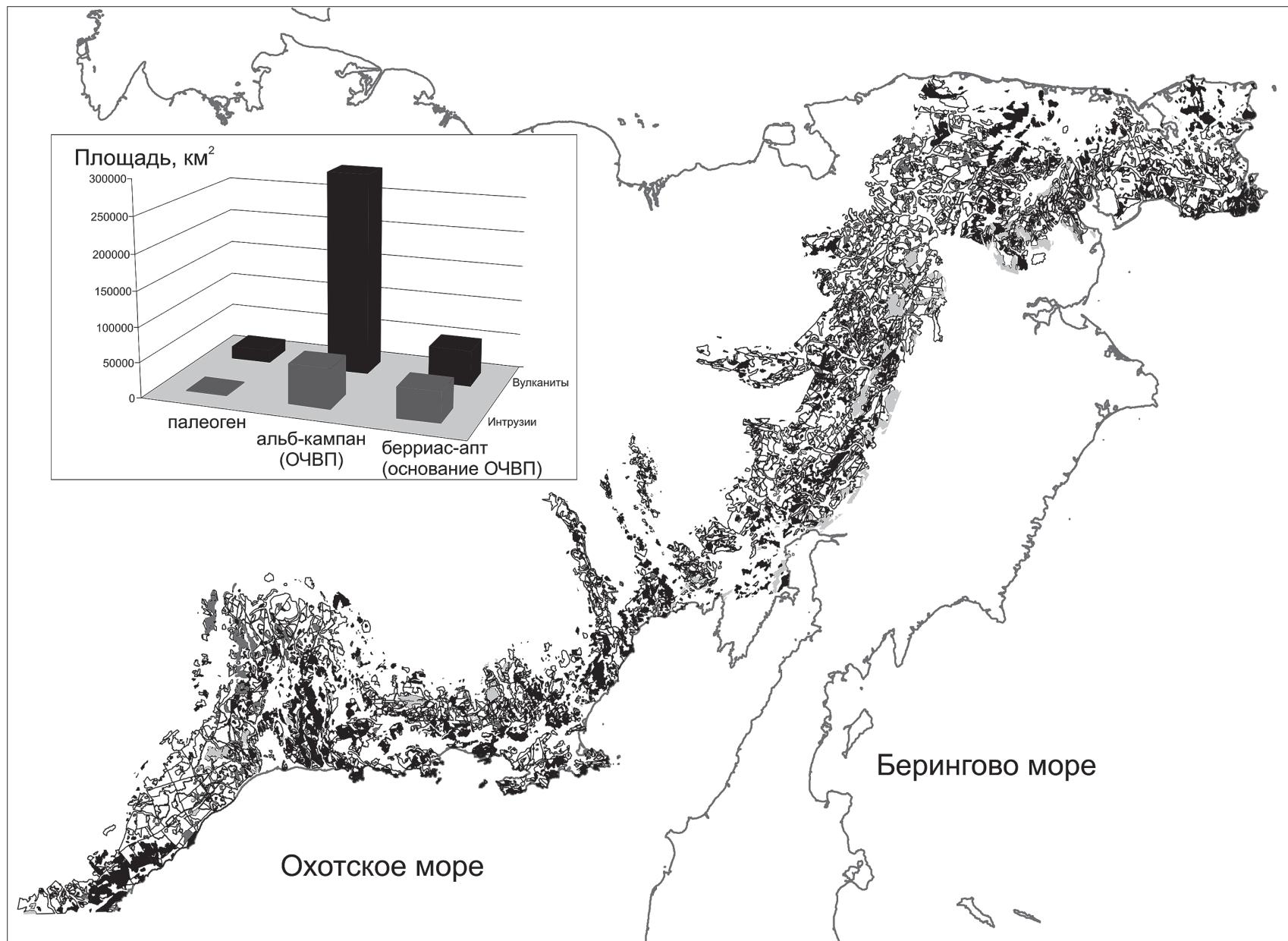


Рис. 4. Охотско-Чукотский вулканогенный пояс (черным показаны интрузии, серым – субвулканические тела, белым – стратифицированные образования).

На врезке показаны площадные соотношения интрузий и вулканитов для трех главных стадий формирования ОЧВП.

млн лет [15, 17–19]. С учетом этих новых более надежных датировок скорость вулканических накоплений в отдельных вулканоструктурах достигала 0,15–0,36 км³/год (при общем объеме извержений во внешней зоне 723 тыс. км³). Все приведенные простейшие расчеты безусловно, предварительные, однако мотивируют к созданию более точных объемных моделей строения и эволюции ОЧВП. Наиболее перспективным нам представляется исследование пространственно-временных особенностей магматизма в пределах отдельных локальных вулканоструктур.

Анализ объемов интрузивного магматизма во времени также чрезвычайно важен, так как предполагается, что гранитоиды генерируют многие рудные месторождения. В качестве примера приведем Яно-Колымский золотоносный пояс, который представляет собой крупнейшую металлогеническую единицу на Северо-Востоке Азии и характеризуется обширными ареалами распространения россыпей золота, а также многочисленных рудных месторождений и проявлений золота, олова и сурьмы. Пояс прослеживается на расстояние более 1000 км, при ширине до 200 км (рис. 5). Наиболее значимое золото-кварцевое оруденение было сформировано в конце поздней юры–начале раннего мела в результате коллизии Колымо-Омолонского супертеррейна с Северо-Азиатским кратоном и приурочено к структурам пассивной окраины Северо-Азиатского кратона (Верхоянскому складчато-надвиговому поясу), Кулар-Нерскому и Вилигинскому перикратонным турбидитовым террейнам, а также Полоусно-Дебинскому террейну акреционного клина, сложенному турбидитами [12, 14, 21]. Более 10 % территории Яно-Колымского пояса золотоносности, практически не выходя за его пределы, занимают выходы полнокристаллических гранитоидов с возрастом от поздней юры до позднего мела включительно. Нами был проведен анализ плотности пространственного размещения гранитоидов и золоторудных месторождений, в результате которого выяснилось, что большая часть золоторудных объектов попадает на площади, где интервал насыщенности гранитоидами составляет 5–10 %. (рис. 6) [26]. Однако в расчетах не учитывались временные срезы активности интрузивного магматизма в силу отсутствия данных по всем гранитоидным телам региона. Появление таких данных позволит существенно уточнить генетические модели для золотого и оловянного оруденения этой металлогенической провинции, так как формирование интрузивного магматизма здесь может быть растянуто во времени.

Наиболее древние массивы (150–160 млн лет) сложены кварцевыми диоритами, гранодиоритами

и монцогранитами с повышенным содержанием глинозема [20]. По геохимическим признакам они интерпретируются как субдукционные, внедрившиеся в период формирования Уяндино-Ясачненской вулканической дуги. Т.Б. Русакова и И.Н. Котляр [13] на основании результатов Rb-Sr и K-Ar датирования определили наиболее вероятный интервал их кристаллизации в 163–167 млн лет. В то же время, ⁴⁰Ar/³⁹Ar метод дает значения около 150 млн лет по роговой обманке и биотиту для массивов: Басугуньинский, Бургагинский, Сылгынтарский, Одинокий, Таях-Тах, Бол. Чалбыкан, Нетчен-Хая, Рыжий [11]. В интервале 138–146 млн лет во время коллизии Северо-Азиатского кратона и Колымо-Омолонского супертеррейна кристаллизовались высокоглиноземистые мусковит-биотитовые граниты, причем наблюдается незначительное омоложение возраста гранитов в северо-западном направлении [11, 20]. Первые U-Pb SHRIMP датировки циркона из гранитоидов показали, что главный объем колымских батолитов и даек был сформирован в узком интервале времени около 150±3 млн лет назад, для басугунинского комплекса (массивы Столовый и О'Кей) установлен более древний возраст 160–155 млн лет [3].

Субдукционные и коллизионные гранитоиды наиболее распространены в пределах Яно-Колымского золотоносного пояса. ⁴⁰Ar/³⁹Ar датировки возраста золото-кварцевой минерализации дают широкий возрастной диапазон формирования этого типа оруденения от 140 до 110 млн лет [25]. Наиболее достоверные даты ограничены интервалом 125–139 млн лет, с которым не связано внедрение крупных интрузий. Наша интерпретация полученных датировок основывается на метаморфогенной модели мобилизации флюидов и металлов и формировании рудной минерализации в результате подъема и разгерметизации региона.

Более молодые интрузии имеют геохимические признаки, характерные для гранитоидов обстановок внутриплитного растяжения, или связаны с формированием Охотско-Чукотского вулканогенного пояса и характеризуются субдукционными геохимическими признаками [20]. В южной части Верхне-Колымского региона распространены гранитоиды, связанные с формированием Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. Это биотит-роговообманковые диориты, гранодиориты и граниты (массивы Улахан, Севастопольский, Тенгкечан и другие). Единичные ⁴⁰Ar/³⁹Ar датировки биотита гранодиоритов массива Улахан соответствуют 97 млн лет. Биотитовые и субщелочные оловоносные граниты с геохимическими характеристиками формирования в зонах

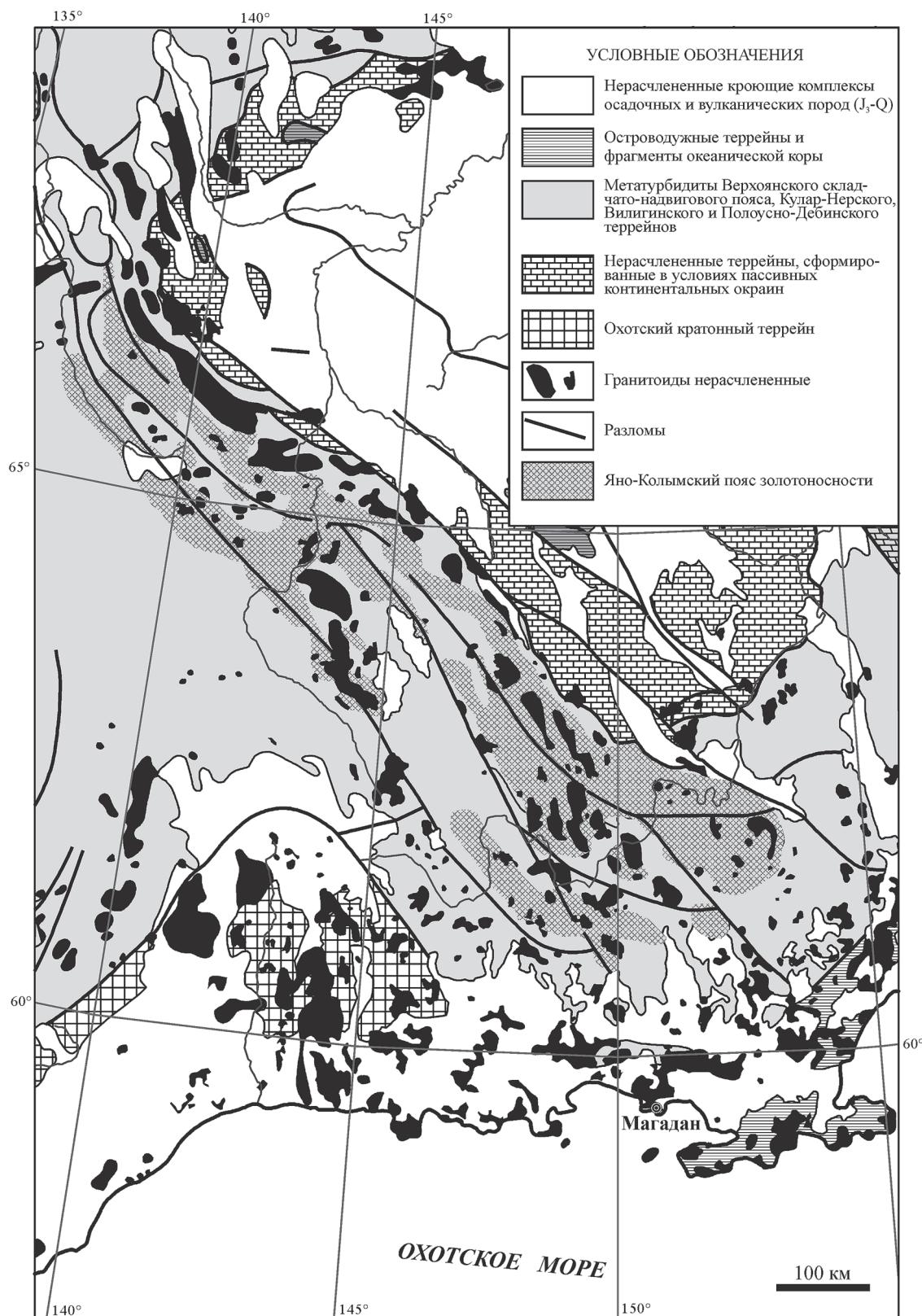


Рис. 5. Схема локализации Яно-Колымского пояса золотоносности.

Тектоническая основа составлена по (GIS Compilation of Geophysical, Geologic, and Tectonic Data for Circum-North Pacific ed. E. Nokleberg and M. Digges, 1999). Границы пояса проведены по ареалам распространения россыпей и проявлений рудной минерализации [16].

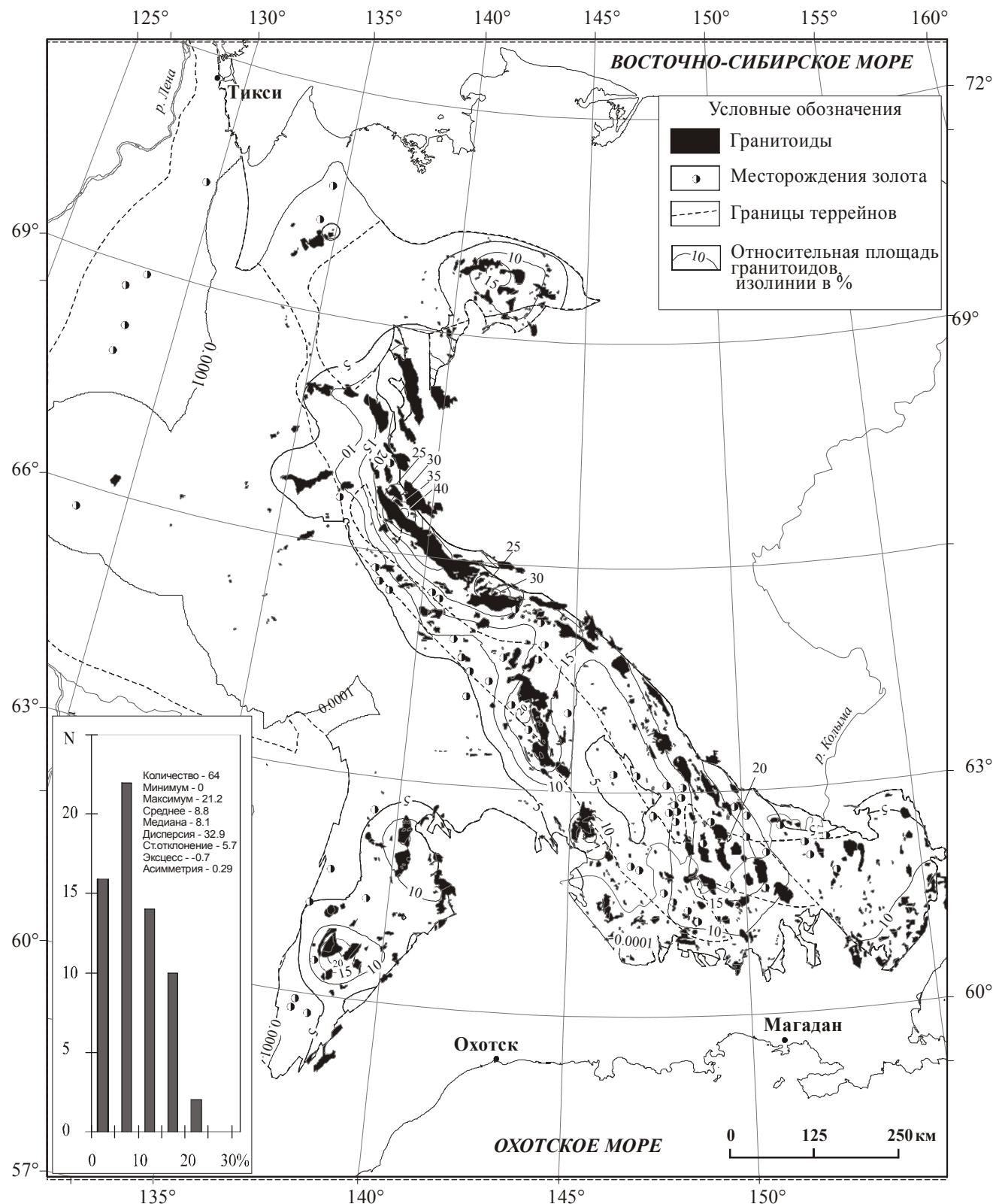


Рис. 6. Изолинии относительной площади гранитоидов при отсекающей ячейке радиусом 40 км.

Гистограмма в левом нижнем углу показывает распределение золото-кварцевых месторождений по зонам распространенности гранитоидов. Выделена зона максимальной насыщенности месторождениями [26].

растяжения распространены главным образом вдоль юго-западной окраины Верхне-Колымского региона (массивы Бутуычаг, Хениканджа, Урчан, Ачча, Днепровский с одноименными месторождениями и рудопоявлениями). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датировки минералов из магматических пород и рудной минерализации близки и примерно соответствуют 80 млн лет. Интересно, что большинство эптермальных Au-Ag месторождений Охотско-Чукотского вулканогенного пояса характеризуются такими же датировками [11].

Таким образом, учет наиболее достоверных датировок в виде числовых полей в таблицах атрибутивной информации в ГИС по геологии Северо-Востока России позволит провести ряд расчетов, важных для понимания эволюции магматизма и оруденения, а также сделать количественные оценки некоторых генетических параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен первый вариант региональной информационной системы, объединяющей геохронологическую базу данных ГЕОХРОН и ГИС по геологии Северо-Востока России. Анализ текущего состояния базы данных показывает, что оценка надежности существующих архивных изотопных дат затруднена и требует экспертного заключения. Особое значение приобретают в этой ситуации новые результаты прецизионного минерального $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ и U-Pb SHRIMP датирования. Главным и необходимым условием пополнения и развития базы данных является раскрытие как можно более полной информации о датируемом объекте, включая детали аналитических измерений. На ряде примеров продемонстрированы некоторые потенциальные возможности использования интегрированной системы. При подсчете площадей выходов интрузивных и эффузивных пород от плейстоцена до докембria на весь Северо-Восток Азии подтвердился известный факт о пике магматизма в мелу, времени наиболее существенных и объемных тектономагматических событий на континентальной окраине и в прилегающей океанической части Палеопацифики. Для окраинно-континентального Охотско-Чукотского вулканогенного пояса, с учетом новых прецизионных датировок, устанавливается катастрофический характер формирования. Первые предварительные оценки показывают, что скорость вулканических накоплений в отдельных вулканоструктурах пояса достигала $0,15\text{--}0,36 \text{ км}^3/\text{год}$ при общей длительности известково-щелочного вулканизма от 2 до 5 млн лет. Анализ плотности пространственного размещения гранитоидов и золоторудных месторождений в Яно-Колымском золото-

носном поясе показывает, что большая часть золоторудных объектов попадает на площади с интервалом насыщенности гранитоидами 5–10 %. Уточненные временные срезы активности интрузивного магматизма позволяют существенно уточнить генетические модели для золотого и оловянного оруденения металлогенических провинций.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ 06-05-64824а, гранта РФФИ-ДВО РАН “Дальний Восток” № 06-04-96049 и грантов ДВО РАН 06-III-A-08-349; 05-III-A-08-004; 04-1-01-010.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акинин В.В., Котляр И.Н. “ГЕОХРОН” – компьютерная база данных изотопного датирования минералов, горных пород и руд Северо-Востока России // Магматизм и оруденение Северо-Востока России. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1997. С. 311–316.
2. Акинин В.В., Ханчук А.И. Охотско-Чукотский вулканогенный пояс: ревизия возраста на основе новых $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ и U-Pb изотопных данных // Докл. РАН. 2005. Т. 404, № 5. С. 654–658.
3. Акинин В.В., Миллер Э., Вуден Дж., Альшевский А.В., Горячев Н.А. U-Pb SHRIMP-датирование циркона из батолитов и рудоносных даек Яно-Колымского коллизионного пояса: первые результаты и геологические следствия // Изотопное датирование процессов рудообразования, магматизма, осадконакопления и метаморфизма: Материалы 3 геохронологической конференции. М.: ИГЕМ РАН, 2006. (в печати).
4. Белый В.Ф. Формации и тектоника Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. М.: Наука, 1978. 213 с.
5. Белый В.Ф. Геология Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1994. 76 с.
6. Белый В.Ф., Белая Б.В. Поздняя стадия развития Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (верхнее течение р.Энмыываам). Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1998. 108 с.
7. Бондаренко Г.Е., Морозов О.Л., Лейер П., Минюк П.С. Новые данные Ar-Ar изотопного датирования магматических и метаморфических пород п-ва Тайгонос // Докл. РАН. 1999. Т. 369, № 1. С. 79–82.
8. Геологическая карта Северо-Востока СССР. 1:1 500 000 / Гл. ред. М.Е. Городинский. Л.: ВСЕГЕИ, 1980.
9. Каталог определений возраста горных пород СССР радиологическими методами, Северо-Восток СССР. Л.: ВСЕГЕИ, 1975. 547 с.
10. Котляр И.Н., Белый В.Ф., Милов А.П. Петрохимия магматических формаций Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. М.: Наука, 1981. 223 с.
11. Ньюберри Р.Дж., Лейер П.У., Ганз П.Б. и др. Предварительный анализ хронологии мезозойского магматизма, тектоники и оруденения на Северо-Востоке России с учетом датировок $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ и данных по рассеянным элементам изверженных и оруденелых пород. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2000.
12. Парфенов Л.М., Натапов Л.М., Соколов С.Д., Цуканов Н.В. Террейны и аккреционная тектоника Северо-Востока Азии // Геотектоника. 1993. № 1. С. 68–78.

13. Русакова Т.Б., Котляр И.Н. Геохронология гранитоидных комплексов Главного Колымского батолитового пояса (Северо-Восток России) // Тихоокеан. геология. 2003. Т. 22, № 1. С. 3–17.
14. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Под ред. Парфенова Л.М., Кузьмина М.И. М.: МАИК “Наука/Интерperiодика”. 2001. 571 с.
15. Тихомиров П.Л., Акинин В.В., Исполатов В.О. и др. Асинхронность формирования Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (новые данные $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ и U-Pb геохронологии) // Тектоника земной коры и мантии: Материалы XXXVIII Тектонического совещания: М.: ГЕОС , 2005. Т. 2. С. 274–277.
16. Шило Н.А. Геологическое строение и коренные источники Яно-Колымского пояса россыпной золотоносности // Труды ВНИИ-1. Геология. Магадан: 1960. Вып. 63. С. 211–316.
17. Hourigan J.K., Akinin V.V., 2004, Tectonic and chronostratigraphic implications of new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and geochemistry of the Arman and Maltan-Ola volcanic fields, Okhotsk-Chukotka volcanic belt, northeastern Russia: Geological Society of America Bulletin, V. 116, N. 5/6. P. 637–654.
18. Ispolatov V.O., Tikhomirov P.L., Heizler M., Cherepanova I.Yu., 2004, New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ages of Cretaceous Continental Volcanics from Central Chukotka: Implications for Initiation and Duration of Volcanism within the Northern Part of the Okhotsk-Chukotka Volcanic Belt (Northeastern Eurasia): Journal of Geology, V. 112. P. 369–377.
19. Kelley S.P., Spicer R.A., Herman A.B., 1999, New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dates for Cretaceous Chauna Group tephra, north-eastern Russia, and their implications for the geological history and floral evolution of the North Pacific region: Cretaceous Research, V. 20, N. 1. P. 97–106.
20. Layer P.W., Newberry R., Fujita K., Parfenov L., Trunilina V., Bakharev A., 2001, Tectonic Setting of the Plutonic Belts of Yakutia, Northeast Russia, Based on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology and Trace Element Geochemistry: Geology, V. 29, N. 2. P. 167–170.
21. Nokleberg W.J., West T.D., Dawson K.M. et al. Summary terrane, mineral deposit, and metallogenic belt maps of the Russian Far East, Alaska, and the Canadian Cordillera // U.S. Geological Survey Open-File Report 98-136. 1998.
22. Staudigel H., Albarede F., Anderson D.L., Derry L., McDonough B., Shaw H.F., White W., Zindler A., 2001, Electronic data publication in geochemistry: A plea for “full disclosure”: Geochemistry, Geophysics, Geosystems, V. 2. P. Paper number 2001GC000234.
23. The geology of North America. The geology of Alaska// Plafker G., Berg H.C. (Eds). Boulder, Colorado: The Geological Society of America, 1994. V. G-1. 1055 P.
24. Voroshin S.V., Melnik V.G., Zinkevich A.S. Development of geological GIS in Magadan Region / Proceedings of the Interim IAGOD Conference. Vladivostok. Russia. 1-20 September 2004. Metallogeny of the Pacific Northwest: Tectonics, Magmatism and Metallogeny of Active Continental Margins / Vladivostok: Dalnauka. 2004. P. 612–615.
25. Voroshin S.V., Newberry R.J., Layer P.W. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Au-quartz mineralization in the Upper Kolyma Region (Magadan Oblast, Russia) / Proceedings of the Interim IAGOD Conference. Vladivostok. Russia. 1-20 September 2004. Metallogeny of the Pacific Northwest: Tectonics, Magmatism and Metallogeny of Active Continental Margins / Vladivostok: Dalnauka. 2004. P. 568–571.
26. Voroshin S.V., Zinkevich A.S. Spatial analysis of the granitoid and gold-quartz deposits distribution in the Yano-Kolyma belt by the GIS // II International Conference “GIS in Geology” Extended abstracts. Moscow: Vernadsky SGM RAS, VNII Geosystem. 2004. P. 102.

Поступила в редакцию 19 мая 2006 г.

Рекомендована к печати Н.А. Горячевым

V.V. Akinin, S.V. Voroshin

Integration of chronological data bases and GIS for analysis of evolution of magmatism in Northeast Asia

The first variant of the regional computer system integrating the geochronological data base GEOCHRON and GIS on the geology of Northeast Russia is offered. The current state of the data bases is discussed with constraints on some isotope dating methods and recommendations for collecting data. Some potentialities for the use of integrated information are demonstrated as exemplified by investigation of evolution of magmatic activity in the whole region, assessment of volcanic activity in the Okhotsk-Chukotka volcanic belt, and analysis of the density of spatial distribution of granitoids and gold deposits in the Yana-Kolyma gold-bearing belt.

Key words: isotopic geochronology, data bases, GIS, Northeast Asia.

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

А.Н. Петров, И.Н. Горячев, С.М. Лямин

Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН, г. Магадан

Обсуждаются проблемы построения и анализа геометрических моделей геологических структур. Описывается подход к созданию геометрических моделей в виде семейств поверхностей и его частная реализация – метод построения и анализа линий простирания. Приводятся результаты применения программ, реализующих этот метод, для изучения ряда геологических объектов Северо-Востока России. Обращается внимание на необходимость включать в геоинформационные системы первичные данные, к которым относятся замеры элементов залегания.

Ключевые слова: ГИС-технологии, элементы залегания, геометрические модели, геологические структуры.

ВВЕДЕНИЕ

Несколько поколениями геологов накоплен огромный фактический материал, требующий обобщения и осмысливания. Новые информационные технологии делают этот материал общедоступным, а наличие высокопроизводительной, доступной каждому исследователю и простой в обращении вычислительной техники позволяет подвергать его быстрой и эффективной обработке. Одним из важных видов геологической деятельности становится создание электронных банков и баз данных. Эта сложная и трудоемкая работа должна принести и уже приносит свои плоды. Эффективное использование вычислительной техники для обработки информации предполагает разработку соответствующего программного обеспечения. Широкие перспективы в этом направлении открывают геоинформационные технологии, обеспечивающие сбор, хранение, обработку, доступ, отображение и распространение данных, имеющих географическую привязку [1, 2]. Применение ГИС-технологий в геологических исследованиях открывает новые возможности. Но, оценивая эти возможности, необходимо обратить внимание на ряд особенностей.

Географическая информационная система геологического содержания чаще всего рассматривается как электронный аналог геологической карты, т.е. как пространственно-временная модель строения и истории развития объекта исследований. В то же

время, геологическая карта, особенно крупномасштабная, является источником фактического материала, отображающая такие элементы, как места находок окаменелостей, элементы залегания слоистости, сланцеватости, линейности и др. На обычных бумажных носителях объем отображаемого первичного фактического материала ограничен возможностями чертежных инструментов и типографской техники. В этом отношении электронные варианты карт предоставляют гораздо больше возможностей, позволяя хранить большие объемы информации, и отображать только то, что необходимо при решении конкретной задачи. В идеале информационные системы должны содержать весь фактический материал, полученный в процессе полевых исследований и первичной камеральной обработки. Но чаще приходится иметь дело с ГИС, созданными либо путем оцифровки ранее созданных геологических карт, либо методами, эмулирующими ручную рисовку, ориентированную в большей степени на воображение и интуицию, нежели на строгие правила. Работа с информационными системами такого рода сводится не к анализу самих фактов, приводящих к выводам о строении и развитии изучаемой территории, а к выявлению следствий, вытекающих из представлений авторов карты.

Практическая работа с ГИС сводится к обработке данных программами либо входящими в состав самой информационной системы, либо имеющими прямой доступ к ее данным. Любая компьютерная программа сводит решение задачи к выполнению

простейших математических операций по четко заданному алгоритму. Составить алгоритм можно только в том случае, когда разработана математическая модель изучаемого объекта. Математическая модель, как, впрочем, и любая другая, базируется на предположениях и упрощениях, которые накладывают ограничения на использование программы. В этом отношении одной из главных проблем современной геологии является разработка и применение способов математического моделирования в геологических исследованиях. Геолог, использующий компьютерные программы в исследовательских целях, должен понимать суть математического метода, применяемого для решения конкретной задачи, его реальные возможности и содержательный смысл получаемых результатов, не перекладывая всю ответственность на разработчиков программного обеспечения.

Необходимо учитывать и то обстоятельство, что большинство математических методов, применяемых в геологии, разработано до середины прошлого века, когда о возможностях современной техники нельзя было и мечтать. Разработка новых методов исследований, ориентированных на использование компьютерных технологий, представляет собой вид деятельности, объединяющий геологию, математику и программирование. Работа в этом направлении ведется в СВКНИИ ДВО РАН с 1991 г. За это время разработано несколько методов компьютерного моделирования [11–13, 15], применимых для решения задач структурной геологии. На их основе созданы программы, использованные при изучении ряда геологических объектов [3, 6–9]. Эта деятельность может рассматриваться и как одно из направлений геоинформатики, и как составная часть геологии. В любом случае, это направление исследований тесно со-прикасается с геологией, и с информатикой.

ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Основная задача структурной геологии – создание и анализ моделей, отражающих формы и взаимное расположение геологических тел – так или иначе, связана со всеми видами геологической деятельности. Эта же задача является одной из главных при создании и использовании ГИС геологического содержания. Методы структурной геологии в явном или неявном виде опираются на геометрию – раздел математики, изучающий формы и положения как твердые. С этой точки зрения основной целью структурной геологии является создание и анализ геометрических моделей геологических тел. Аппарат геометрии предоставляет большие возможности для решения широчайшего спектра задач во всех сферах

деятельности человека. Специально для целей компьютерного моделирования разработано направление – вычислительная геометрия [5, 16, 17], методы которой воплощены во многих графических программах. Дополнительные возможности предоставляют способы компьютерной визуализации, позволяющие отображать результаты вычислительных процедур в наглядном и выразительном виде. Естественно, что эти методы могут и должны применяться и в геологических исследованиях, но, разумеется, с учетом их специфики.

Самая распространенная задача вычислительной геометрии состоит в нахождении поверхности, проходящей через множество опорных точек, отвечающая дополнительным условиям. Очевидным способом создания геометрических моделей геологических структур является представление геологических границ в виде поверхностей в трехмерном евклидовом пространстве, а выходы границ на поверхность – в виде линий. Это позволяет представлять исходные данные о морфологии каждой геологической границы в виде множества точек и использовать для ее компьютерного моделирования приемы и методы вычислительной геометрии, в том числе и реализованные в некоторых популярных программах (например, Surfer фирмы Golden Software). Однако такой подход возможен только при наличии весьма представительного фактического материала, которым мы чаще всего не располагаем. Кроме того, простые и достаточно эффективные методы, основанные на аппроксимации явной функцией, не пригодны для моделирования границ с вертикальными и опрокинутыми залеганиями, т.е. в тех случаях, когда поверхности целесообразно аппроксимировать неявными или параметрическими функциями. Нахождение таких функций представляет собой задачу более сложную, требующую нетривиальных решений.

Количество данных, необходимых для построения каждой границы, можно сократить, используя в вычислительных процедурах элементы залегания. Последние определяют ориентировку плоскости, которая либо совпадает с границей, либо является для нее в данной точке касательной. Элементы залегания целесообразно использовать при аппроксимации линий и поверхностей сплайнами. В алгоритмах, которые широко используются в системах автоматического проектирования, направления касательных обычно фигурируют как вспомогательные величины, которые необходимо вычислять. При моделировании геологических объектов направления касательных, определяемые по элементам залегания, могут выступать в качестве исходных данных [14]. При построе-

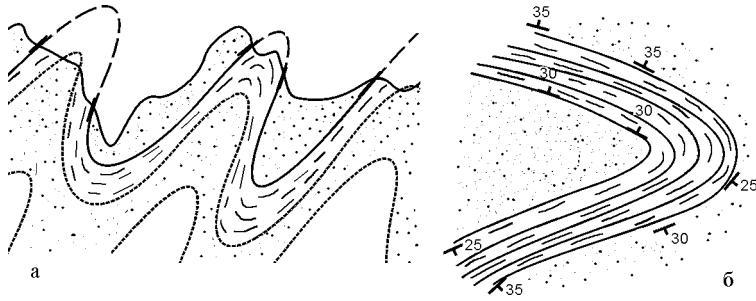


Рис. 1. Отображение геологических границ кубическими сплайнами по элементам залегания в различных ситуациях на разрезе (а) и на плане (б).

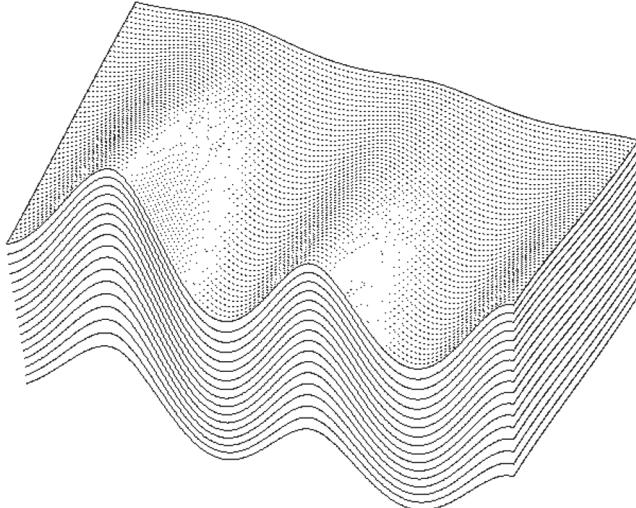


Рис. 2. Моделирование складчатой структуры в виде семейства поверхностей. (Результат численного эксперимента).

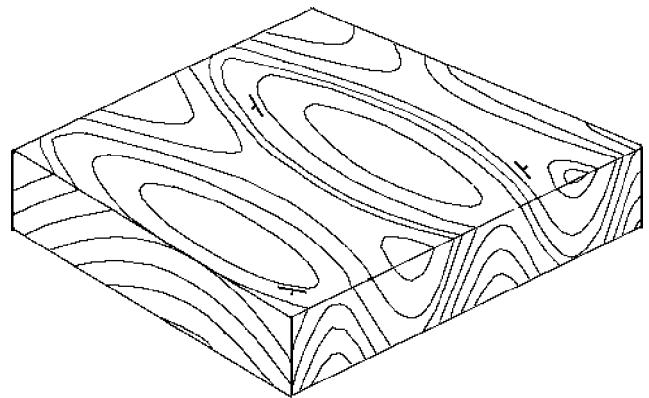


Рис. 3. Сечения слоистого тела горизонтальной и вертикальными плоскостями. (Результат численного эксперимента).

нии разрезов направления касательных будут определяться углами падения, а при построении линий на плане – направлениями простираций (рис. 1).

Для изучения пликативных структур нами предлагается геометрическая модель, в которой связно дислоцированное слоистое тело представляется в виде семейства непересекающихся поверхностей, каждая из которых обладает теми же свойствами, что и стратиграфическая граница. Образно говоря, слоистое тело представляется в виде множества поверхностей, плотно заполняющих пространство, подобно тому, как листы тонкой бумаги образуют пачку (рис. 2).

Каждая такая поверхность обладает теми же свойствами что и стратиграфическая граница – относительно нее все тело разбивается на две части, верхнюю и нижнюю. Поверхности являются упорядоченными: они образуют последовательность, которая остается неизменной при любых деформациях. Каждой поверхности можно приписать действительное число, которое отражает стратиграфическое положение границы (чем больше число, тем бо-

лее высокое положение занимает соответствующая граница). Данная модель основывается на свойствах стратиграфических отношений, присущих именно геологическим объектам. С ее помощью выделяются не только явные границы между слоями, но и множество границ неявных, выявляемых по косвенным признакам. При этом все поверхности являются взаимозависимыми, и данные по каждой из них служат построению модели всего тела. Сечения семейства поверхностей плоскостями представляет собой множество линий, отображающих характер складчатости: на горизонтальной плоскости границы представляются линиями, касательные которых совпадают с направлениями простираций, а на вертикальной плоскости (разрезе) касательные соответствуют видимым углам падения (рис. 3).

В качестве аналитического описания семейства поверхностей можно использовать непрерывную полевую функцию, определяющую в каждой точке пространства стратиграфический параметр – число, индивидуализирующее положение в разрезе. Если в качестве исходных данных использовать точки, при-

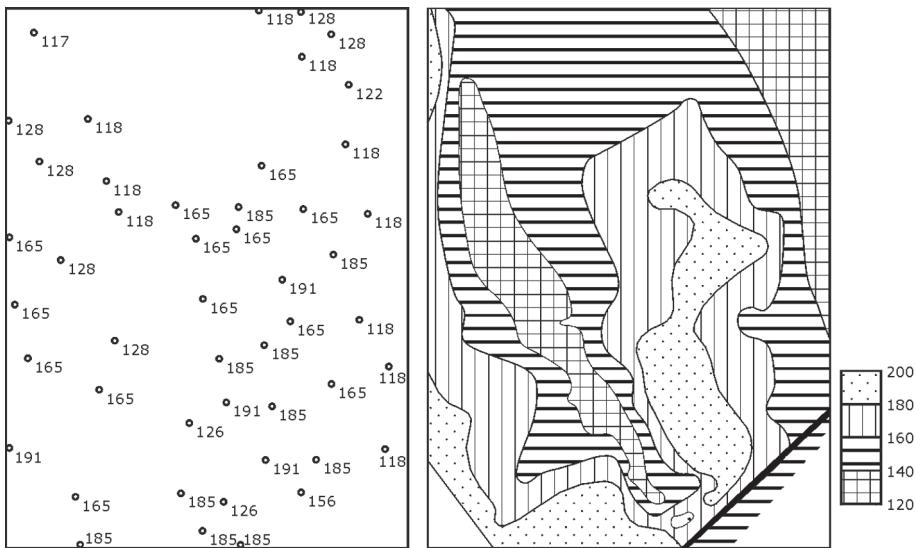


Рис. 4. Модель строения вмещающих отложений рудного поля Наталка, созданная по выходам маркирующих горизонтов, привязанных к стратиграфической колонке.

На левом рисунке изображены выходы маркирующих горизонтов, представленные в виде скалярных величин. На правом рисунке – гипсометрический срез структуры, соответствующий уровню моря. На стратиграфической колонке показаны основные стратиграфические подразделения и числа, характеризующие их положения в разрезе.

надлежащие маркирующим горизонтам, привязанным к стратиграфической колонке, то построение каждой стратиграфической границы можно свести к нахождению эквипотенциальной поверхности скалярного поля. Такая постановка задачи уместна в тех случаях, когда на изучаемой территории детально описана стратиграфия, и при этом в разрезе присутствует достаточно много отчетливо различимых маркирующих горизонтов. По этому принципу была создана упрощенная геометрическая модель структуры Наталкинского рудного поля [11, 12] (рис. 4).

Чаше приходится иметь дело с ситуацией, когда значительную часть территории слагают мощные отложения без явно выраженных горизонтов. В таком случае замеры элементов залегания можно произвести во многих точках, но соотнести их с конкретными геологическими границами не удается. Определенные выводы о морфологии складок могут быть получены на основе количественно-статистической оценки с помощью стереографических сеток. Такая оценка дает возможность установить и общие закономерности в строении исследуемых комплексов [4]. Нами предлагается другой подход, суть которого состоит в том, что семейство поверхностей описывается кусочно-непрерывной векторной функцией, определяющей в каждой точке ориентировку нормали проходящей через нее поверхности, или, другими словами, направления градиентов скалярного поля. Если такая функция определена, то с ее помощью могут быть построены искомые поверхности. В этом случае исходными данными служат координаты точек и измеренные в них элементы залегания слоистости. Алгоритм решения такой задачи для трехмерного моделирования складчатых структур в общих чертах нами разработан, но практического применения пока не получил.

Основной объем информации о характере складчатости составляют результаты наземных исследований, которые фиксируются в первичной полевой документации, отображаются на изданных геологических картах и хранятся в базах данных, сопровождающих ГИС геологического содержания. Эти данные могут быть использованы для построения линий простирации. Такие структурные линии иногда изображаются на специализированных геологических картах для повышения их наглядности и выразительности. Иногда для этих же целей условным обозначением литологического состава придаются ориентировки по простиранию слоистости. Нами показано, что эти векторные линии представляют собой сечения семейств поверхностей, разработана методика их построения путем интерполяции элементов залегания и продемонстрировано, что они могут играть не только вспомогательную роль, но и служить предметом строгого анализа. Первоначально указанная методика применялась при структурно-геологических исследованиях в Корякском нагорье, где значительная часть территории сложена именно монотонными отложениями с отчетливой тонкой слоистостью [10]. В то время вычислительной техникой мы не располагали, и процедуры, необходимые для определения промежуточных значений, сводились к графическим построениям. Позднее на базе этой методики было разработано несколько вариантов программы, с помощью которых такие построения осуществляются автоматически. Исходные данные (координаты точек наблюдения, углы и азимуты падения) вводятся, преобразуются во внутренний формат и сохраняются в памяти. При необходимости, кроме того, вводятся контуры интрузивных тел, разломов, стратиграфических несогласий и другая информа-

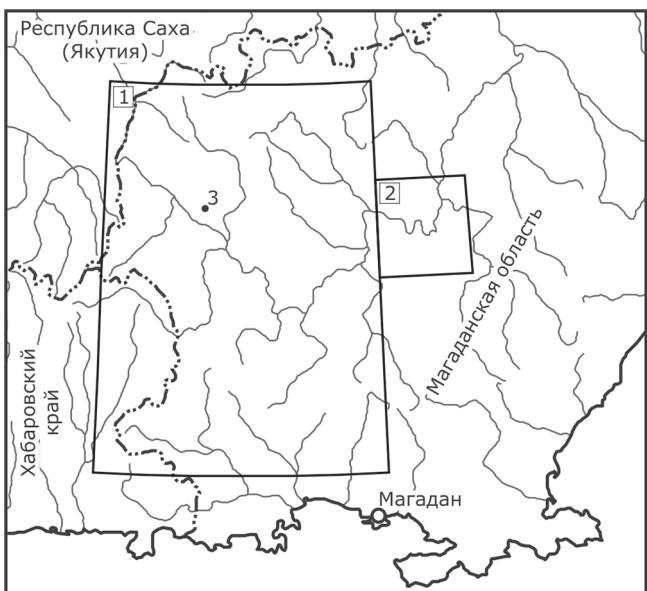


Рис. 5. Схема расположения объектов моделирования.

1 – территория, охватывающая Аян-Юряхский антиклиниорий и примыкающие структуры, 2 – междуречье Колыма-Оротуан, 3 – участок Чай-Юря.

ция, которую необходимо учитывать при построении структурных линий. Работа программы сводится к преобразованию данных к виду, позволяющему вычислять простирации, направления и углы падения в любой точке. С помощью специальной процедуры производится предварительная рисовка линий, отражающая структуру вычисленного векторного поля. Полученный таким образом рисунок позволяет выделять участки с непрерывными залеганиями, соответствующие фрагментам складчатых структур, и линии, на которых непрерывность нарушается. Последние свидетельствуют о наличии разрывных нарушений или стратиграфических несогласий. Линии, полученные в результате предварительной рисовки, анализируются, сопоставляются с выявленными ранее геологическими границами, при необходимости редактируются и сохраняются в специальном векторном формате. Линии простирации образуют структурную схему, которая может быть воспроизведена на экране, выведена на печать или преобразована к виду, поддерживаемому популярными графическими редакторами. Построенные таким способом схемы позволяют судить о характере складчатости, взаимоотношениях между складчатыми и дисьюнктивными структурами, о характере деформаций, сопровождающих внедрение интрузивных тел. Представление слоистых тел семействами непересекающихся поверхностей положено в основу программ, позволяю-

щих производить экстраполяции с горизонтальной плоскости на глубину, т.е. по результатам наземных исследований создавать трехмерные модели геологических структур.

Как упоминалось выше, методика построения и анализа линий простирания изначально разрабатывалась для полевых исследований. Для предварительной рисовки линий простирания использовались все замеры слоистости, не вызывающие сомнения. При необходимости данные пополнялись за счет дополнительных маршрутов. После резкого сокращения полевых исследований для обработки стали доступны главным образом данные, содержащиеся на изданных геологических картах. Отображенные на них элементы залегания тоже могут быть предметом анализа. Но количество замеров, показанных на карте, в большинстве случаев значительно меньше, чем было получено в процессе геологической съемки. Данные, снятые с карты, в отличие от замеров, производимых непосредственно в полевых условиях, мы контролировать не можем. Поэтому целесообразно составлять схемы по серии листов, а масштабы их делать мельче, чем масштабы исходных карт.

Ниже приводятся результаты практического применения данных программ для изучения некоторых геологических объектов, расположенных на территории Магаданской области (рис. 5).

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СТРУКТУР АЯН-ЮРЯХСКОГО АНТИКЛИНОРИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СРЕДНЕМАСШТАБНОГО КАРТИРОВАНИЯ

Эта работа сводится к обобщению, генерализации и анализу результатов обработки фактического материала, отображеного на картах масштаба 1:200 000, и сопоставлению выявленных структурных линий с границами, отображенными на мелкомасштабных геологических картах. Примером такой работы может служить анализ, произведенный для изучения структур Аян-Юряхского антиклиниория.

Аян-Юряхский антиклиниорий является одним из крупных структурных элементов Яно-Колымской складчатой зоны. Он протягивается в северо-западном направлении на 500 км, при ширине около 90 км, охватывая бассейны рр. Аян-Юрях, Кулу, Тенька и Детрин. По существующим представлениям, антиклиниорий сложен породами преимущественно пермского возраста, при участии триасовых отложений на его крыльях и замыканиях. В пределах антиклиниория пермские отложения подразделяются на свиты: родиновскую, пионерскую (бывшая тасская свита), атканскую, омчакскую (бывшая нерючинская) и старательскую (бывшая кулинская). Все свиты представ-

лены аргиллитами, алевролитами, песчаниками, реже конгломератами и вулканогено-осадочными образованиями различного гранулометрического состава. Основную часть антиклиниория, составляя его ядро, занимают крупные складки (с северо-востока на юго-запад): Колымская антиклиналь, Таяхтахская синклиналь, Тенькинская антиклиналь. Эти крупные складки, сложенные в основном породами пермского возраста, вытянуты вдоль оси антиклиниория. Юго-восточное замыкание антиклиниория усложняется разноориентированными складками и их фрагментами. На северо-западном замыкании угадываются веерообразно расходящиеся линейные складки. На юго-востоке и в центральной части структуры антиклиниория прорваны крупными интрузивными телами преимущественно гранитоидного состава. На северо-западе количество интрузий незначительно. Аян-Юряхский антиклиниорий разбит большим количеством разломов, в основном параллельных его оси. С северо-востока антиклиниорий граничит с Иньяли-Дебинским синклиниорием по Чай-Юрынскому разлому. На юго-востоке антиклиниорий сочленяется с Армано-Вилигинским синклиниорием, на юго-западе же находятся Верхнеиндигирский синклиниорий, Иня-Челомжинская зона пологих дислокаций и Охотский массив. На юге на антиклиниорий наложены структуры Охотско-Чукотского вулканогенного пояса.

Являясь, как отмечено, одной из ключевых тектонических единиц, антиклиниорий служит индикатором процессов формирования всей Яно-Колымской складчатой системы, так что изучение характера складчатых и разрывных дислокаций в его пределах и в прилегающих тектонических элементах помогает пониманию процессов формирования структуры всего региона. Кроме того, в его пределах расположены многочисленные рудопроявления и месторождения золота, олова и других полезных ископаемых, что вызывает интерес не только с научной, но и с практической точки зрения.

Для первичного анализа морфологии структурных элементов антиклиниория и пограничных с ним структур составлена карта, изображающая линии простирания, построенные по элементам залегания, содержащимся на государственных геологических картах м-ба 1:200 000 (рис. 6). Всего с 25 листов, покрывающих данную территорию, вынесено около 5000 элементов. Такая плотность замеров обеспечивает достаточно высокую достоверность исходного материала. В то же время, работа с таким большим количеством данных порождает определенные трудности. С одной стороны, эти трудности связаны с необходимостью

производить генерализацию, отсеивающую второстепенные детали, что привносит определенный элемент субъективности. С другой стороны, обработка значительно большего количества данных, нежели ранее, потребовала оптимизации, обеспечивающей работу программ с приемлемой скоростью.

Сопоставление схемы с геологическими картами масштабов 1:1 000 000 и 1:500 000 приводит к следующим результатам. По линиям простирания четко выделяется сам Аян-Юряхский антиклиниорий и обрамляющие его структуры. В осевой части антиклиниория выделяются три крупные складки северо-западного простирания. Они соответствуют уже известным структурам: Колымской и Тенькинской антиклиналям и Таяхтахской синклинали. При общем северо-западном простирации структур антиклиниория, в его средней части по долине р. Берелёх отчетливо проявляется коленообразный изгиб, выраженный в довольно резкой смене простираций шарниров складок. В восточной части территории выявляется серия разрывных нарушений, отделяющих антиклиниорий от прилегающих к нему структур Иньяли-Дебинского синклиниория. Эта система нарушений соответствует Чай-Юрынской зоне разломов, причем, как и на мелкомасштабных геологических картах, эта зона делится на две части: юго-восточную и северо-западную с резкой сменой направления в среднем течении р. Кулу от запад-северо-западного к север-северо-западному (изменение направления структур составляет 5–10°). Соответствие результатов формализованных построений результатам геологического картирования свидетельствует, с одной стороны, о корректности исходного материала, а с другой – о работоспособности применяемых алгоритмов и созданных на их основе программ.

В то же время, с помощью линий простирания выявляются элементы, не получившие столь отчетливого выражения на средне- и мелкомасштабных картах. Так, на юго-восточном замыкании антиклиниория выделяются несколько более мелких изометрических и вытянутых складок и их фрагментов, обрамляющих юго-восточную границу антиклиниория. По разрозненным элементам широтная ориентировка структур угадывается и в пределах примыкающей с юга части Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (ОЧВП).

Совершенно по-другому устроено северо-западное замыкание антиклиниория. Здесь преобладают длинные узкие складки, распадающиеся на две ветви. Одна из них, восточная, сохраняет генеральное простижение антиклиниория. Другая, западная, отклоняется к западу. Пространство между ветвями пред-

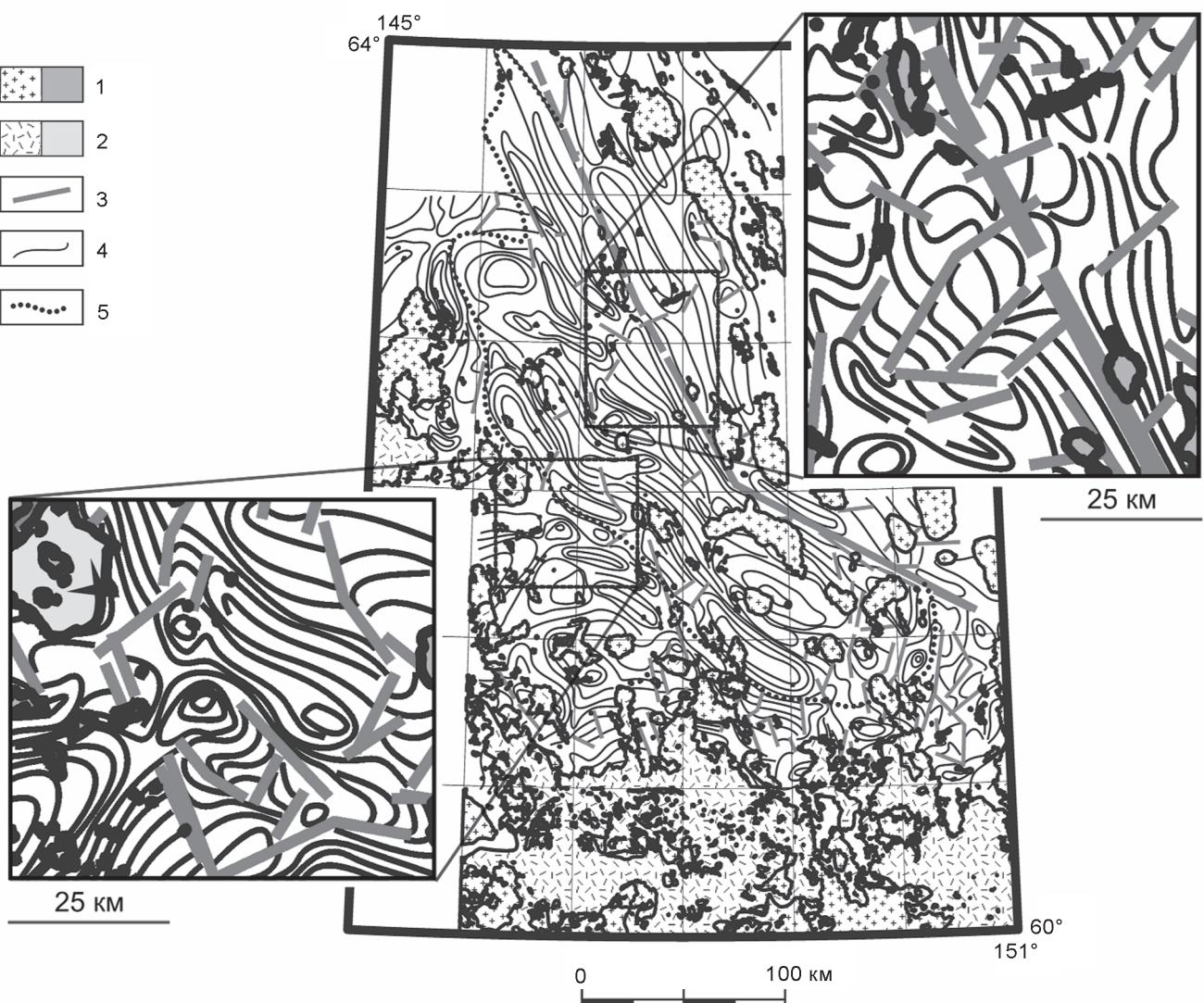


Рис. 6. Схема, изображающая в генерализованном виде линии простирания, построенные на территорию Аян-Юряхского антиклиниория и прилегающих структур по данным среднемасштабного геологического картирования.

1 – интрузии, 2 – вулканиты ОЧВП, 3 – выявленные разрывные нарушения, 4 – структурные линии, 5 – условная граница Аян-Юряхского антиклиниория. На врезках показан характер поведения линий простирания у границ антиклиниория.

ставляется в виде вклинивающегося блока, внутри которого различаются фрагменты складок, дискордантных обеим ветвям. И на севере, и на юге между крупными складчатыми структурами выделяется множество мелких фрагментов, расшифровать которые на данном этапе не удается.

Дополнительную информацию дает анализ поведения линий простирания, примыкающих к Чай-Юрынскому зоне разломов. Южная часть зоны распадается на серию разрывов, ориентированных вдоль нее. На севере зоны фиксируется множество наруше-

ний, поперечных к ее общему простиранию. И на севере, и на юге зона трассируется фрагментами узких линейных складок, ориентированных вдоль зоны. Однако примерно в середине северной части зоны, на участке протяженностью порядка 20 км, проявляются только поперечные разрывы, а линии простирания слоистости зону пересекают. На листе геологической карты Р-55-XVI в этом месте изображен небольшой блок триаса, вдающийся в структуры антиклиниория со стороны Иньяли-Дебинского синклиниория поперек Чай-Юрынского разлома. Причину дан-

ного явления на настоящем этапе исследований объяснить трудно. Возможно, это проявление более поздних наложенных деформаций, затушевывающих общую картину.

Юго-западная граница антиклиниория проходит по крылу Тенькинской антиклинали. По поведению линий простирации в примыкающих структурах и характеру их сочленения с антиклиниорием ее можно разделить на две части – южную и северную, граница между которыми проходит по р. Кулу. В обеих частях структурные элементы, выявляемые в Верхнеиндигирском синклиниории, ориентированы под острым углом или почти перпендикулярно к оси пограничной Тенькинской антиклинали и генеральному простиранию всего антиклиниория. Однако в южной части структуры синклиниория “приспособливаются” к границе антиклиниория, изменяя свои простирания. В северной же части складчатые структуры синклиниория торцово утыкаются в границу с антиклиниорием. На наш взгляд, такое соотношение между структурными элементами нельзя разумно интерпретировать без предположения о существовании протяженной дизъюнктивной границы между ними. Вызывает интерес и то обстоятельство, что заметное изменение стиля структур как на восточной, так и на западной границе антиклиниория совпадает с коленообразным изгибом внутри него. Все приведенные данные свидетельствуют о более сложном, чем представлялось первоначально, строении антиклиниория и многоэтапности его формирования.

АНАЛИЗ СТРУКТУР В МЕЖДУРЕЧЬЕ КОЛЫМА– ОРОТУКАН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ КРУПНОМАСШТАБНОГО КАРТИРОВАНИЯ

Методика таких работ подразумевает ввод данных с геологических карт (в первую очередь элементов залегания) и первичную обработку, которая сводится к построению и анализу линий простирания слоистости для составления среднемасштабных структурно-морфологических карт. Проблема состоит в том, что среднемасштабные карты, составленные в процессе государственного картирования территории СССР, не учитывают результаты более поздних крупномасштабных работ. В то же время, крупномасштабные карты, отражая детали строения отдельных частей структур более высокого ранга, не дают представления о характере складчатых и разрывных деформаций в целом. Обобщение и генерализация деталей для последующего отображения на среднемасштабных картах становится одной из главных задач при работе с такими материалами. Сложность обостряется тем, что крупномасштабные карты, как правило, покрывают не всю территорию, а

только отдельные ее части. Так что при решении задач такого рода необходимо сочетать генерализацию на отдельных участках с интерполяцией.

По данным геологического картирования, район разделен на 3 структурные единицы – Буюндино-Балыгычанский антиклиниорий, Иньяли-Дебинский синклиниорий и Сеймчано-Буюндинскую неотектоническую впадину. Буюндино-Балыгычанский антиклиниорий находится в южной части территории. Он представлен крупной глыбовой структурой – Оротуканским горстом. Иньяли-Дебинский синклиниорий ограничивается с юга Паутовским разломом, а с севера – региональным разломом Улахан, вдоль которого образовалась Сеймчано-Буюнданская впадина.

На эту территорию по элементам залегания слоистости, показанным на листах государственной геологической карты масштабов 1: 200 000 и 1:50 000, построена структурно-морфологическая схема (рис. 7).

Анализ указанной схемы приводит к выводу о том, что по характеру складчатости территорию, занятую Иньяли-Дебинским синклиниорием, можно разделить на два фрагмента: юго-западный представляется в виде серии узких, почти изоклинальных складок, ориентированных строго в широтном направлении, и северо-восточный, состоящий из фрагментов крупных, более изометричных складок. В пределах Буюндино-Балыгычанского антиклиниория, судя по линиям простирания, фиксируются складки сложной конфигурации и большое количество разноориентированных разрывных нарушений. При этом выделяются две части, восточная и западная, с разным типом складок, различающихся как по формам, так и по преобладающим простирациям. По участкам, на которых линии простирания сливаются в одну линию или резко меняют направления, выделяются нарушения непрерывности залеганий, которые можно интерпретировать как разрывные нарушения. Указанные нарушения можно разделить на два типа. Нарушения первого типа четко выделяются в виде прямых или незначительно изогнутых линий. В большинстве случаев они характеризуются протяженностью в первые километры и вызывают локальные усложнения складчатых структур. Нарушения второго типа проявляются в виде протяженных прямых или плавно изогнутых линий, которые в большинстве случаев распадаются на фрагменты, часто разобщенные разрывами первого типа. Этим нарушениям соответствуют либо границы главных структурных единиц, либо границы между крупными фрагментами внутри них. Примером нарушений второго типа является линейная зона, в пределах которой фиксируется множество мелких нарушений.



Рис. 7. Структурная схема междуречья Колыма–Оротуан.

1 – линии простирания, 2 – разрывные нарушения, 3 – интрузивные тела.

Южная граница этой зоны соответствует хорошо известному Паутовскому разлому. Имеются и другие примеры совпадения нарушений, выявленных с помощью анализа, с закартированными дизъюнктивами. В то же время, выявляются нарушения, не получившие отражения на геологических картах.

АНАЛИЗ СТРУКТУР НА УЧАСТКЕ ЧАЙ-ЮРЬЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДЕТАЛЬНЫХ РАБОТ

Участок Чай-Юрья, расположенный в Верхнеколымском районе на границе Иньяли-Дебинского синклиниория и Аян-Юряхского антиклиниория, давно привлекает к себе пристальное внимание, так как в этом месте располагается одно из крупнейших в мире россыпное месторождение золота. В коренных осадочных породах пермского, триасового и юрского возраста на этом участке выявлено наличие и рудной минерализации, но поиски коренного месторождения, сопоставимого с россыпным, успехом не увенчались. В рамках этой проблемы встал вопрос о возможной связи рудоносности со складчато-разрывными структурами. Результаты геологического картирования 1:200 000, 1:50 000 и 1:10 000 масштабов отчетливо ответа на этот вопрос не дали. Для этих целей и были проанализированы данные, содержащиеся на картах всех трех масштабов.

Анализ линий простирания, построенных по данным геологической карты м-ба 1:200 000, позволил выделить три системы разрывных нарушений: северо-западную, северо-восточную и субширотную. Из них только северо-западная система отчетливо отражена на всех геологических картах. Она соответ-

ствует двум глубинным разломам: Некликанскому и Чай-Юрьинскому, играющим ключевую роль в строении региона. Две другие системы нарушений, которые могут интерпретироваться как оперяющие, на геологических картах отражены слабо. Между тем, об их наличии свидетельствуют нарушения непрерывности залеганий, выявляемые при построении линий простирания. Указанные нарушения выявляются и при анализе данных, содержащихся на картах более крупных масштабов (1:50 000 и 1:10 000). С помощью линий простирания на них удается не только выявить нарушения, но и оценить характер сопровождающих складчатых дислокаций. В пределах проанализированного участка Чай-Юрьинский разлом с востока трассируется ундулирующей антиклинальной складкой, фрагментированной разрывными нарушениями более высоких порядков и осложненной наложенной поперечной складчатостью, приуроченной к субширотным разрывным нарушениям.

Для детального анализа структур, примыкающих к Чай-Юрьинской россыпи, использована программа, позволяющая, в числе прочего, автоматически строить профильные разрезы по любому направлению. Структурная карта и серия параллельных разрезов, построенных с помощью этой программы, позволили получить дополнительную информацию о характере складчатых и разрывных нарушений [6] (рис. 8). Разрывы, выявленные в результате построения линий простирания, подчинены трем основным направлениям: северо-западному, совпадающему с простиранием Чай-Юрьинского разлома, северо-восточному и субширотному. Отчетливо вырисовывает-

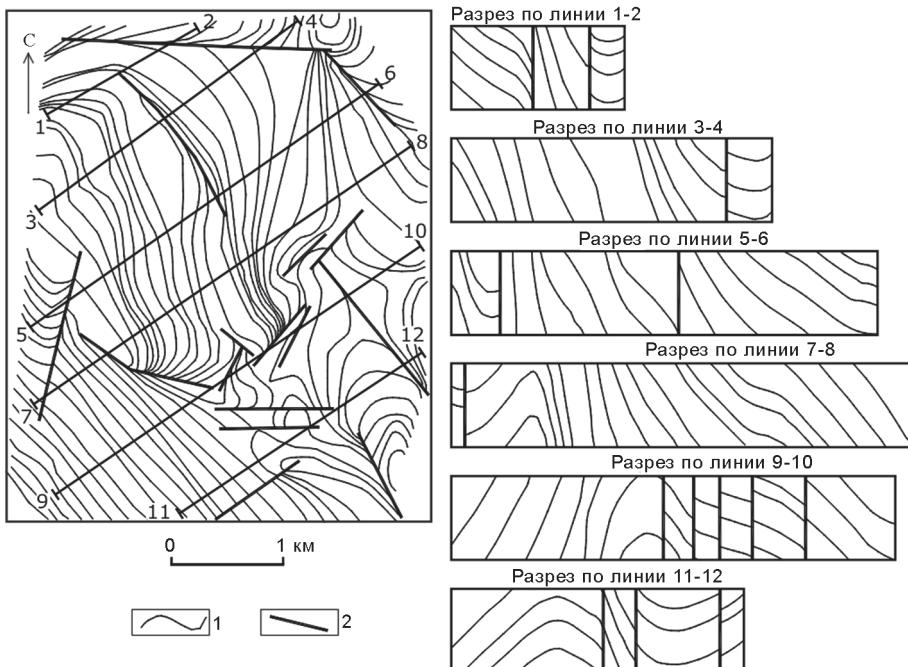


Рис. 8. Результат обработки элементов залегания на участке Чай-Юря.

1 – структурные линии, 2 – выявленные разрывные нарушения.

ся складчато-разрывная структура, состоящая из крупной антиклинальной складки, переходящей на флангах в синклинали. Простиране шарниров складок преимущественно северо-западное, но они неоднократно меняют направление и ундулируют. Шарнир антиклинали явно выражен только на северо-западе и северо-востоке участка. В центральной части отчетливо отражается только ее приподнятое северо-восточное крыло с постоянно меняющимися углами падения. Юго-восточнее центральной части антиклиналь осложнена складками более высокого порядка и разбита системой поперечных разрывных нарушений. Аналогичным образом ведут себя и синклинали: на севере и юге шарниры складок выражены отчетливо, а в центральной части не прослеживаются. Сопоставление структурных элементов с данными по опробованию привело к выводу о том, что участки с наиболее высокими содержаниями приурочены к системе разрывов северо-восточного простирания, нарушающей общую северо-западную ориентировку линейных складок (рис. 8).

Программы, с помощью которых получены описанные выше результаты, написаны на языке C++. В приведенных примерах данные вводились как непосредственно с растровых изображений карт, так и из баз данных. Файлы, в которых содержится информация о структурных линиях, могут быть преобразованы в форматы, поддерживаемые конкретными геоинформационными системами. При необходимости программы, созданные на тех же принципах, могут быть встроены в саму ГИС как одно из приложений.

В заключение авторы считают уместным еще раз обратить внимание создателей геоинформационных систем геологического содержания на необходимость уделять внимание способам ввода и хранения первичной геологической информации, в том числе элементам залегания. Необходимо разделять данные, которые следует отображать на электронных вариантах геологических карт для лучшего восприятия, и данные, которые можно использовать для компьютерной обработки и получения новой информации.

ЛИТЕРАТУРА

- Баранов Ю.Б., Берлянт А.М., Кошкарев А.В. и др. Толковый словарь по геоинформатике / Под ред. А.М. Берлянта и А.В. Кошкарева. Изд. на CD-ROM. ГИС-обозрение, 1998. Изд. в Интернете: http://www.ihsr.ru/project_link/glossary/glos_g.htm.
- Ворошин С.В., Мельник В.Г., Голубенко И.С. и др. Введение в региональные геоинформационные системы: Учеб. пособие. Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2003. 145 с.
- Горячев И.Н. Компьютерное моделирование морфологии и геодинамики юго-восточной части Аян-Юряхского антиклиниория // Геодинамика, магматизм и минерагения континентальных окраин Севера Пацифики: В 3-х т. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2003. Т. 1. С. 83–85.
- Казаков А.Н. Геометрический анализ складчатых структур с помощью стереограмм // Геологическая съемка сложно дислоцированных комплексов: Метод. пособие по геологической съемке м-ба 1:50 000. Вып. 6. Л.: Недра, 1980. С. 28–48.
- Ласло М. Вычислительная геометрия и компьютерная графика на C++. М.: Изд-во Бином, 1997. 304 с.
- Лямин С.М. Изучение взаимосвязи структур и рудопроявлений на участке Чай-Юря с помощью компьютерных

- программ // Проблемы геологии и металлогении Северо-Востока Азии на рубеже тысячелетий. В 3-х т. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2001. Т. 2. С. 172–176.
7. Лямин С.М. Использование компьютерных технологий при изучении геологической структуры (на примере хребта Кэнкэрэн, Корякское нагорье) // Применение персональных ЭВМ в геологических исследованиях. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2001. С. 53–60.
 8. Лямин С.М., Гревцев А.В. Трехмерное моделирование осадочных структур как инструмент изучения потенциально нефтегазоносных осадочных бассейнов на примере центральной части Северо-Охотской системы прогибов // Геодинамика, магматизм и минерагения континентальных окраин Севера Пацифики: В 3-х т. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2003. Т. 2. С. 27–31.
 9. Пахомов А.Ю., Лямин С.М. Модель тектонических движений в Магаданской впадине // Геодинамика, магматизм и минерагения континентальных окраин Севера Пацифики: В 3-х т. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2003. Т. 1. С. 253–255.
 10. Петров А.Н. Геометрические модели слоистых тел и картирование сложнодислоцированных толщ путем интерполяции элементов залегания (методические рекомендации). Магадан: СВКНИИ ДВО АН СССР, 1988. 60 с.
 11. Петров А.Н., Кашина А.П., Чехов Д.А. Трехмерное моделирование складчатых структур с помощью стратиграфи- ческих координат // Научно-технический прогресс и политехническое образование на Северо-Востоке России: Материалы науч.-практ. конф. “Проблемы геологии, строительства и автотранспорта на Северо-Востоке России”. Магадан: МФ ХТГУ, 1996. С. 12–13.
 12. Петров А.Н. Математическое моделирование тектонических движений при изучении геологических структур. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1997. 130 с.
 13. Петров А.Н., Кашина А.П., Серова С.Н., Чехов Д.А. Математические методы и разработка компьютерных программ для геологических исследований // Применение персональных ЭВМ в геологических исследованиях. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2001. С. 6–22.
 14. Петров А.Н. Математические методы в геологии: Учеб. пособие. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2002. 189 с.
 15. Петров А.Н. Численные модели геологических структур и программное обеспечение геологических исследований // Материалы XXXVI совещания “Тектоника и геодинамика континентальной литосферы”. М.: ГЕОС, 2003. Т. 2. С. 110–113.
 16. Фокс А., Пратт М. Вычислительная геометрия. М.: Мир, 1982. 304 с.
 17. Шикин Е.В., Плис А.И. Кривые и поверхности на экране компьютера: Руководство по сплайнам для пользователей. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1996. 240 с.

Поступила в редакцию 22 мая 2006 г.

Рекомендована к печати Н.А. Горячевым

A.N. Petrov, I.N. Goryachev, S.M. Lyamin

Geometric models of geological structures, and geoinformation systems

The problems of construction and analysis of geometric models of geological structures are discussed. The approach to the creation of geometric models in the form of surface communities, and its particular realization involving the method of construction and analysis of lines of strike are described. The results of application of the programs that realize this method are offered for the study of some geological objects of Northeast Russia. Great attention is paid to the necessity of entering primary data into the geoinformation systems. These primary data include measurements of elements of occurrence.

Key words: GIS technologies, elements of occurrence, geometric models, geological structures.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНЫХ РУДНЫХ УЗЛОВ ЗАПАДНОГО ВЕРХОЯНЬЯ (ВОСТОЧНАЯ ЯКУТИЯ) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС

A.В. Костин, А.С. Гольцова, М.С.Лысенко, Т.В. Труфакина

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск

На примере рудных формаций Западного Верхоянья (Восточная Якутия) разработана концепция использования ГИС-технологий для прогнозирования рудных узлов благородных металлов. В основу ГИС-проекта положена геологическая модель рудных узлов, описывающая пространственное положение типовых рудных формаций. Средствами ГИС-анализа выделены площади, перспективные на обнаружение новых благороднометалльных рудных узлов.

Ключевые слова: ГИС технологии, рудные формации, Западное Верхоянье.

ВВЕДЕНИЕ

Оценка территорий на предмет перспективной благороднометалльной рудоносности является важнейшим этапом при принятии решений об инвестировании геолого-разведочных работ. Одной из важных составляющих геологического прогноза является моделирование рудных узлов на основе ГИС-технологий, что расширяет возможности поиска новых и нетрадиционных месторождений благородных металлов. Несмотря на различную изученность, на территории Верхояно-Колымской области сегодня известно более 10000 рудных месторождений, рудопроявлений и точек рудной минерализации, которые группируются в полиформационные рудные поля и узлы. Моноформационные рудные узлы встречаются крайне редко и в большей степени характерны для стратиформенных месторождений меди и полиметаллов.

Анализ геологического строения месторождений благородных металлов Западного Верхоянья [1–5] позволил создать комплексную модель рудного узла (рис. 1). В ее основе лежит представление о том, что месторождения формировались длительное время, начиная с этапа седиментогенеза и заканчивая складчатостью и последующим магматизмом. Были сформированы рудные узлы, месторождения которых группируются в золоторудный и сереброрудный ряды рудных формаций (табл.).

В золоторудном и сереброрудном рядах рудных формаций месторождения группируются по времени и условиям локализации, характеру рудных жил, мас-

штабам и качеству руд. Выделяемые нами типовые представители рудных формаций описываются как эталоны, характеристика которых закладывается в алгоритмы металлогенического анализа на основе ГИС технологий.

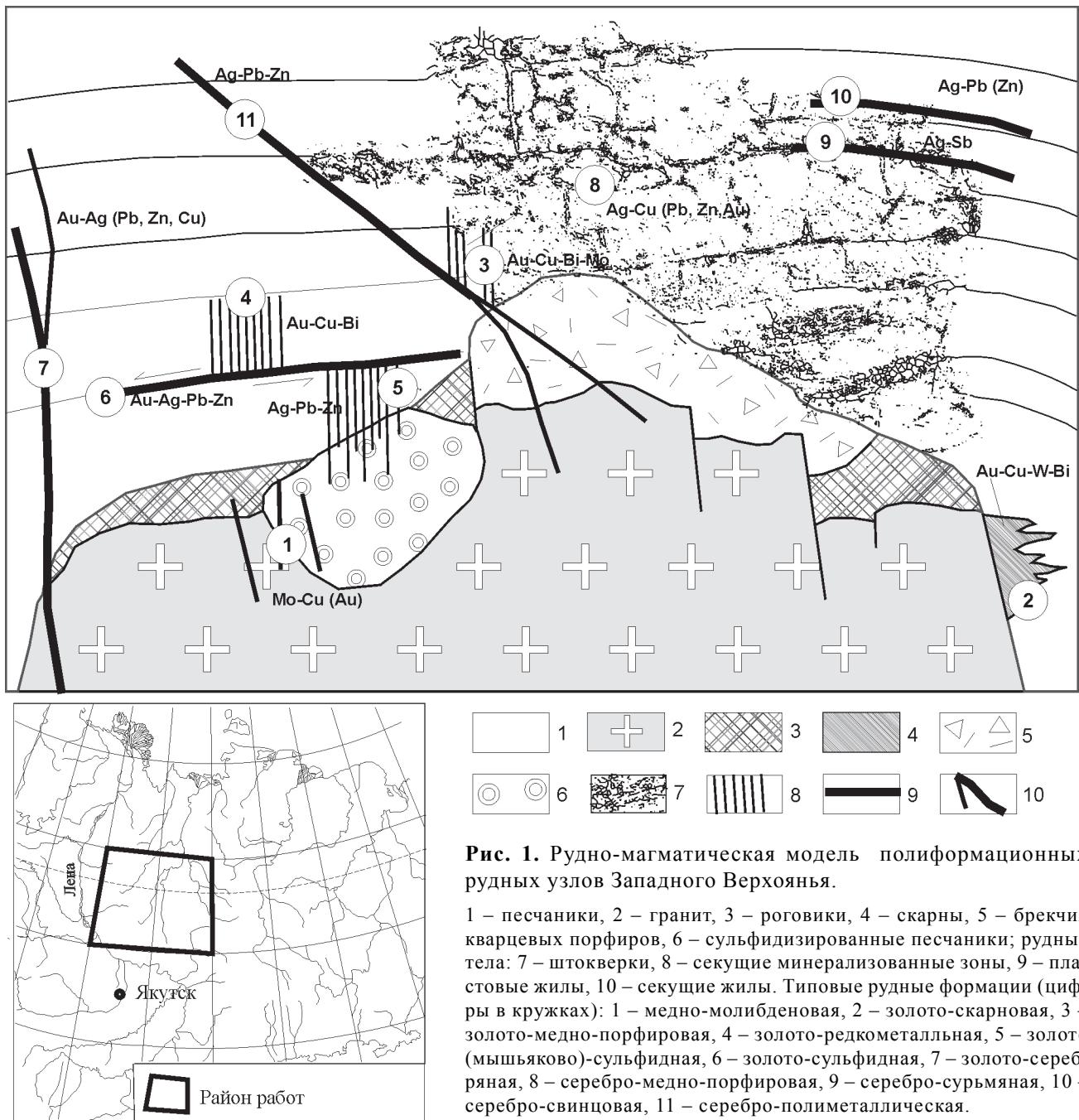
РЯД ЗОЛОТОРУДНЫХ ФОРМАЦИЙ

Коренное промышленное золото в Западном Верхоянье было известно только в рудах месторождения Аркачан. Отдельными пробами была установлена золотоносность жил участка Порfirовый Мангейского месторождения до 19 г/т.

Исследования последних лет показали, что золоторудные месторождения на территории Западного Верхоянья изучены недостаточно, а их роль в ресурсном потенциале золота будет постоянно возрастать. Месторождения образуют зональные поли- и моноформационные рудные узлы, генетически связаны с надкупольными частями невскрытых интрузий. Жилы медно-молибденовой формации локализуются непосредственно в интрузивных породах. По мере удаления от них располагаются золото-скарновая, золото-медно-порфировая, золото-редкометалльная, золото-(мышьяково)-сульфидная и золото-сульфидная рудные формации.

Медно-молибденовая формация

Представлена крутопадающими ($70\text{--}80^\circ$) мало- мощными (10–20 см) кварцевыми жилами с редкой вкрапленностью чешуйчатого молибденита, пирита и халькопирита. С ними ассоциируют пластовые и секущие сульфидные жилы мощностью от 3–5 до

**Таблица. Золоторудные и сереброрудные формации Западного Верхоянья.**

Ряд золоторудных формаций		Ряд сереброрудных формаций	
Рудная формация	месторождение	Рудная формация	месторождение
медно-молибденовая	Порфировый, Хобяту-Эчийское, Кыгылтасское	золото-серебряная	Пентиум, Позолота, Чочимбальское
золото-скарновая	Агылки	серебро-медно-порфировая	Нижнеэндыбальское
золото-медно-порфировая	Порфировый, Кысылтасское	серебро-сурьмяная	Мангазейское
золото-редкометалльная	Аркачан, Порфировый	серебро-свинцовая	Мухалканское
золото (мышьяково)-сульфидная	ГИС-1	серебро-полиметаллическая	Вертикальная
золото-сульфидная	Чочимбальское		

40–50 см в зонах малоамплитудных надвигов или сбросо-сдвигов. Жилы локализованы или в эксплозивных брекчиях, или в ороговикованных песчаниках зоны экзоконтакта Эндыбальской трубы взрыва [6]. По минеральному составу они относятся к сульфидному типу и состоят из кварца, сидерита, пирита, арсенопирита и халькопирита. Висмутин, густавит и сульфотеллуриды серебра – редкие минералы. Они образуют мелкие выделения по границам зерен арсенопирита, концентрируются в узлах пересечения трещин, где слагают небольшие мономинеральные агрегаты. Продуктивность жил увеличивается по мере удаления от интрузива. Содержания полезных компонентов в рудах следующие: Au – 11,900 г/т, Ag – 200,0 г/т, Cu – 0,180 %, Pb – 0,027 %, Zn – 0,026 %, Co – 0,002 %, Bi – 0,090 %, Hg – 32,000 г/т.

Золото-скарновая формация

Локализуется в контактовых ореолах невскрытых массивов гранитоидов в толщах, сложенных аргиллитами, алевролитами и песчаниками, среди которых отмечаются пласты мраморизованных известняков, к которым и приурочены скарны. Осадочные породы прорваны широтной серией сближенных до-рудных даек гранодиорит-порфиров, кварцевых порфиров, плагиопорфиров и диоритов. Рудные тела представлены залежью, образовавшейся по пласту мраморизованных и скарнированных известняков. Мощность тела – 3,5–5 м, в среднем – 4 м [10]. Рудные тела сложены минеральными ассоциациями четырех стадий минерализации: скарновой, шеелит-кварцевой, сульфидной и кальцитовой. Пироксен и гранат скарновой ассоциации замещаются минералами шеелит-кварцевой, сульфидной (халькопирит-пирротиновой) и кальцитовой ассоциаций. В рудах преобладают кварц, пирротин, пироксен, кальцит, второстепенные минералы – халькопирит, шеелит, актинолит, клиноцизит, хлорит, мусковит и гранат. В качестве примеси встречаются пирит, сфалерит, арсенопирит, блеклые руды, станнин, минералы висмута, самородные Bi и Au. Содержания: WO_3 – 1,27 %, Cu – 2,7 %. Характерны повышенные содержания Bi, Te, Se, Ag и Au.

Золото-медно-порфировая формация

Представлена сульфидизированными песчаниками с рассеянной вкрапленностью пирита, черного сфалерита, пирротина и халькопирита в зоне экзоконтакта Кыгылтасского plutона. Большая часть рудного материала находится в основном в рассеянном виде, что обусловлено различной ориентированкой рудных прожилков, сложенных пирротином, пири-

том, халькопиритом, сфалеритом, кварцем и сидеритом. Содержание в сульфидизированных песчаниках Au – до 1,12 г/т и Ag – до 21,86 г/т.

Общими особенностями месторождений золото-медно-порфировой формации являются: 1. Стратиграфические уровни, к которым они приурочены – граница карбона и перми и средний карбон; 2. Невысокие содержания металлов в руде, составляющие для Ag первые десятки г/т, для Au – десятые доли г/т; 3. Большие объемы рудной массы; 4. Внешние признаки, выраженные в необычной окраске пород (черные пленки оксидов марганца на рудах и породах, рыжий цвет гор из-за обилия окисленного пирита и пирротина); 5. Сочетание больших объемов сульфидизированных пород и незначительных по масштабам рудных жил внутри; 6. Многочисленные рудные жилы за пределами контуров сульфидизированных песчаников; 7. В участках с интенсивными тектоническими дислокациями количество рудных жил в сульфидизированных толщах увеличивается. В сульфидизированных песчаниках отмечается переотложение рудного материала и обогащение руд серебром и золотом. В составе рудных прожилков отмечаются пирротин, пирит, халькопирит, галенит, сфалерит, сульфосоли серебра, кварц и сидерит. Сульфиды характеризуются повышенной золото- и сереброносностью. По характеру распределения трещин с рудным выполнением выделяются участки штокверковой минерализации и протяженные пластины интенсивно пиритизированных песчаников.

Золото-редкометалльная формация

Представлена секущими минерализованными зонами крутопадающих прожилков. Самородное золото ассоциирует с халькопиритом, висмутином, самородным висмутом и теллуридами висмута [8, 9]. Руды с кобальтсодержащим арсенопиритом характеризуются повышенной золотоносностью. Продуктивными на золото являются кварц-сидерит-арсенопиритовая и кварц-сидерит-халькопиритовая минеральные ассоциации. Часто арсенопирит и халькопирит кристаллизуются совместно. В верхних горизонтах месторождения сохранились реликты халькопиритовых и арсенопиритовых руд, но большая часть их окислена. Характерно отсутствие минералов олова. Уменьшение в прожилках количества халькопирита и арсенопирита, полная смена типа минерализации на сидерит-пиритовую приводят к уменьшению золотоносности руд. Аналогичная ситуация возникает тогда, когда на золотосодержащие руды накладывается более поздняя пирротин-халькопирит-пирит-галенит-арсенопирит-сфалеритовая минеральная ассоциация.

Золото-(мышьяково)-сульфидная формация

Пространственно связана ореолами измененных пород в купольных частях невскрытых интрузий. Минерализованные зоны приурочены к субширотным системам трещин, рассекающим крылья антиклинальных складок почти под прямым углом. Протяженность рудных зон до 1,5 км при наибольшей ширине 25 м. Все прожилки имеют субвертикальное падение и широтное простижение. В составе жил в порядке убывания значимости отмечаются арсенопирит, пирротин, халькопирит и марматит. Руда содержит Au – 1,1 г/т и Ag – 138 г/т, при этом золотоносность пирита составляет 29,7 г/т Au, что вполне сопоставимо с золотоносностью пиритов золото-редкометалльных месторождений.

Золото-сульфидная формация

Представлена комбинацией пластовых и секущих сульфидных жил в сводовых частях антиклиналей. Включает несколько подтипов, среди которых пирит-арсенопирит-галенитовый, англезит-церусситовый (галенитовый) и кварц-сидерит-галенит-сфалеритовый. Протяженность жил – от первых сотен м до первых км, мощность – от 0,1 до 1 м. Пластовые жилы приурочены к зонам межпластовых срывов по контакту пиритизированных алевролитов и песчаников (висячий бок) и массивных плотных серых среднезернистых песчаников (лежачий бок). Содержания в песчанике с равномерной вкрапленностью пирита составляют: Au – 0,15 г/т, Ag – 5,2 г/т, а в динамометаморфизованном пиритизированном песчанике – Au – 2,8 г/т, Ag – 121,0 г/т. Средневзвешенное содержание Au по одной из жил составляет 7,61 г/т, Ag – 53,2 г/т, Pb – 16,0 %, Zn – 4,0 %, Cu – 0,12 %. Отмечаются линзы с галенит-фрейбергитовыми рудами, характеризующиеся высокой сереброносностью. В результате окисления золото-сульфидных руд образовались россыпи самородного золота.

РЯД СЕРЕБРОРУДНЫХ ФОРМАЦИЙ

За последнее десятилетие Западное Верхояье превратилось в одну из перспективных сереброрудных провинций России. Были разведаны крупные месторождения Мангазейское и Прогноз, опоискованы месторождения Хачакчанское, Ночное и Заря. Наряду с чисто серебряными месторождениями был обнаружен новый для этого района золото-серебряный тип руд – Пентиум-1 [7]. По характерным устойчивым минеральным ассоциациям сереброрудные месторождения группируются в золото-серебряную, серебро-медно-порфировую, серебро-сурьмянную, серебро-свинцовую и серебро-полиметаллическую рудные формации.

Золото-серебряная формация

Представлена секущими жилами в песчаниках на значительном удалении от кровли plutона. Рудные тела удалены от plutона в среднем на 1,5–2,5 км и образуют вокруг него серию кварцевых жил с галенитом, сфалеритом, буронитом, пиритом, арсенопиритом, тетраэдритом, Ag-тетраэдритом, фрейбергитом, пирагиритом, ковеллином, самородным золотом [7]. Средние содержания в руде составляют: Au – 3,06 г/т, Ag – 575,5 г/т, Pb – 11,5 %, Zn – 8,32 %. Максимальное содержание золота – 80,5 г/т. По содержанию главных полезных компонентов руды являются золото-серебряными свинец- и цинксодержащими. Особенностью строения кварцевых жил является вертикальная зональность, согласно которой золотоносность с глубиной увеличивается. В строении рудных жил отмечается стадийность, причем каждая секущая жила имеет выход в пластовую. Оруденение заканчивается в отложениях кыргылтасской свиты верхнего карбона – нижней перми. Данная модель типична для сингенетических месторождений. В составе жил присутствует несколько разновидностей золотосодержащих руд:

- рассеянное мелкое золото в мелкозернистом кварце, размер золотин не более 0,2 мм.
- интерстиционное золото в массивном крупнозернистом кварце размером 0,5–2 мм. Золото по морфологии в основном плоское.
- объемные самородки золота в друзьях кварца, размером от 2 до 8 мм.
- вкрапленное и пленочное золото в сфалерите и на границе с кварцем.
- трещинное неровное золото размером 1 – 5 мм в местах скопления блеклых руд.

Серебро-медно-порфировая формация

Представлена интенсивно карбонатизированными и сульфидизированными песчаниками над кровлей и на флангах трубки взрыва. Главные рудные тела имеют форму сложного штокверка. Мощность прослеженных участков 2,5–24,7 м при длине 120–500 м. В отдельных интервалах отмечается повышенное содержание Au до 0,57 г/т. Содержание Ag – 489,0 г/т, Pb – 1,33%, Zn – 1,18 %, Cu – до 1 %. Углы падения рудных зон – от 5 до 35° при восточном 65–110° азимуте падения. Отмечаются также и секущие крутопадающие зоны. Наиболее значимыми факторами литологического и структурного контроля серебряного оруденения месторождения являются следующие:

1. Рассеянное оруденение сосредоточено в основном в мелкозернистых тонкослоистых песчаниках комковатой текстуры.

2. В последовательности образования рудовмещающих структур четко просматриваются более ранние сдвиги и приуроченные к их флангам надвиги и пологие сбросы.

3. Наиболее богатые жилы приурочены к контакту мелкозернистых тонкослоистых и массивных среднезернистых песчаников. Вдоль этого контакта отмечается послойный срыв, включающий разноориентированные надвиговые деформации, образующие структуру “дуплекс”, и различные комбинации сбросов и долготного сдвига.

4. Рудная минерализация висячего бока надвига выполняет трещины скола, которые сформировались под влиянием деформаций различной кинематики – сдвиговой, сбросовой и надвиговой. По отношению к вмещающим породам это согласные и под различными углами секущие трещины с рудным выполнением.

5. Лежачий бок надвига характеризуется меньшим разнообразием ориентаций трещин с рудным выполнением. В основном это трещины поднадвигового кливажа, у которых угол падения меняется от крутого 75–80° до пологого 15–25°.

Наибольшие содержания серебра отмечены в пласте среднезернистых песчаников. Трещины с рудным выполнением разноориентированные, что обусловлено и физическими свойствами вмещающих пород, и кинематическими особенностями висячего бока надвига. Предполагается вертикальная зональность для серебро-медно-порфировой формации сверху вниз:

Ag-Cu – порфировый;

Ag-Au-Cu – порфировый;

Au-Cu – порфировый с Bi и Mo.

Серебро-сурьмяная формация

Представлена межпластовыми крутопадающими (40–80°) жильными телами, невыдержаными по падению и простиранию, с раздувами и пережимами, выклинивающимися либо разветвляющимися на серии сближенных прожилков. Мощность их колеблется от десятков см до 2–2,5 м в раздувах, длина изменяется от первых метров и десятков метров до 700–1000 м. Устанавливается отчетливый стратиграфический контроль в размещении рудных тел – все они располагаются в отложениях верхнего карбона и низов нижней перми и неизвестны в более молодых отложениях. При этом, на нижнем стратиграфическом уровне представлены только секущие рудные тела, которые выше по разрезу сменяются рудными залежами, согласными с напластованием вмещающих горных пород. В рудах установлены следующие минералы: самородные – серебро, сурьмянистое серебро

ро (анимикит), алларгентум, золото, сурьма, медь; сульфиды – акантит, Pb-акантит, Cu-акантит, Ag-Cu сульфиды ряда $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Cu}_2\text{S}$, галенит, сфалерит, халькопирит, стannин, пирит, арсенопирит, висмутин, антимонит; сульфосоли – блеклые руды, пирагирит, миаргирит, диафорит, овихиит, полизазит, стефанит, кан菲尔лит, фрейеслебенит, геокронит, бурнонит, буланжерит, густавит, Ag-Bi-сульфотеллурид. Содержание Ag в рудах – от 500 г/т до 2500 г/т [6].

Серебро-свинцовая формация

Является наиболее распространенной среди серебряных месторождениях Западного Верхоянья. Включает несколько минеральных типов, характеризующихся различной сереброносностью руд. Ранняя – сульфидно-тетраэдритовая минеральная ассоциация наблюдается в рудах преимущественно галенит-сфалеритового состава, содержание коричневого сфалерита меняется от 0 до 3–5 %. Количество тетраэдрита в этих рудах варьирует в широких пределах, а его сереброносность достаточно низкая. Ее сменяет галенит-марматит-тетраэдритовая с сульфосолями серебра минеральная ассоциация с мелким игольчатым арсенопиритом, пиритом, сфалеритом, галенитом, Ag-тетраэдритом и пирагиритом. В сфалерите наблюдаются многочисленные каплевидные включения халькопирита, станина, галенита и пирагирита. Следующая – галенит-фрейбергитовая минеральная ассоциация – характеризуется широким развитием галенита и фрейбергита, количество которого определяет сереброносность руд. Несколько реже в этих рудах отмечаются овихиит и буланжерит. В некоторых участках рудных тел эта ассоциация сменяется галенит-акантитовой, в которой практически отсутствуют серебро-сурьмяные сульфосоли [6].

Серебро-полиметаллическая формация

Представлена крутопадающими секущими минерализованными зонами дробления северо-западного простирания, расположенным в песчаниках верхнего карбона. Средняя мощность жил – 1,03 м, протяженность – от 200 м до 2 км. Содержание серебра в руде составляет 1239,0 г/т, золота – 0,62 г/т, свинца – 6,0%, цинка – 5,5 %. Секущие жилы имеют ответвления в зону субсогласных минерализованных брекчий с высокими содержаниями серебра (3118,3–3242,1 г/т) и золота (0,46–1,52 г/т). Контроль пластовых серебро-полиметаллических жил осуществляется межпластовыми срывами вдоль контакта средне- и мелкозернистых песчаников. По минеральному составу руды выделяются две продуктивные стадии: сульфидно-сiderитовая и сульфидно-кварцевая. С минеральными парагенезисами

второй стадии связаны наиболее высокие концентрации серебра, она же цементирует обломки, сложенные минералами сульфидно-сидеритового парагенезиса [6].

ПРИМЕНЕНИЕ ГИС В МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКОМ РАЙОНИРОВАНИИ

Металлогеническое районирование на основе ГИС технологий является новым шагом в создании единой распределенной модели геологического строения территории Якутии. Она призвана обеспечить функционирование многослойной базы рудно-формационных данных по объектам ранга месторождение, рудный узел и металлогеническая зона. В основу районирования положена идея о том, что рудные узлы состоят из месторождений, которые в пространстве образуют непрерывный ряд рудных формаций. Наличие одной из формаций ряда позволяет прогнозировать остальные. Рудный узел рассматривается как аномальный рудоносный блок земной коры в объеме одной или нескольких пространственно совмещенных рудоформирующих систем. Площадь рудного узла составляет сотни–первые тысячи кв. км, глубина достигает 10 и более км. Рудный узел объединяет несколько десятков месторождений, рудопроявлений и множество точек рудной минерализации, нередко различных по генетическим и морфоструктурным особенностям, а так же по набору полезных компонентов. Тем не менее, рудный узел – это самостоятельный металлогенический таксон, обладающий необходимой целостностью, которая обусловлена сочетанием в пространстве геологических процессов, обусловивших определенное геологическое строение, характерный набор рудных формаций и представляющих их месторождений.

Целевым назначением выполненного металлогенического районирования является создание на базе продукта ArcGIS картографических и табличных материалов по генетическим типам рудных узлов для оценки ресурсного потенциала Восточной Якутии, определения направлений геологических исследований, планирования работ в конкретных регионах.

Рудные узлы выделяются средствами модуля Spatial Analyst (плотность точек) по компактному расположению месторождений, рудопроявлений и точек минерализации. Для построения карты рудных узлов в ГИС проекте был создан слой “регистрационный кадастровый месторождений полезных ископаемых”, включающий более 10000 месторождений, рудопроявлений и точек минерализации. Атрибутивный файл базы данных включает следующие поля: название место-

рождения, вид полезного ископаемого, временная группа рудных формаций, рудная формация, геологопромышленный тип, размер месторождения. В пределах рудных узлов месторождения могут ранжироваться по размеру (крупные, средние, мелкие и т.д.) и по принадлежности к рудной формации. По признаку “временная группа рудных формаций” рудные узлы группируются в металлогенические зоны.

Полученная карта, фрагмент которой показан на рис. 2, отражает плотность распределения месторождений полезных ископаемых и может интерпретироваться как схема расположения рудных узлов. Выделенные таким образом рудные узлы по ассоциации с другими геологическими проявлениями подразделяются на несколько категорий:

1. На периферии plutонов.
2. В контурах роговиков.
3. В контурах роев даек.
4. Над изометричными геофизическими аномалиями.
5. Без ассоциации с чем-либо.

Рудоконтролирующее значение магматических факторов установлено для многих месторождений и рудопроявлений, однако оно не всегда равнозначно для различных рудных формаций. Для некоторых из них в настоящее время устанавливаются вполне определенные связи с магматическими породами, для других эти связи либо не установлены, либо еще недостаточно ясны. Площади распространения plutонов и даек, как правило, представляют области геологической активизации и характеризуются наиболее интенсивным развитием оруденения. Известно, что основные объемы рудной массы отлагаются над кровлей интрузий и формируют характерные зональные ряды месторождений. В этом же пространстве преимущественно локализуются и рои даек. Чем более эродирован plutон, тем меньше в его контурах рудных месторождений. Слабо эродированные или совсем не выходящие на поверхность plutоны сопровождаются интенсивным оруденением различной специализации и включают несколько десятков рудопроявлений и месторождений, в том числе несколько крупных. Оруденение может быть генетически связано с интрузией или быть регенерированным из обогащенных металлами осадочных пород.

Для использования магматического фактора при построении прогнозно-поисковых моделей созданы два слоя – полигональный (плутоны) и линейный (дайки). Информация о plutонах и дайках включает название plutона и plutонического пояса, к которому он относится, название породы, данные изотопных датировок и петрохимического состава породы.

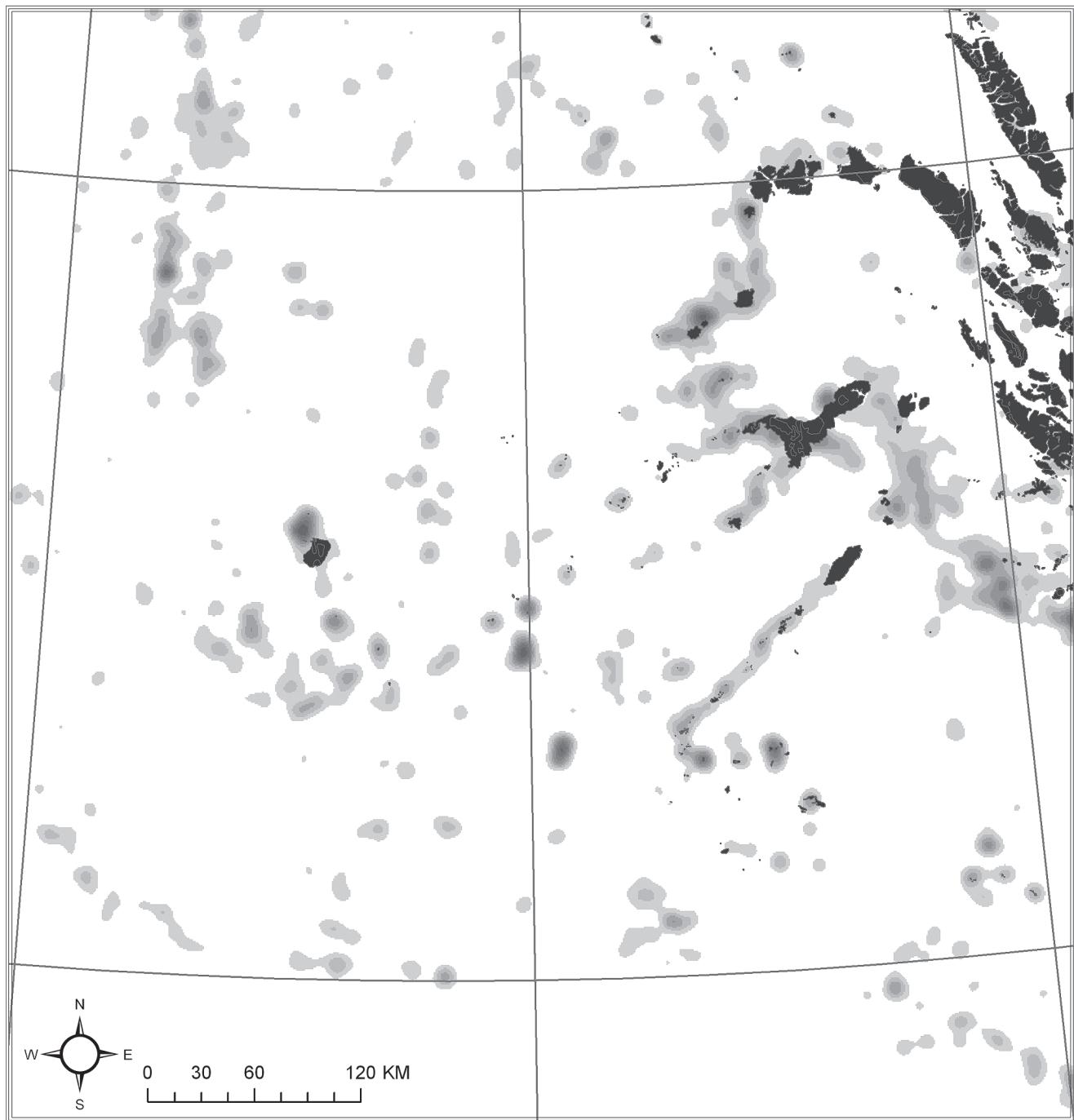


Рис. 2. Карта плотности распределения месторождений (листы Q-52, 53), показывающая рудные узлы. Серое – рудные узлы, черное – плутоны.

Ореолы сульфидизированных и ороговикованных пород обычно окаймляют верхние и боковые контакты plutонов с вмещающими породами и представляют благоприятную среду для размещения оруденения, генетически связанного с магматизмом. Зачастую сами сульфидизированные породы являются крупнообъемными месторождениями

порфирового типа. В генетическом единстве с ними выделяются несколько типов благороднометалльной минерализации, которая проявляется в следующих формах:

1. Рассеянная Au-As-Mo-Cu минерализация в магматических и вмещающих ороговикованных осадочных породах;

2. Зоны брекчий и даек в апикальных частях интрузивов с Au-Cu-Mo-Bi-Te минерализацией в прожилках и минерализованных зонах дробления;
3. Au-Cu-W-Bi скарны в зоне экзоконтакта с карбонатными породами;
4. Телескопированные секущие зоны прожилкования с Au-Cu-Co-Bi-As и пластовые с Au-Ag-Pb-Zn-As оруденением;
5. Удаленные от интрузива Au-Ag-Pb и Ag-Pb секущие жилы.

Описанные элементы зональности свидетельствуют о важнейшей роли сульфидизированных и ороговикованных пород в общей оценке территории. Их перспективная рудоносность определяется степенью эродированности ассоциирующего с ними плутония. Поэтому одним из важных признаков атрибутивной таблицы слоя “магматические образования” является площадь выхода плутония на дневную поверхность, вычисляемая средствами ArcView. Аналогичным образом вычисляется площадь ореолов сульфидизированных пород с сохранением этого параметра в атрибутивной таблице слоя “ореолы”. Эти

данные сопоставляются с плотностью рудных месторождений и ассоциациями рудных формаций.

Площади распространения plutонов и даек, как правило, подчеркиваются аномальными геофизическими полями. Их анализ помогает оконтуривать площади, перспективные на золотое и серебряное оруденение. В связи с этим, создаваемая ГИС была дополнена картами магнитных полей масштаба 1:1 000 000. Большое значение для прогноза перспективных территорий и направления геолого-поисковых работ играют участки с контрастными магнитными аномалиями, изучение которых позволяет определить характер и форму скрытых рудогенерирующих plutонов. Локальные слабые отрицательные аномалии интерпретируются как зоны развития близповерхностных plutонов, не вскрытых эрозией. Положительные магнитные аномалии фиксируют зоны развития контактово-метаморфизованных пород, как правило, выходящих на дневную поверхность, и участки интенсивной жильной сульфидизации. Контуры с нулевыми значениями магнитного поля с тенденцией его увеличения к центру соответствуют крупным пер-

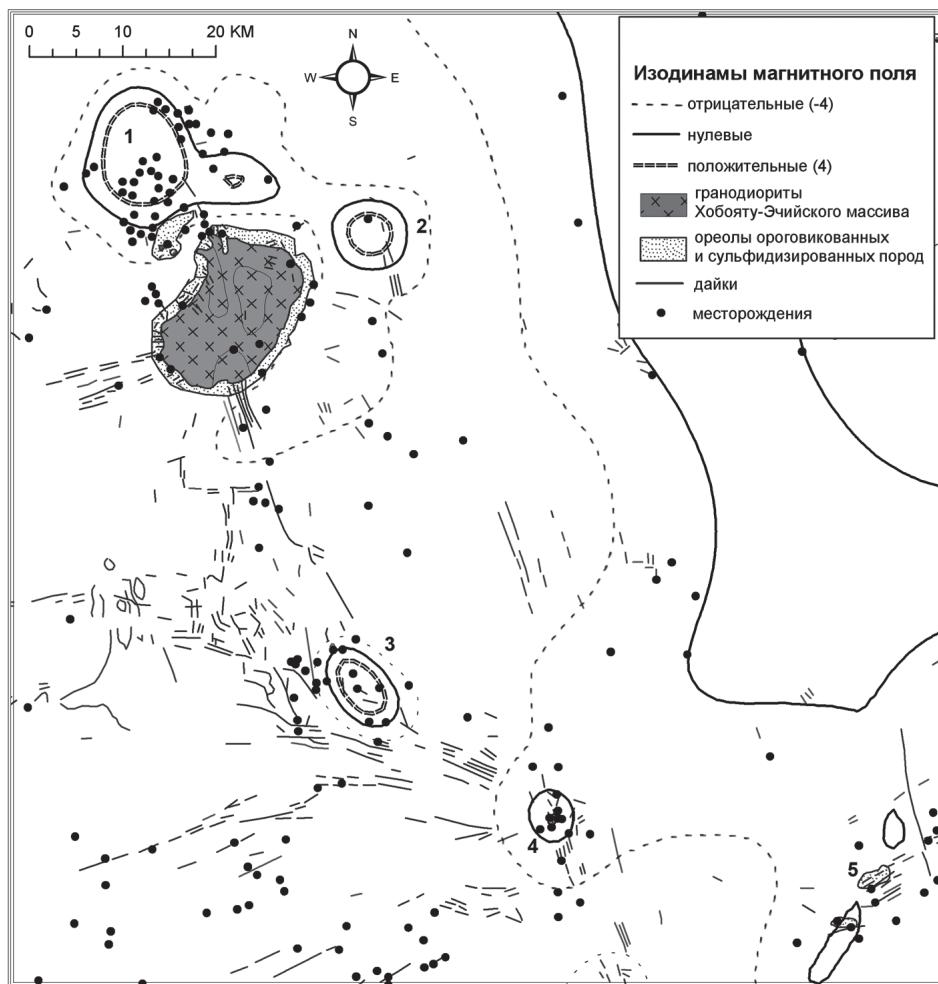


Рис. 3. Благороднометалльные рудные узлы Западного Верхоянья.

1 – Верхне-Бытакский и Хобояту-Согенский, 2 – Верхне-Молодокский, 3 – Нюектаминский, 4 – Эндыбалльский, 5 – Сомолконский.

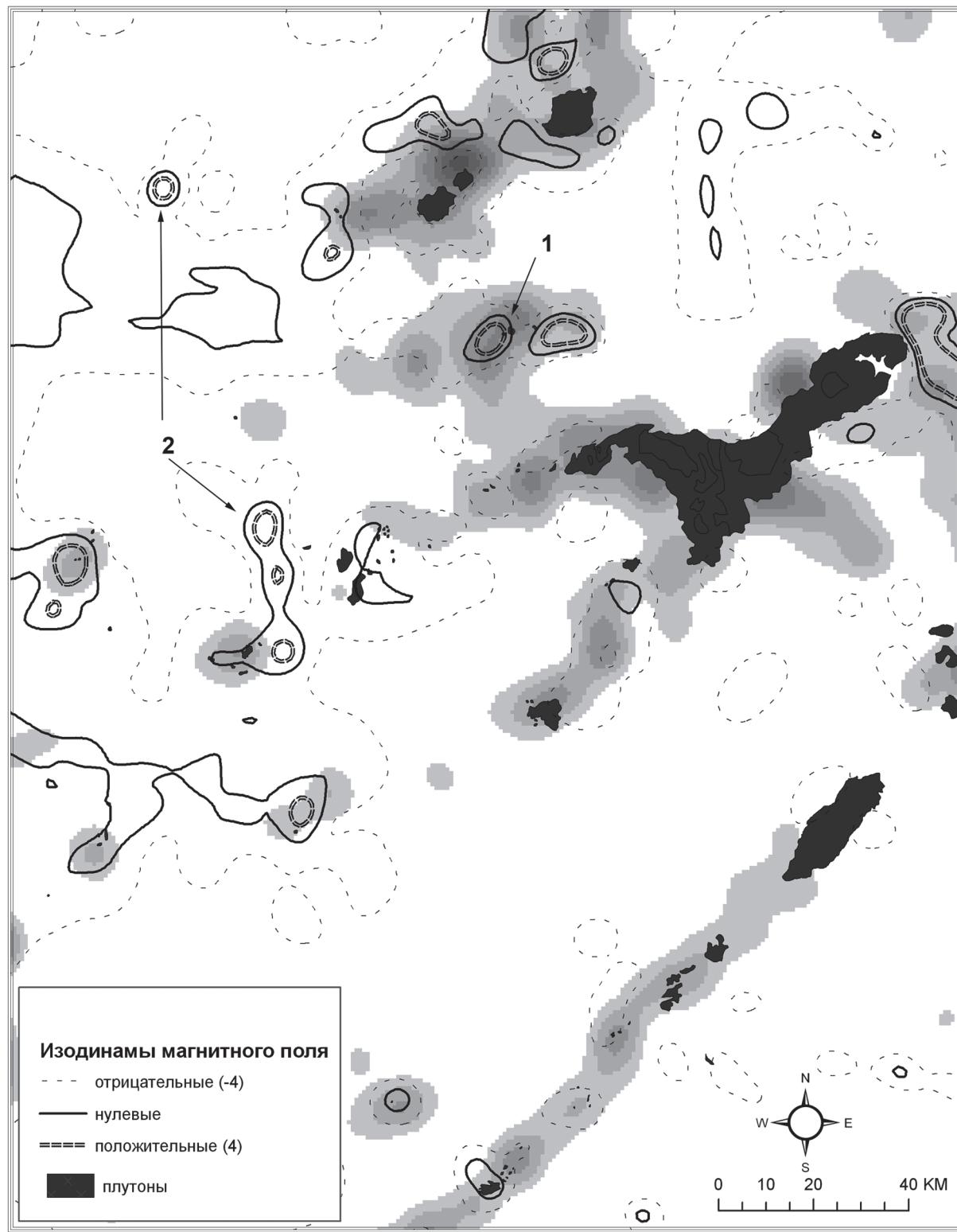


Рис. 4. Известные (1) и прогнозируемые (2) рудные узлы на карте совмещения плотности распределения месторождений и изодинам.

пективным рудным узлам (рис. 3). Подобные аномальные участки без известной рудной минерализации следует рассматривать как потенциально перспективные благороднометалльные рудные узлы, которые можно рекомендовать для постановки поисковых работ. Некоторые из выявленных потенциально перспективных рудных узлов показаны на рис. 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная на основе ГИС концепция прогнозирования рудных узлов позволяет проводить визуализацию разноплановой геологической информации, металлогенические исследования (включая построение карт металлогенических зон и рудных узлов) и экспертную оценку и прогноз рудных узлов с перспективной благороднометалльной минерализацией. В окончательном варианте ГИС может использоваться для решения как научных, так и практических геологических задач. Особенную актуальность ГИС приобретает на стадии выбора объекта инвестирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амузинский В.А., Андрианов Н.Г., Жданов Ю.Я. Минералогия серебряных руд Алара-Сахского поля (Западное Верхоянье) // Серебряное оруденение Якутии: Сб. научных трудов. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1999. С. 43–56.
2. Денисов Г.В., Засимов М.Г., Окунев А.Е. Геологическое строение и сереброносность Томпо-Делининской металлогенической зоны // Серебряное оруденение Якутии: Сб. научных трудов. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1999. С. 28–35.
3. Ивенсен Ю.П., Амузинский В.А., Невойса Г.Г. Строение, история развития, магматизм и металлогения северной части Верхоянской складчатой зоны. Новосибирск: Наука, 1975.
4. Индолев Л.Н., Невойса Г.Г. Серебро-свинцовые месторождения Якутии. Новосибирск: Наука, 1974.
5. Константинов М.М., Костин А.В., Сидоров А.А. Геология месторождений серебра. Якутск: Сахаполиграфиздат, 2003.
6. Костин А.В., Зайцев А.И., Шошин В.В. и др. Сереброносная провинция Западного Верхоянья. Якутск: Изд-во СО РАН, 1997.
7. Костин А.В. Прогноз золото-серебряных месторождений мирового класса в Куранахской рудной зоне (Западное Верхоянье) // Отч. геология. 2001. № 5. С. 62–67.
8. Костин А.В. О полигенности золотых и серебряных месторождений фронтальной части Верхоянского складчатого пояса // Отч. геология. 2002. № 4. С. 8–11.
9. Костин А.В. Формации благородных металлов Западного Верхоянья // Отч. геология. 2005. № 5. С. 29–33.
10. Найбородин В.И. Минералогия и генезис Агылкинского месторождения // Тр. ВНИИ-1. Геология. Вып. 50. 1959. С. 1–23.

Поступила в редакцию 9 марта 2006 г.

Рекомендована к печати С.М. Родионовым

A.V. Kostin, A.S. Goltsova, M.S. Lysenko, T.V. Trufakina

Application of GIS for prediction of noble metal ore clusters of West Verkhoyanye (East Yakutia)

A concept of applying GIS technologies for prediction of noble metal ore clusters has been developed as exemplified by ore formations of West Verkhoyanye (East Yakutia). The GIS project is based on a geological model of ore clusters which describes spatial distribution of type ore formations. GIS analysis permitted outlining of the areas which hold the potential for the discovery of new noble metal ore clusters.

Key words: GIS technologies, ore formations, West Verkhoyanye.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ГЕОЛОГИИ

УДК 55:002

КОМПЛЕКСНАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА РАБОТЫ С ФОНДОВЫМИ ГЕОЛОГИЧЕСКИМИ МАТЕРИАЛАМИ “ГЕОФОНД”

A.A. Сорокин

Институт геологии и природопользования ДВО РАН, г. Благовещенск

В статье представлена информация о проведенных работах по проектированию и разработке комплексной информационной системы работы с фондами геологическими материалами “Геофонд”. Разработанные программные компоненты позволяют обеспечивать новый подход к работам по обработке, классификации, хранению и доступу к фондовым данным с применением современных информационных технологий.

Ключевые слова: геология, фондовые материалы, информационная система, база данных, доступ.

ВВЕДЕНИЕ

За многолетний период изучения и отработки минерально-сырьевой базы России накоплен большой массив фондовой информации, характеризующей потенциал регионов по изученности геологических объектов, наличию месторождений полезных ископаемых и их эксплуатации. Подавляющий объем таких данных сосредоточен в региональных фондах информации по природным ресурсам и охране окружающей среды Министерства природных ресурсов России. В большинстве случаев инструменты, используемые для работы с фондами геологическими материалами, представляют собой частично модернизированные системы управления базами данных (СУБД), например, таких как Microsoft Access, встроенные подсистемы хранения данных в рамках программных пакетов географических информационных систем (ГИС), а также настольные табличные и текстовые редакторы. Применяемые решения позволяют эффективно решать одну или несколько задач, например, визуализации или хранения информации, однако не позволяют организовать комплексный подход, начиная от ввода данных и заканчивая предоставлением удаленного доступа к ним.

В данной статье рассмотрены вопросы проектирования и создания информационной системы “Геофонд”, реализующей большинство необходимых функций в работе с фондами геологическими ма-

териалами. Система построена на основе комплекса компьютерных программ, разработанных в Институте геологии и природопользования ДВО РАН (г. Благовещенск) совместно с Федеральным государственным учреждением “Территориальные фонды информации по природным ресурсам и охране окружающей среды МПР России по Амурской области” (ФГУ “ТФИ по Амурской области”) [1].

АНАЛИЗ ПОТОКОВ ДАННЫХ В СИСТЕМЕ РАБОТЫ С ФОНДОВОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ

Подавляющую часть материалов, передаваемых в территориальные фонды информации, составляют отчеты по работам на геологических объектах. Основными атрибутами, характеризующими их содержание, являются: название, реферат, год проведения работ, количество томов – книг, количество страниц, организация – исполнитель, ответственный исполнитель, геологический объект, электронные приложения. Поступающая информация рассматривается сотрудниками фондов и, если она соответствует существующим нормативным требованиям, принимается на регистрацию.

Как правило, отчет состоит из двух частей – бумажный экземпляр и электронные приложения (текст отчета, графические документы и т.п.). По информации с бумажной версии происходит заполнение соответствующих полей учетной карты отчета, и далее она поступает в хранилище, а картотека пополняется соответствующей записью (рис. 1). В послед-

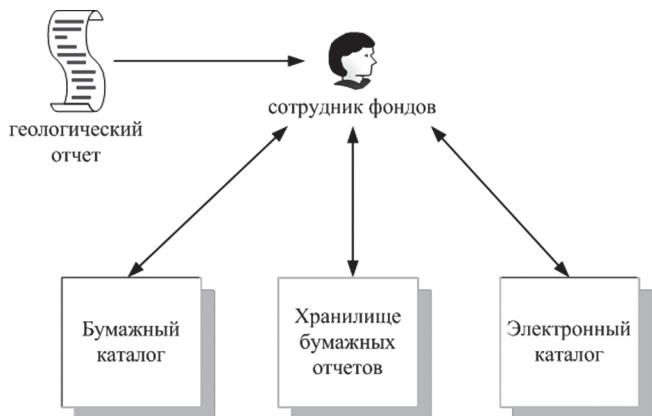


Рис. 1. Схема приема и первичной обработки информации.



Рис. 2. Схема поиска тематической информации.

нее время начали проводиться работы по переводу бумажных каталогов на электронную основу. Как правило, такие системы построены на базе программного продукта Microsoft Office (Word, Excel, Access) и функционально расширены за счет макросов и процедур, созданных средствами языка программирования Visual Basic for Application (VBA).

Процедура поиска данных об отчетах, хранящихся в фондах, складывается из следующей последовательности действий (рис. 2):

1) В бумажном каталоге производится поиск информации по определенным критериям. Выбираются те учетные карточки, которые наиболее полно соответствуют поставленному запросу.

2) По регистрационному номеру сотрудник фондов, при соблюдении всех необходимых норм, предоставляет для работы бумажный вариант отчета.

Использование электронного каталога отчасти ускоряет процесс поиска информации, однако в целом существующие подходы к работе с фондовыми материалами имеют ряд значительных недостатков. Применение неспециализированных компьютерных систем для реализации действий в рамках рассмотренных задач во многом замедляет поиск необходимых тематических данных и обеспечивает излишние трудозатраты со стороны сотрудников фондов. Среди основных недостатков применения такого подхода можно выделить:

- Отсутствие прямой связи между бумажным и электронным каталогом.

Практика параллельного ведения бумажного и электронного каталогов данных не позволяет в реальном времени осуществлять поиск и мониторинг поступившей информации по определенным геологическим объектам или выбранной территории.

- Ограниченные функциональные возможности информационных систем.

Использование “настольных” информационных систем для выполнения всего спектра работ с фондовыми данными не дает возможности реализовать необходимые функции, ставящиеся перед системами такого класса. Например, удаленный доступ в реальном времени к каталогу, формирование сложноатрибутивных поисковых запросов, в том числе и с применением элементов ГИС.

- Трудозатраты.

Слабая связь между бумажными и электронными частями системы приводит к излишним трудовым затратам. Поиск информации посредством бумажного каталога не всегда позволяет оперативно и в полном объеме получить требуемые результаты. Это связано с тем, что хранимая информация распределяется на тематические каталоги и ее быстрый поиск можно осуществить, обладая лишь четкими атрибутами описания, что не всегда является возможным.

Рассмотренные выше недостатки послужили причиной начала работ по созданию комплексной информационной системы работы с фондовыми геологическими материалами “Геофонд”.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ “ГЕОФОНД”

Целевое назначение информационной системы “Геофонд” заключается в создании комплекса программ с целью обеспечения сбора, хранения и доступа к фондовым геологическим материалам. Основные задачи, которая должна решать система:

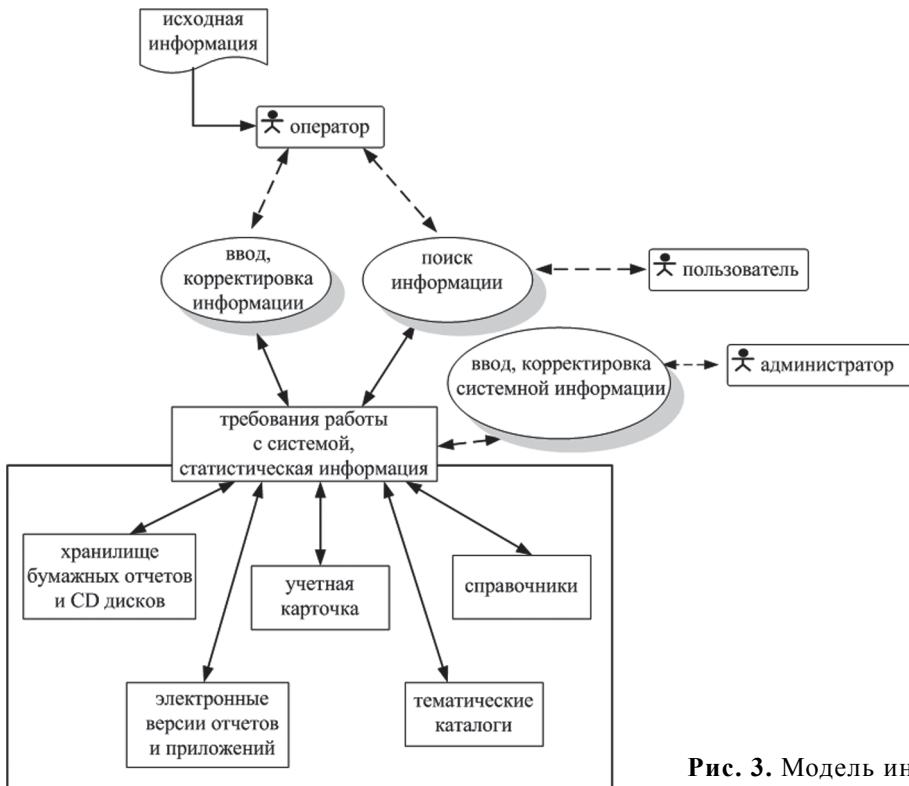


Рис. 3. Модель информационной системы.

- обработка исходной фондовой информации;
- формирование предметных каталогов;
- учет и классификация геологических объектов;
- многоатрибутный поиск отчетов с применением элементов ГИС;
- формирование статистики о циркулирующих потоках данных в системе;
- предоставление удаленного доступа в реальном времени к тематическим каталогам;
- обеспечение контроля доступа к информации.

В результате проведенного анализа предметной области, изучения потоков информации и требований, предъявляемых к её учету и описанию, была построена концептуальная модель функционирования системы. Общий вид модели представлен на рис. 3.

Для реализации поставленной цели были четко определены функции, которые выполняют те или иные сотрудники при обработке фондовых материалов на всех этапах работы. На основе указанных действий были выделены три группы пользователей системы:

Оператор. Выполняет основной объем работ. Обеспечивает ввод и корректировку учетной карточки на основе исходной информации (отчета). Проводит заполнение справочников, тематических каталогов и осуществляет поиск данных.

Администратор. Обеспечивает соблюдение требований по работе с фондовыми материалами.

Производит заполнение атрибутов элементов системы, контролирует доступ к информации.

Пользователь. Проводит поиск нужных тематических данных на основе условий, определенных *Администратором* системы.

Реализация указанной модели осуществлена путем разработки трех программных компонент, реализующих функции указанных пользователей и объединенных под общим названием “Геофонд”:

- Модуль “Программа сбора и классификации геологической и природоресурсной информации – Геофонд-Д” (АРМ “Оператор”);
- Модуль “Программа учета и статистики доступа к геологической и природоресурсной информации – Геофонд-С” (АРМ “Администратор”);
- Модуль “Программа доступа к геологической и природоресурсной информации – Геофонд-П” (АРМ “Пользователь”).

АРМ “Оператор” реализует ввод, корректировку тематической информации. Осуществляет ведение тематических каталогов и справочников (организации исполнители, ответственные исполнители и т.п.), которые являются метаданными. Они описывают объекты базы данных и позволяют упростить доступ к ним и управление ими [2].

АРМ “Администратор” обеспечивает задание параметров функционирования системы в целом,

создает учетные записи пользователей, определяет их статус и возможности, ведет учет работы в системе, производит создание резервных копий данных, формирует отчетные материалы по установленным формам.

АРМ “Пользователь” обеспечивает доступ рядовых пользователей в систему. Программная компонента обеспечивает работу с каталогом информации, а при наличии соответствующего доступа и с электронными приложениями.

Функционирование создаваемой комплексной информационной системы строится на основе специальных и общесистемных программных компонент. К общесистемному программному обеспечению, использованному для разработки и функционирования системы, относятся: операционная система, среда разработки, язык запросов СУБД, системные библиотеки; к специальному программному обеспечению – программные средства, при помощи которых реализуются функции системы.

В качестве специального программного обеспечения для разработки информационной системы выбраны следующие компоненты:

- среда разработки – Microsoft Visual Basic 6.0;
- язык программирования PHP;
- СУБД MySQL;
- OCX-компоненты MapX Mapinfo.

АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ

Система построена на архитектуре “клиент-сервер”. Ввиду специфики работы и взаимодействия разработанных компонент, в ней используется как традиционная двухуровневая, так и трехуровневая архитектура “клиент-сервер”.

Двухуровневая архитектура предусматривает разделение основных решаемых задач между двумя уровнями. АРМ “Оператор” и АРМ “Администратор” отвечают за представление данных пользователю, а серверы (FTP, СУБД MySQL) – за предоставление сервисов данных этим модулям (рис. 4). Сервисы представления управляют пользовательским интерфейсом и основной логикой приложения. Сервисы данных обеспечивают ограниченную поддержку логики приложения в виде правил проверки корректности ввода данных, которую клиент не способен выполнить из-за отсутствия соответствующей информации, а также реализуют доступ к запрашиваемым данным независимо от их расположения. Разработанные программы устанавливаются на настольных компьютерах конечных пользователей, через сеть взаимодействующих с серверами.



Рис. 4. Использование двухуровневой архитектуры “клиент-сервер” в системе.

С развитием internet-технологий получила распространение трехуровневая архитектура “клиент-сервер”. В ней предлагается использовать три уровня программного обеспечения, каждый из которых может функционировать на разных платформах.

1. Уровень пользовательского интерфейса, который располагается на компьютере конечного пользователя (клиент).

2. Уровень логики и обработки данных. Этот промежуточный уровень располагается на сервере и часто называется сервером приложения.

3. Серверы данных, в которых хранятся данные, необходимые для функционирования промежуточного уровня. Этот уровень может выполняться на отдельном сервере базы данных.

Как показано на рис. 5, АРМ “Пользователь” отвечает только за пользовательский интерфейс и выполняет некоторую логическую обработку данных, в частности, проверку корректности ввода данных. Ограниченный подобным функциональным набором модуль называется “тонким” клиентом. Основная логика приложения находится на собственном выделенном уровне, который физически связан с клиентом и сервером данных посредством локальной (Local Area Network – LAN) или глобальной (Wide Area Network – WAN) вычислительной сети. При этом предполагается, что один сервер приложений может обслуживать множество клиентов.

Трехуровневая архитектура имеет ряд преимуществ, среди них [2]:

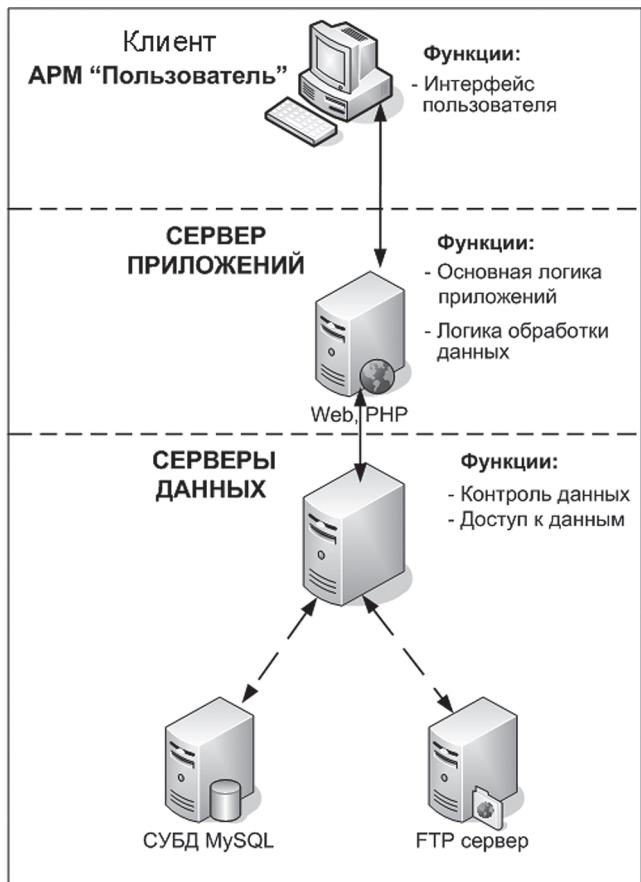


Рис. 5. Использование трехуровневой архитектуры "клиент-сервер" в системе.

· “Тонкий” клиент, для которого требуется менее дорогостоящее аппаратное обеспечение.

· Централизация логики для многих конечных пользователей на одном сервере приложения и, как следствие, централизация сопровождения приложения. Благодаря этому исключается необходимость развертывания программного обеспечения на множестве компьютеров, что представляет собой одну из самых сложных задач в двухуровневой модели “клиент-сервер”.

· Дополнительная модульность упрощает модификацию или замену программного обеспечения каждого уровня без оказания влияния на остальные уровни.

· Отделение основной логики приложения от функций базы данных упрощает задачу равномерного распределения нагрузки.

Основное преимущество заключается в том, что трехуровневая архитектура естественно вписывается в среду WWW, где Web-браузер выполняет роль “тонкого” клиента, а Web-сервер – сервера приложений. Такая система может быть расширена до n-уровневой архитектуры с дополнительными уровнями, которые позволяют повысить гибкость и масштабируемость создаваемых приложений.

ПРОГРАММНЫЕ КОМПОНЕНТЫ И ИХ ВОЗМОЖНОСТИ

АРМ “Оператор” является самой важной программной компонентой разработанной системы. Решаемые им задачи можно разделить на следующие основные направления:

1. *Ввод и корректировка информации* по следующим блокам данных – “Организация-исполнитель работ”, “Автор”, “Геологический объект”, “Протокол”, “Отчет”.

2. *Поиск информации* по основным атрибутам тематической информации, описанию каталогов, геологическим объектам, элементам ГИС (рис. 6).

3. *Подготовка статистической информации* по количеству поступивших материалов и графических приложений.

Элементы поиска позволяют достаточно четко сформулировать сложный запрос к базе информации и получить максимально полный ответ. Поиск может осуществляться как по одному, так и по набору атрибутов. На случай отсутствия данных по искомым материалам в системе присутствуют ме-

The search form includes the following fields and options:

- Основные параметры** (Main parameters):
 - Reg. номер (Registration number): Text input field.
 - Название (Name): Text input field.
 - Год (Year): Text input field with dropdown menu "В точности равен" (Is exactly equal to).
 - Организация (Organization): Text input field.
 - Составитель (Compiler): Text input field.
 - Реферат (Thesis): Text input field.
 - Checkboxes for "Строгое соответствие" (Exact match) next to each input field.
- Описание по каталогам** (Description by catalogs): Text input field.
- Геологические объекты** (Geological objects): Text input field.
- Поиск по карте** (Search by map): Text input field.
- Искать в найденном** (Search in found): Checkboxes for "Искать в найденном" (Search in found) and "Показать итоговый запрос в вербализованной форме" (Show final query in verbalized form).
- Найти** (Find) and **Закрыть** (Close) buttons.

Рис. 6. Форма поиска отчета.

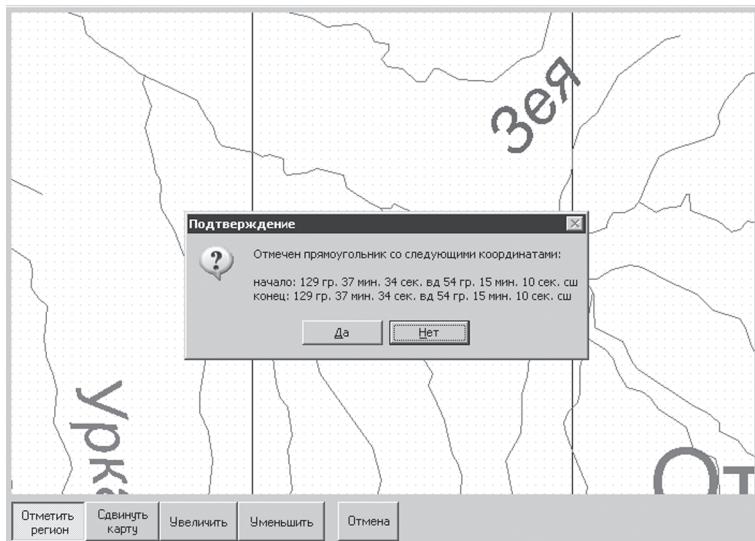


Рис. 7. Определение географических координат расположения геологического объекта.

ханизмы глобального поиска, позволяющие найти отчеты по названию геологического объекта или типу полезных ископаемых.

В АРМ “Оператор” имеются функции ввода информации с применением элементов ГИС. Они реализованы путем внедрения OCX компоненты MapX компании MapInfo в разработанный программный модуль. Основная рабочая область, на основе которой строится взаимодействие с пользователем – карта Амурской области, состоящая из нескольких слоев: “Границы”, “Административное деление”, “Населенные пункты”, “Реки”, “Дороги”, “Железные дороги”. Это “статическая” (недоступная непосредственному редактированию пользователем) картографическая составляющая программы. Пользователь может изменять масштаб, производить центрирование, манипулировать порядком расположения и способом отображения слоев карты. В противоположность статической составляющей, геологические объекты являются динамической сущностью – иными словами, выводятся на карте непосредственно в процессе отображения. Пользователь может выполнять произвольные операции с геологическими объектами – добавлять, удалять, изменять расположение, тип объекта, и др.

Структурированная информация о геологических объектах, зарегистрированных в системе, хранится в базе данных. При добавлении, например, геологического объекта пользователь выбирает тип объекта, задает его название, расположение (вводя координаты с клавиатуры, либо непосредственно мышью отмечая на карте заданную точку или регион), а также описание объекта. После сохранения объекта он отображается на специальном динамическом слое “Объекты” карты (рис. 7).

Рис. 8. Форма создания пользователя системы.

АРМ “Администратор” выполняет системные функции, основные среди них:

- создание и учет пользователей системы (рис. 8);
- контроль за работой компонент и пользователей системы;
- создание тематических каталогов;
- формирование справочников системы.

Как и при работе с любым модулем, для доступа к системе требуется наличие имени и пароля пользователя, обладающего в данном случае правами администратора.

АРМ “Пользователь” разработан с применением языка программирования PHP и обеспечивает удаленный доступ к каталогу фондовой информации



Рис. 9. Основное меню АРМ “Пользователь”.

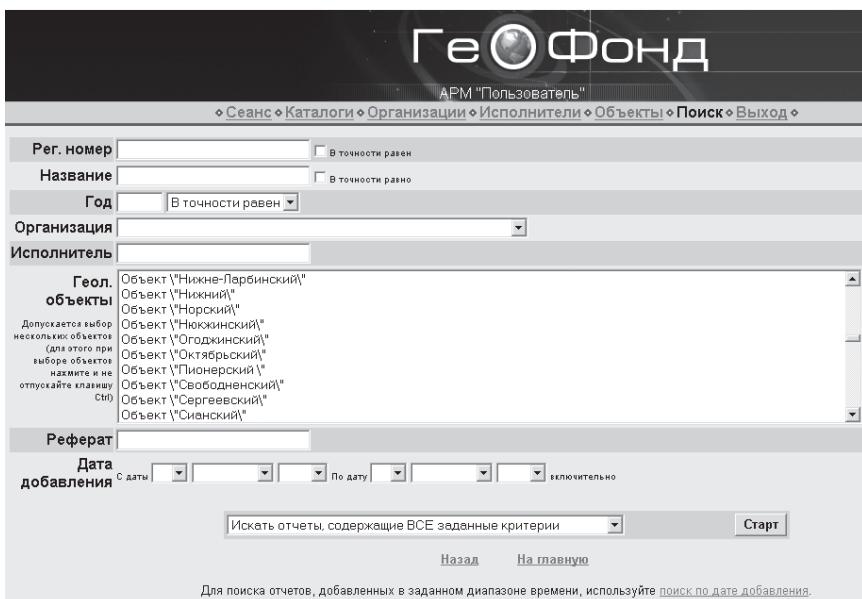


Рис. 10. Раздел “Поиск” АРМ “Пользователь”.

посредством Internet/Intranet сетей. Компонента размещается на Web-сервере, который обеспечивает интерпретацию кода PHP, с возможностью работы с ней через Web-браузер. Данный модуль является одним из наиболее важных с точки зрения решаемых задач системы, в частности, предоставления доступа к существующему каталогу материалов.

Основное окно программной компоненты (рис. 9) состоит из следующих разделов:

Сеанс. Блок содержит служебные данные по текущему сетевому соединению – имя пользователя (логин), адрес, с которого осуществлено соединение, реквизиты пользователя, дата действия разрешения на доступ, время последнего сеанса работы с системой.

Каталоги. В разделе представлена информация о тематических каталогах, существующих в системе. Система может работать со сложными иерархическими структурами каталогов, например, каталог “административный” состоит из территориальных образований региона – районов, которые, в свою очередь, могут подразделяться на подкаталоги – города.

Организации. Раздел содержит информацию по организациям – исполнителям геологических работ.

Исполнители. Раздел содержит информацию о сотрудниках – исполнителях работ. Данные представлены как в общем, так и алфавитном списках.

Поиск. Блок содержит элементы, необходимые для поиска информации (рис.10), такие как поиск по регистрационному номеру отчета, названию, году выполнения работ, организации, ответственному исполнителю и т.д. Возможно составление сложных многоатрибутных запросов.

Общая схема взаимодействия рассмотренных программных компонент представлена на рис. 11.

ОГРАНИЧЕНИЕ ДОСТУПА К ИНФОРМАЦИИ

Работа АРМ “Оператор” и АРМ “Администратор” направлена на создание и поддержку единого банка данных тематической информации, поэтому указанные компоненты можно считать служебными для рядовых пользователей системы. Их функционирование осуществляется в рамках ЛВС, недо-

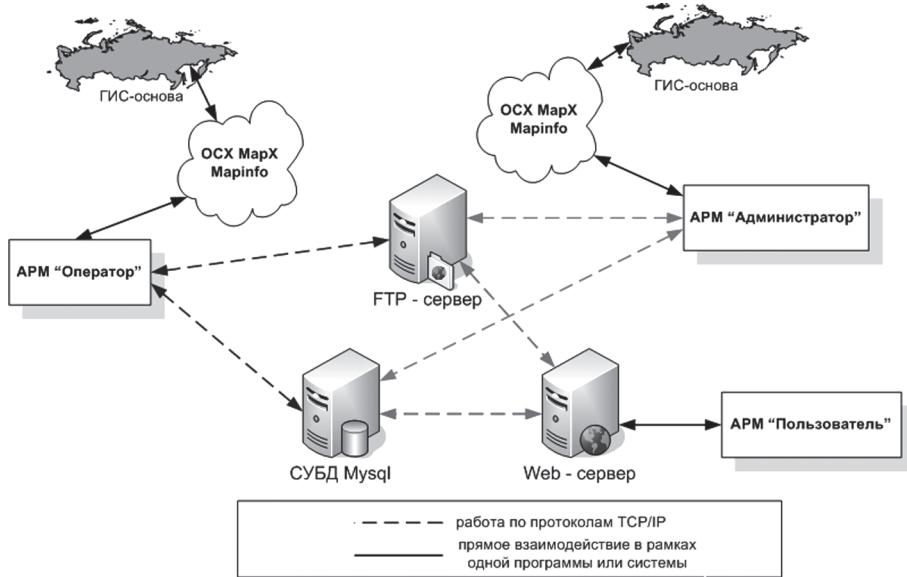


Рис. 11. Схема взаимодействия компонент информационной системы.

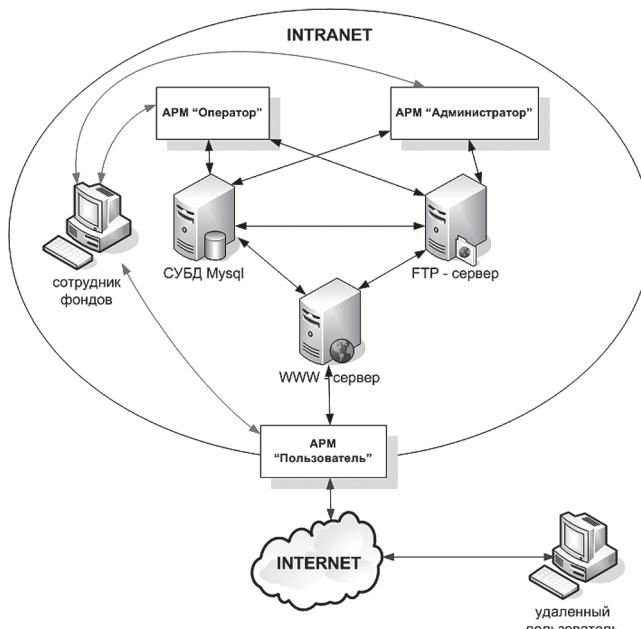


Рис. 12. Схема работы системы в рамках Internet/Intranet сетей.

ступной из внешних сетей. АРМ "Пользователь" — приложение, предназначенное для двойного доступа как внутренних, так и внешних пользователей, поэтому он настраивается и размещается в сетях таким образом, чтобы имелся соответствующий уровень доступа (рис. 12).

Для обеспечения безопасного доступа к каталогу информации применяется подход задания IP-адре-

са удаленного пользователя, его имени и пароля в системе. Указанные реквизиты формируют двойной подход к авторизации пользователя средствами серверов базы данных и Web.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная комплексная информационная система "Геофонд" является универсальным инструментом для создания и сопровождения тематических каталогов в области геологии. Система основана на использовании современных протоколов передачи информации TCP/IP и может быть внедрена в Intranet/Internet сетях. Применение таких технологий обеспечивает эффективный подход к предоставлению удаленного доступа к тематическим данным.

Интеграция элементов ГИС в компоненты системы обеспечивает новый уровень работы с информацией на этапах ее ввода и поиска.

Все разработанные программы прошли официальную регистрацию в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам (Роспатент) и имеют соответствующие свидетельства.

Работы по созданию системы проводились при поддержке ИГиП ДВО РАН, ФГУ "ТФИ по Амурской области" и гранта ДВО РАН 06-III-B-08-373.

ЛИТЕРАТУРА

- Сорокин А.А., Пименова О.А. Создание комплексной информационной системы для работы с фондовой геологической и природоресурсной информацией // Материалы

региональной научно-практической конференции “Проблемы экологии и рационального использования природных ресурсов в Дальневосточном регионе”. Благовещенск: БГПУ. 2004. С. 126–130.

2. Коннолли Т., Бэгг К., Страчан А. Базы данных. Проектирование, реализация и сопровождение. Теория и практика // Учеб. пособие. 2-е изд. / Пер. с англ. М.: Изд. дом “Вильямс”, 2000. С. 79.

Поступила в редакцию 9 марта 2006 г.

Рекомендована к печати А.П. Сорокиным

A.A. Sorokin

Complex information system of work with the “Geofond” fund geological materials

The paper presents information on the work conducted on design and development of complex information system of work with the “Geofond” fund geological materials. The developed program components make it possible to provide a new approach to processing, classification, storage and access to fund data using modern information technologies.

Key words: geology, fund materials, information system, database, access.

МОНИТОРИНГ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

УДК 519.25:551.326:551.14

**МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЙ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ОБЪЕКТОВ В
ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

A.Н. Четырбоцкий

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток

Рассмотрены методические подходы для решения задач выявления состояний объектов, которые заданы выборками многомерных наблюдений. Применение подходов иллюстрируется решением типичных задач. Полученные результаты и предлагаемые методики могут быть использованы для исследования реальных объектов в геологии, океанографии и других прикладных областях.

Ключевые слова: объект, наблюдения, параметрический портрет, выборка данных, многомерное шкалирование.

ВВЕДЕНИЕ

Для создания геоинформационных систем (ГИС) природных объектов следует провести определенный комплекс исследований. Ключевой этап таких исследований состоит в конструировании параметрического портрета или геоинформационной модели рассматриваемого объекта. Для этого надлежит произвести отбор ограниченного числа исходных показателей или их функций, на основании которых однозначным образом определяется состояние объекта. Понятно, что число таких состояний и топология распределения совокупности объектов в признаковом пространстве представляют собой важные сведения об их генезисе. Если объекты представлены многомерной выборкой распределений соответствующих показателей, то эффективное решение таких задач может быть найдено методами многомерного шкалирования [1, 3, 4]. Сущность этих методов состоит в следующем [6, 7]. Полагается, что отдельные объекты выборки соответствуют точкам исходного многомерного пространства (термины “наблюдение”, “объект” и точка многомерного пространства являются эквивалентными). На основании принятой в исследовании меры близости между парой точек рассчитывается матрица близости между отдельными объектами. Далее в пространстве существенно меньшей размерности выполняется поиск такого расположения образов этих точек, матрица бли-

зости между которыми как можно меньше отличается от матрицы близости между точками в исходном пространстве. В настоящем рассмотрении используется евклидова метрика. Если наблюдения выборки отражают пространственно-временные изменения объектов, то подобным образом выполняется мониторинг их состояний.

Актуальность решения указанных задач и формулировка предметной интерпретации полученных результатов обусловлена тем, что построение геоинформационной модели обычно выполняется на уровне эвристических представлений. Поэтому в некоторых реальных ситуациях имеют место случаи как отсутствия необходимых сведений, так и их избыточности.

В работе предлагаются примеры решения практических задач, которые достаточно часто имеют место при построении ГИС [9, 10]. Так, задача построения агрегированных показателей на основании выборочных распределений позволяет выявить структуру и, стало быть, латентный механизм изучаемого явления. Формулирование следующей задачи состоит в выявлении временных состояний комплексного объекта, в качестве которого выступает ледяной покров Японского моря. В настоящем случае объект представлен выборкой многолетних декадных состояний в отдельных, достаточно однородных по своим физико-химическим свойствам районах акватории моря. Целесообразность рассмотрения здесь этой задачи обусловлена общностью ее постановки и показательностью решения.

ОЦЕНКА ВРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЙ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ЯПОНСКОГО МОРЯ

Количественное представление морского ледяного покрова (ЛП) как объекта изучения обычно выполняется на основании усредненных за отдельные декады выборочных распределений сплоченности (отношение площади льда в районе к площади района), возрастного состава льдов (выраженные в баллах значения толщин покрова) и преобладающего размера отдельных льдин. Совокупность этих распределений характеризует набор состояний рассматриваемой динамической системы, где термин “система” непосредственно соответствует его классическому определению “...целое, составленное из частей; совокупность элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, которая образует определенную целостность, единство” [5]. Иными словами – это иерархически упорядоченная и целенаправленно функционирующая совокупность большого числа взаимодействующих элементов. В качестве последних выступает ЛП отдельных районов акватории моря, а набор состояний системы или объекта настоящего рассмотрения определяется выборкой таких распределений. Здесь объект представлен выборкой многолетних декадных распределений площадей и толщин льда за период 1961–1989 гг. Каждое распределение характеризует ЛП отдельного района моря, где выделение районов было выполнено исходя из однородности, в определенном смысле, его участков. Материал для исследований предоставлен проф. В.В. Плотниковым (Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН).

Максимальная продолжительность эволюционного цикла объекта составляет 22 декады (начальной является 31-я декада года, а конечной – 16-я декада) [8]. Поскольку в исходных выборках значения характеристик ЛП приведены в баллах соответствующих шкал измерений, то для выполнения исследований была выполнена их оцифровка [11]. Принимаются обозначения: S_{dry} – сплоченность, H_{dry} – толщина и F_{dry} – преобладающий размер отдельных льдин покрова в d -й декаде ($d = 1 \div 22$) r -го района ($r = 1 \div 166$) в y -м году ($y = 1961 \div 1989$). Полагается также, что число районов ежегодного присутствия льда равно $N_r = 166$ (114 выделенных в [2] районов плюс 52 района, где присутствует припай). На рис. 1 представлена карта расположения и нумерация районов.

Состояние объекта определяется совокупностью выборок распределений $\{S_{dry}\}$, $\{H_{dry}\}$ и $\{F_{dry}\}$ для каждого района акватории моря. Вследствие высокой функциональной зависимости между S и F (коэффициент корреляции между наборами $\{S_{dry}\}$ и $\ln\{F_{dry}\}$ равен 0.946), состояние покрова определяется распределением $\{S_{dry}\}$ и распределением $\{H_{dry}\}$. Понятно, что из этих распределений можно сформировать распределение $\{(S \cdot H)_{dry}\}$, которое имеет физический смысл распределений объемов льда. Для удобства диапазон изменения этих чисел приведен к отрезку [0,1]. Оценка декадных состояний объекта выполняется на основании выборки 22 наблюдений (22 декады), каждое из которых насчитывает $N_d \cdot N_r = 4814$ элементов ($N_d = 29$ лет наблюдений и $N_r = 166$ районов). На рис. 2 приведен результат иерархической классификации и решение соответствующей задачи многомерного шкалиро-

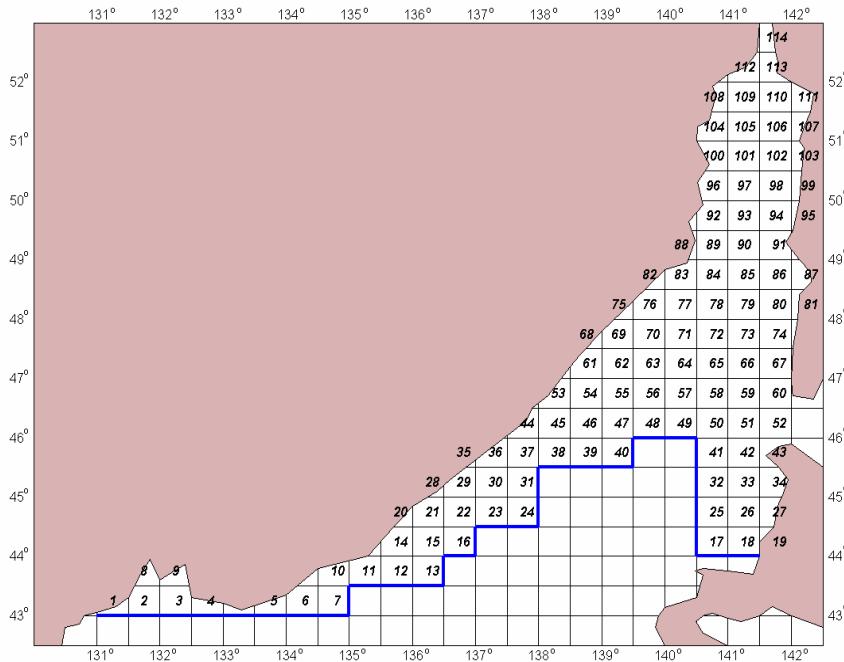
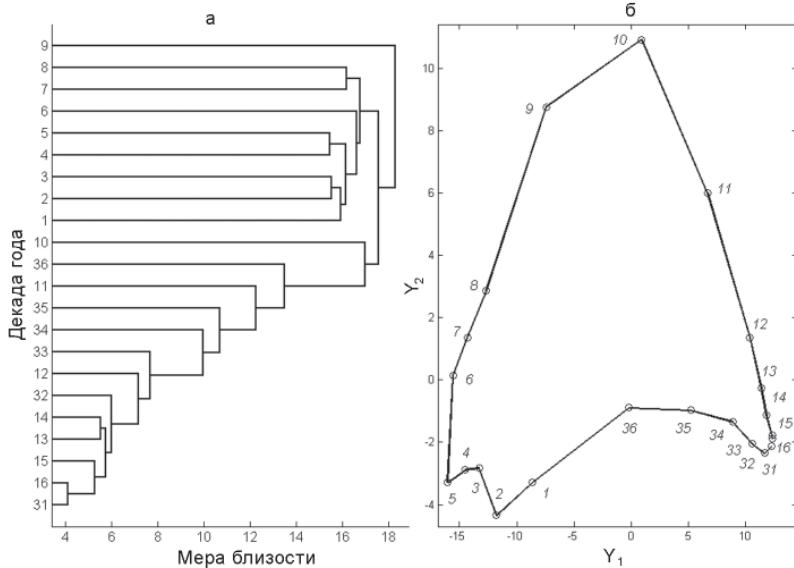
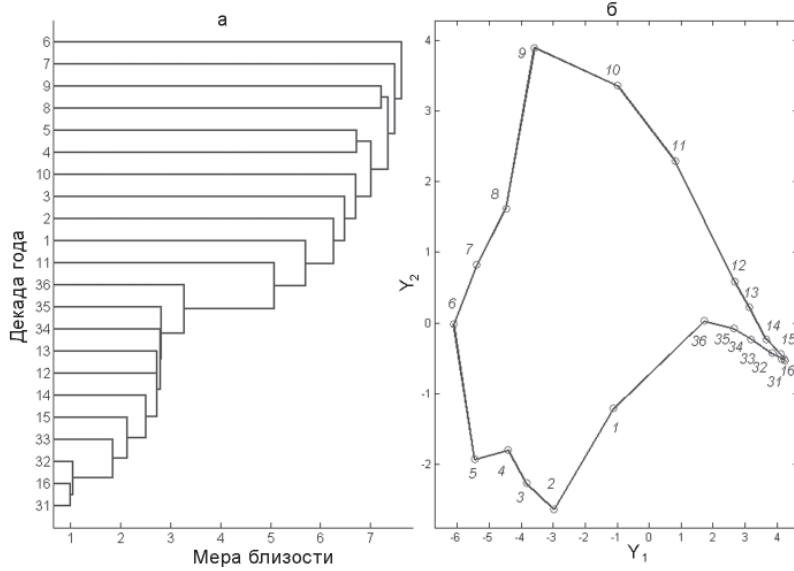


Рис. 1. Карта расположения и нумерация районов Японского моря [2], где отмечается присутствие льда (толстая линия указывает границу максимального распространения льда).



вания (пространством образов исходных точек является плоскость $Y_1 Y_2$). В обоих случаях в качестве меры близости выступает евклидова метрика.

Конфигураций ветвей бинарного дерева на рис. 2а указывает на неразличимость распределений осенних и весенних этапов. Действительно, согласно результатам классификации, наблюдения этих декад (с 31 по 36 и с 11 по 16 декады) являются ветвями одного поддерева. Наблюдения зимних декад (с 1 по 10 декаду) образуют отдельные ветви. Окончания осеннего (36 декада) и зимнего (11 декада) этапов являются пограничными. Иерархические бинарные деревья характеризуют основную тенденцию распределения выборочных точек в пространстве $N_d \cdot N_r$ размерности. В этом смысле нумерация конечных ветвей дерева не позволяет оценить реальное пространственное распо-

ложение наблюдений, которые принадлежат его другим бинарным ветвям. Характер расположения образов точек на рис. 2б в большей степени отражает распределение наблюдений. Однако и в этом случае наблюдения осеннего и весеннего этапов не отличаются между собой. Необходимо отметить, что так называемый кофенетический коэффициент корреляции [1] (коэффициент корреляции между матрицами близости для случаев а) и б)) равен 0.930. Согласно этим результатам, в терминах объемов льда эволюция ЛП представляет собой обратимый термодинамический процесс: конечный весенний этап таяния покрова является обратным начальному осеннему этапу его формирования [11]. В этой ситуации состояния объекта для осенних и весенних декад не различаются между собой. Представленные на рис. 3 результаты аналогич-

Рис. 2. Оценка декадных состояний ЛП Японского моря (выборку составляют наборы $\{(S \cdot H)_{dry}\}$).

а – результаты иерархической классификации; б – решение задачи многомерного шкалирования, где цифры указывают соответствующую декаду года.

Рис. 3. Оценка декадных состояний ЛП Японского моря (выборку составляют наблюдения $\{S_{dry}, H_{dry}\}$).

а – результаты иерархической классификации; б – решение задачи многомерного шкалирования, где цифры указывают соответствующую декаду года.

ных построений для составной выборки признаков $\{S_{dry}, H_{dry}\}$ все же показывают их отличия.

В этом случае вектор наблюдений насчитывает $N_d \cdot N_r \cdot 2 = 9628$ элементов, а кофенетический коэффициент корреляции равен 0.758. В терминах площадей и толщин декадные состояния объекта отличаются между собой. Указанное положение допускает простую интерпретацию. Отличие состояний обусловлено следующим: при одном и том же объеме у льдин осеннего этапа формирования большая площадь и малая толщина, а у льдин весеннего этапа таяния малая площадь (вследствие быстрого таяния тонкого льда) и повышенная толщина. Таким образом, последующее математическое моделирование эволюции покрова следует выполнять в терминах площадей и толщин покрова.

ТИПИЗАЦИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА РАЙОНОВ АКВАТОРИИ ЯПОНСКОГО МОРЯ

Начальный этап построения модели (логической, физической, математической и т.д.) системы произвольной природы состоит в упорядочивании и систематизации реальных фактов. Если система представлена выборкой наблюдений, то для выявления фактов и поиска латентных (скрытых, непосредственно не наблюдавшихся) показателей, в пространстве которых они проявляются, в большинстве случаев следует выполнить типизацию (классификацию) исходных наблюдений. В настоящем случае число и состав кластеров является известным [2]: как правило, ледяной покров вследствие ледовых условий в районах акватории моря территориально разделяют на три части: (Татарский пролив, район вдоль побережья Приморья от мыса Поворотного до мыса Белкина и залив Петра Великого). Вместе с тем, открытым является вопрос о действительном числе таких кластеров, а также характере проявления территориального разделения в пространстве метрических параметров выборочных состояний покрова (далее при упоминании понятия "состояние" следует иметь в виду его выборочность).

При решении задач необходимо учитывать территориальную неоднородность покрова льда, несовпадение дат первичного формирования ЛП в отдельных районах и продолжительностей периодов их эволюции. Данная ситуация обуславливает тот факт, что понятие "ледяного покрова усредненного района" является в большей мере фиктивным понятием исследуемой системы (реальными характеристиками системы являются средние за многолетний период значения параметров в отдельных декадах каждого района). Поэтому для решения задач целесообразным представляется использование методов, где от-

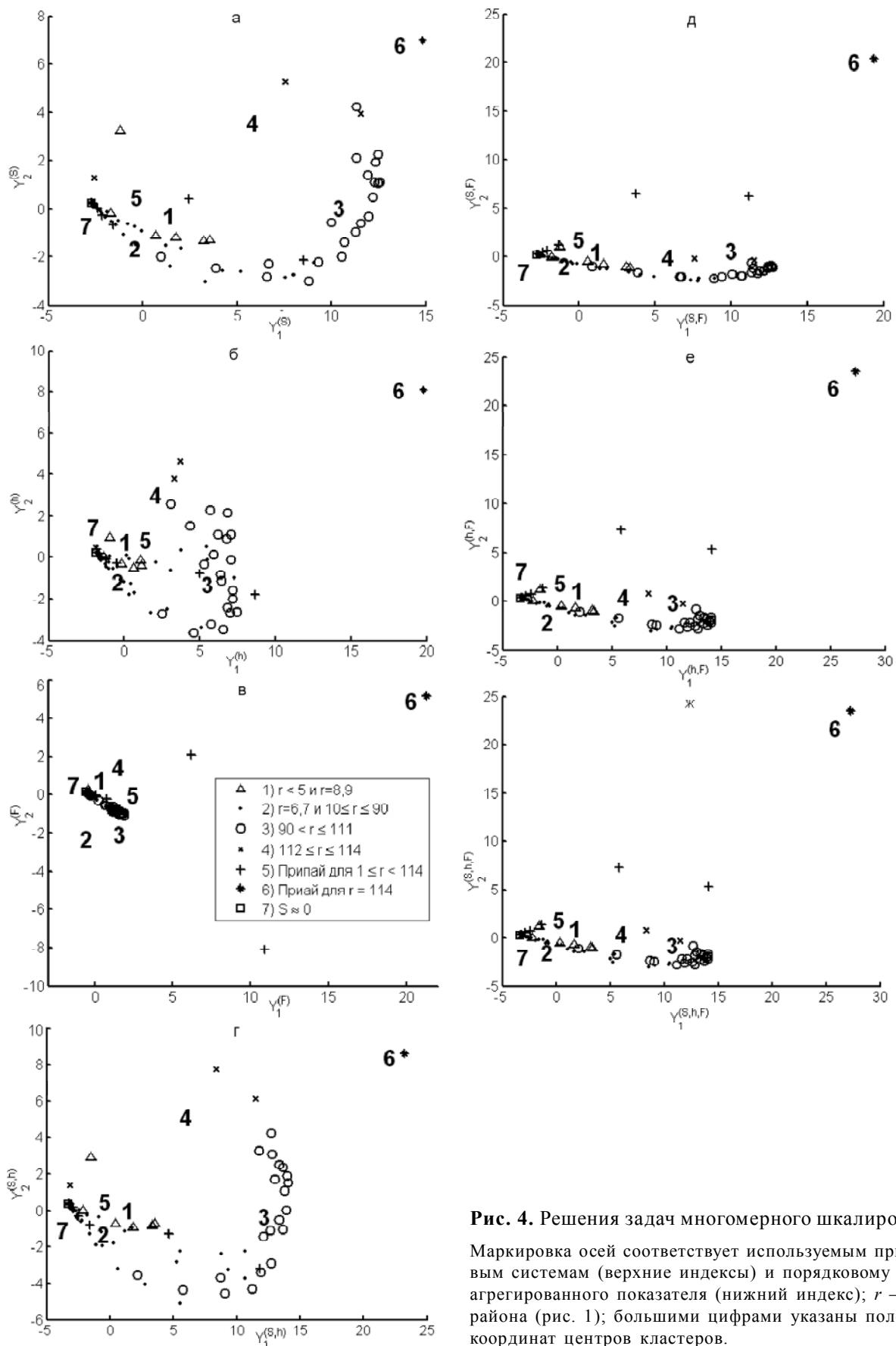
существует статистическая парадигма усреднения характеристик выборки. К числу таких методов относятся методы многомерного шкалирования. Решение задач многомерного шкалирования позволяет перейти от формы исходных данных типа «объект-объект» к форме типа “объект-свойство” [1]. В этом случае на основании объектов выборки автоматически формируется выборка их образов существенно меньшего числа агрегированных показателей, в пространстве которых легко выполнить дифференциацию объектов исходной выборки.

Оценивание адекватности (валидация) конфигурации образов объектов в пространстве агрегированных показателей конфигурации объектов в исходном пространстве выполняется на основании так называемого кофенетического коэффициента корреляции

$$c = \sum_{i < j} (R_{ij} - \bar{R}) \cdot (Z_{ij} - \bar{Z}) / [\sum_{i < j} R_{ij} - \bar{R}]^2 \sum_{i < j} (Z_{ij} - \bar{Z})^2]^{1/2}, \quad (1)$$

где R_{ij} , Z_{ij} – значения мер близости между i и j объектами в исходном пространстве и пространстве их образов, где $i = 1 \div K-1$ и $j = i + 1 \div K$; K – общее число объектов; \bar{R} , \bar{Z} – соответствующие средние. Понятно, что близость c к единице указывает на соответствие между указанными конфигурациями. В приведенном ниже исследовании посредством c_1 , c_2 и c_3 обозначены рассчитанные по (1) коэффициенты для первого агрегированного показателя, первых двух агрегированных показателей и первых трех агрегированных показателей. Верхними индексами будем обозначать соответствующую признаковую систему. Для удобства интерпретации результатов изменение F приведено к отрезку [0,1].

В данном случае $K = 166$ объектов: 114 районов моря, из которых в 52 прибрежных районах отмечаются льды открытого моря и отдельно льды припая. Признаками объектов являются среднедекадные значения сплоченности (22 признака), толщины покрова (22 признака) и преобладающего размера льдин (22 признака) в отдельных 29 годах наблюдений. Поскольку анализу подлежат проявления особенностей территориального расположения отдельных районов, то признаковая система рассматриваемых объектов может насчитывать от $22 \cdot 29 = 638$ до $3 \cdot 22 \cdot 29 = 1914$ элементов. На рис. 4 представлены решения задач многомерного шкалирования, где маркировка осей указывает на соответствующий признаковый набор (верхние индексы) и порядковый номер агрегированного показателя (нижний индекс); большими цифрами указаны положения центров предварительно выделенных нами групп точек. Выделение групп было вы-

**Рис. 4.** Решения задач многомерного шкалирования.

Маркировка осей соответствует используемым признаком системам (верхние индексы) и порядковому номеру агрегированного показателя (нижний индекс); r – номер района (рис. 1); большими цифрами указаны положения координат центров кластеров.

полнено таким образом, что ледяные покровы отдельных районов со схожими ледовыми режимами составляли одну группу образований льда (каждый район акватории определяется своим номером на рис. 1). Согласно этому требованию, было выделено 7 групп районов: ЛП открытой части районов с 1 по 4, 8 и 9, которые составляют залив Петра Великого (1); ЛП открытой части районов с номерами 6, 7 и $9 < r \leq 90$ (2); ЛП открытой части районов $90 < r < 112$ (3); ЛП открытой части районов Татарского пролива $112 \leq r \leq 114$ (4); припай районов с 1 по 113 (5); припай 114-го района (6); ЛП тех районов, где за период наблюдений отмечаются незначительные и нерегулярные появления льдов.

Если учитывается сплоченность S ледяных покровов выделенных участков моря (размерность пространства $22 \cdot 29 = 638$), то конфигурация образов наблюдений на плоскости первых двух агрегированных показателей (рис. 4а) и анализ отмеченных выше корреляций показывает следующее. Проявляется явное отличие припая в районе пролива Невельского (114 район) от образований льда в других районах акватории моря, что обусловлено узостью пролива (расстояние между берегами чуть более 7 км). Остальные выборочные точки распределены в узкой области данного признакового пространства, где отсутствуют изолированные сгущения точек. Размерность этой области существенно меньше размерности признакового пространства. Поэтому для представления этого распределения достаточно ограничиться только небольшим числом агрегированных показателей. В данном случае достаточно ограничиться двумя показателями. Действительно, выборочная оценка кофенетического коэффициента корреляции $c_1^{(S)}$ между матрицами близости наблюдений в исходном пространстве и построенной только на основании первого агрегированного показателя $Y_1^{(S)}$ равна $c_1^{(S)} = 0.961$, а $c_2^{(S)} = 0.975$ и $c_3^{(S)} = 0.981$. Согласно распределению образов выборочных точек, имеет место плавный переход от ЛП залив Петра Великого и припая в большей части районов акватории ко льдам районов Татарского пролива и припая пролива Невельского. Отсутствие изолированных сгущений в конфигурации указывает на тот факт, что состояния ледяного покрова в отдельных районах на акватории моря следует рассматривать с позиций существования единого механизма их генерации.

Распределение выборочных точек на рис. 4б (учитываются толщины льда h , размерность пространства $22 \cdot 29 = 638$) в большей степени соответствуют относительно равномерному заполнению шарообразной области данного пространства. Исключение составляют толщина припая 114-го района, глубина которого

не превышает 10 м. Следовательно, распределение толщин не зависит от принадлежности образований льда ко льдам открытого моря или льдам припая. Для представления этого заполнения можно ограничиться двумя агрегированными показателями: $c_1^{(h)} = 0.925$, $c_2^{(h)} = 0.946$ и $c_3^{(h)} = 0.957$. Также как и в предыдущем случае, данная ситуация указывает на единый механизм генерации состояний ледяного покрова в отдельных районах моря.

Конфигурация образов выборочных точек на рис. 4в (учитываются преобладающие размеры льдин F ЛП участков моря, размерность пространства $22 \cdot 29 = 638$) так же, как и в случае на рис. 4а, находится в узкой области данного признакового пространства. Факт явного отличия F для группы с номером 6 обусловлен узостью 114-го района. Здесь также отсутствуют изолированные сгущения точек. Размерность этой области существенно меньше размерности признакового пространства. Для представления конфигурации выборочных точек можно ограничиться двумя агрегированными показателями: $c_1^{(F)} = 0.970$, $c_2^{(F)} = 0.973$ и $c_3^{(F)} = 0.987$.

Конфигурация образов выборочных точек на рис. 4г (учитываются сплоченности S и толщины покрова h , размерность пространства $2 \cdot 22 \cdot 29 = 1276$) соответствует конфигурации точек на рис. 4а. Поэтому в пространстве сплоченности и толщин состояния ледяного покрова в отдельных районах акватории моря следует рассматривать с позиций единого механизма их генерации. Для представления конфигурации выборочных точек можно ограничиться двумя агрегированными показателями: $c_1^{(S,h)} = 0.944$, $c_2^{(S,h)} = 0.962$ и $c_3^{(S,h)} = 0.969$.

Конфигурация образов выборочных точек на рис. 4д (учитываются сплоченности S и преобладающие размеры льдин F ЛП участков моря, размерность пространства $2 \cdot 22 \cdot 29 = 1276$) подобна конфигурации на рис. 4в. Для представления конфигурации выборочных точек можно ограничиться двумя агрегированными показателями: $c_1^{(S,F)} = 0.945$, $c_2^{(S,F)} = 0.967$ и $c_3^{(S,F)} = 0.979$.

Конфигурация образов выборочных точек на рис. 4е (учитываются толщины покрова h и преобладающие толщины льдин F ЛП участков моря, размерность пространства $2 \cdot 22 \cdot 29 = 1276$) соответствует конфигурации точек на рис. 4б. Поэтому в пространстве толщин покрова и преобладающего размера льдин распределение толщин не зависит от принадлежности образований льда ко льдам открытого моря или льдам припая. Для представления конфигурации выборочных точек можно ограничиться двумя агрегированными показателями: $c_1^{(h,F)} = 0.936$, $c_2^{(h,F)} = 0.945$ и $c_3^{(h,F)} = 0.963$.

Конфигурация образов выборочных точек на рис. 4ж (учитываются сплоченности S , толщины покрова h и преобладающие толщины льдин F ЛП участков моря, размерность пространства $3 \cdot 22 \cdot 29 = 1914$) соответствует конфигурации точек на рис. 4а. Поэтому в пространстве сплоченности, толщины покрова и преобладающие размеры льдин состояния ледяного покрова моря в отдельных районах акватории следует рассматривать с позиций единого механизма их генерации. Для представления конфигурации выборочных точек можно ограничиться двумя агрегированными показателями: $c_1^{(S,h,F)} = 0.940$, $c_2^{(S,h,F)} = 0.953$ и $c_3^{(S,h,F)} = 0.970$.

На основании выявленных фактов можно сделать следующий вывод: в каждом рассмотренном признаковом пространстве конфигурация выборочных точек находится в узкой области, где отсутствуют изолированные сгущения точек. Размерность этой области существенно меньше размерности признакового пространства. Исключение составляет образование льда припая пролива Невельского, что обусловлено его узостью и мелководностью. В различных конфигурациях отмечается устойчивое сохранение порядка следования выборочных точек. Данные обстоятельства указывают на единый механизм генерации состояний ледяного покрова в отдельных районах моря.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для иллюстрации рассмотренного здесь подхода приведены два примера. Для обоих случаев логическая цепочка рассуждений одинакова: на основании статистически представительной выборки следует выполнить оценку числа сгущений и конфигурации точек (наблюдений) в многомерном пространстве признаков. Назначение отдельных вычислительных процедур звеньев цепочки состоит в тестировании статистической значимости и предметной интер-

претации полученных результатов. Чтобы полученные результаты имели статистическую значимость, исходная выборка должна обладать значительным объемом и отражать основные особенности рассматриваемого явления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дэйвисон М. Многомерное шкалирование: Методы наглядного представления данных, М.: Финансы и статистика, 1988. 254 с.
2. Плотников В.В. Изменчивость ледовых условий Дальневосточных морей России и их прогноз. Владивосток: Дальнаука, 2002, 172 с.
3. Стронгин Р.Г. Численные методы в многоэкстремальных задачах (информационно-статистические алгоритмы), М.: Наука, 1978, 240 с.
4. Терехина А.Ю. Методы многомерного шкалирования визуализация данных(обзор) // Автоматика и телемеханика, 1973. № 7. С. 80–94.
5. Философский энциклопедический словарь / Гл. ред. Ильиничев Л.Ф., Федосеев П.Н., Ковалев С.М., Панов В.Г. М.: Сов. Энциклопедия, 1983. 840 с.
6. Четырбоцкий А.Н. Методы и алгоритмы решения задач снижения размерности пространства описания. Владивосток, 1991, 95 с.
7. Четырбоцкий А.Н. Пакет прикладных программ для решения задач снижения размерности пространства описания // Управляющие системы и машины, Киев: Наук. думка, 1991. Т. 1(11). С. 103–106.
8. Четырбоцкий А.Н. Формирование и разрушение ледяного покрова замерзающих морей // Криосфера Земли. 2005. Т. 9, № 3. С. 45–53.
9. Четырбоцкий А.Н. Прогноз ледового режима на акватории Японского моря (математическая модель) // Информационные технологии. 2005. № 8. С. 9–14.
10. Четырбоцкий А.Н. Технология построения геоинформационных систем для ледяного покрова замерзающих морей (на примере ГИС “Ледяной покров Японского моря”) // Информационные технологии. 2005. № 11. С. 17–23.
11. Четырбоцкий А.Н. Статистический анализ параметров состояний ледяного покрова Японского моря и математическое моделирование его эволюции // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 3. С. 289–299.

Поступила в редакцию 19 февраля 2006 г.

Рекомендована к печати А.И. Ханчуком

A.N. Chetyrbotsky

Monitoring of conditions of multicomponent objects in geoinformation systems

Approaches for the solution of problems of revealing conditions of objects are considered which are specified by samples of multivariate observations. Application of the approaches is illustrated by the solution of typical problems. The results obtained and the suggested techniques can be used for investigation of real objects in geology, oceanography, and in other applied fields.

Key words: object, observations, parametrical portrait, data sampling, multivariate scaling.

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ЗОНЫ ВЛИЯНИЯ БУРЕЙСКОЙ ГЭС

В.И. Синюков, В.А. Глухов, Е.П. Маева, О.В. Рыбас

Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, г. Хабаровск

Описывается применение ГИС-технологий по геоинформационному обеспечению и сопровождению работ по социально-экологическому мониторингу зоны влияния Бурейской ГЭС. Была создана система цифровых топографических и специальных тематических карт трех масштабных уровней. Они использовались для картографического отображения, анализа и интегрирования данных по основным разделам мониторинга: уровень заполнения водохранилища, водная среда, животный мир, ихтиология, почвы, растительность, метеонаблюдения.

Ключевые слова: геоинформационные технологии, картографирование, социально-экологический мониторинг, Бурейская ГЭС.

Социально-экологический мониторинг зоны влияния Бурейской ГЭС, по определению, предполагает систему регулярных длительных наблюдений в пространстве и во времени за состоянием и изменением окружающей природной среды под воздействием всего комплекса антропогенных факторов, связанных со строительством и эксплуатацией Бурейского гидроузла. В мониторинге задействованы специалисты самых различных научных дисциплин, изучающие водную среду, почвенный покров, животный мир, растительность, ихтиологию, метеорологию, санитарию и гигиену, социальную среду. Все они имеют свои предметы и методы исследования. Очевидно, что в ходе мониторинга уже на начальном этапе – при сборе информации – возникает проблема организации и хранения разнородных данных наблюдений. Особенно сложные проблемы возникают на этапах анализа и синтеза разнородных материалов, когда начинают обнаруживаться не известные ранее многоуровневые связи между столь сложными и разнородными объектами, когда наступает время выдавать прогнозы и рекомендации.

Собрать, сохранить, обработать и обобщить такое огромное количество разнородного материала возможно только с использованием современных геоинформационных технологий, и прежде всего ГИС. Геоинформационные системы (ГИС) – это совокупность компьютерных средств и специ-

альных программ, позволяющая создавать и интегрировать в единый комплекс различные базы данных и модели географического пространства (обычно поверхность Земли, представляющую в виде различных карт и планов).

Но самое замечательное свойство ГИС заключается в том, что они являются высокоэффективным средством анализа и синтеза разнородных, казалось бы, на первый взгляд, не связанных между собой данных о природных объектах для обнаружения новых свойств, связей и взаимоотношений между ними. Поэтому ГИС в настоящее время становится незаменимым средством при экологических исследованиях, проведении различных типов мониторинга окружающей среды.

Еще одним, крайне важным аспектом при проведении мониторинга окружающей среды является использование материалов дистанционного зондирования. В данном случае речь идет об использовании спектрональных космических снимков серии LANDSAT, ASTER и совершенно новых материалов локационной съемки Земли Shuttle radar topographic mission (SRTM) – радарной топографической съемки большей части территории земного шара с помощью метода, называемого радарной интерферометрией (radar interferometry).

Совершенно очевидно, что анализ космических снимков, сделанных через последовательные интервалы времени, по мере заполнения водохранилища,

позволяет отследить с достаточно высокой точностью многие аспекты воздействия Бурейского гидроузла на окружающую среду, позволит существенно улучшить качество мониторинга.

В Лаборатории геоинформационных технологий Института тектоники и геофизики (ИТИГ ДВО РАН) имеется определенный опыт применения космических снимков при проведении различных видов геологических исследований, построении карт растительности, лесных пожаров, антропогенного воздействия человека на природу, при изучении структуры водных объектов.

В программе работ по социально-экологическому мониторингу зоны влияния Бурейской ГЭС Лаборатории геоинформационных технологий были поставлены задачи по геоинформационному обеспечению и сопровождению проводимых исследований.

На самых первых этапах решения этих задач нужно было определиться с общей концепцией информационной системы поддержки мониторинга, а также с основными картографическими масштабами, которые наиболее полно и эффективно отражали бы все изменения окружающей среды. Была принята концепция создания системы цифровых топографических и специальных тематических карт трех масштабных уровней:

1. Мелкомасштабный (обзорный) уровень. Территориально – весь бассейн р. Бурея (по линии водораздела). Исходный масштаб используемой топографической основы – 1: 1 000 000. Исходный масштаб специальных тематических карт – 1: 500 000 – 1: 1 000 000. Основные задачи – оценка состояния природной среды и влияния на нее природно-техногенных факторов на региональном уровне. Включает в себя комплект цифровых мелкомасштабных тематических карт экологического содержания.

2. Среднемасштабный (основной рабочий) уровень. Территориально ограничен зоной влияния Бурейского водохранилища при максимальном уровне его заполнения (256 м) и расположением участков (пунктов, постов) наблюдений за состоянием природной среды. Контуры зоны влияния гидроузла также определен и обоснован Ю.Ф. Сидоровым в отчете по мониторингу на территории Амурской области [2]. Исходный масштаб используемой цифровой топографической основы – 1: 200 000. Масштаб создаваемых цифровых тематических карт – 1: 100 000 – 1: 200 000 (до 1: 50 000). Включает в себя цифровую топографическую основу и данные дистанционного зондирования территории в разновременном режиме, а также карты фактического размещения пунктов

мониторинга по разделам. Основные задачи – определение и вынесение на карту конкретных пунктов наблюдений за состоянием природной среды и обеспечение их необходимой базовой картографической информацией, отражение на картах результатов наблюдений в экосистемах территории при заполнении водохранилища, а также комплексный анализ различных данных по основным разделам мониторинга.

3. Крупномасштабный (детальный) уровень. Отражает посты, площадки, участки, разрезы непосредственных наблюдений за состоянием природной среды. Масштаб цифровых карт 1:5 000 – 1:25 000. Включает в себя все данные, полученные на пунктах наблюдений по всем разделам мониторинга. Основные задачи – обеспечение пользователям доступа к любой информации (в том числе непосредственно с карты), комплексный анализ данных по пунктам наблюдений, оформление результатов анализа в необходимом виде (графики, диаграммы, тематические карты и т.п.). Данный раздел также будет включать в себя полнофункциональную компьютерную базу данных фактографической информации по всем разделам и пунктам мониторинга, макет которой разработан специалистами ОАО “ЛенГидроПроект” [3]

Для каждого уровня работ создавались свои, базовые топоосновы. Наиболее трудоемкой явилось создание топоосновы масштаба 1: 200 000. В основу ее создания была положена “сканерная” технология, когда исходные карты сканировались на широкоформатном сканере с большим разрешением, убирались искажения, проводилась привязка к нужной системе координат и векторизация непосредственно в MAPINFO. Всего было сделано 14 стандартных номенклатурных планшетов.

Следующей задачей был расчет площадей затопления прилегающих территорий по пяти уровням заполнения водохранилища: 206 м, 218 м, 225 м, 240 м, 256 м – с формированием соответствующих полигональных картографических покрытий. Часть уровней была рассчитана обычным ручным методом, а часть рассчитывалась с использованием данных (SRTM) и их обработкой в программе Vertical mapper v.3. Полученные результаты превзошли самые смелые ожидания. Программа показала превосходные результаты как по точности расчетов, так и по скорости их выполнения. На основе этих расчетов оценивались площади природных объектов, подлежащих затоплению.

Особенно важной и интересной работой было проведение расчетов видового и количественного состава лесных угодий, попадающих в зону затоп-

ления Бурейского водохранилища. Исходными для нее являлись схемы лесных выделов Тырминского и Ургальского лесхозов (6 склеек карт-схем лесоустройства масштаба 1: 25 000) с данными по видам древесной и кустарниковой растительности и запасам товарного леса. Полученные результаты были переданы непосредственно руководству Бурейской ГЭС.

Интересным и, наверное, знаменательным событием явилось то, что техническим заданием было предусмотрено проведение расчетов площадей зон затопления и проектируемой Нижне-Бурейской ГЭС по 2 уровням заполнения. Эти расчеты также были успешно выполнены и представлены в отчете.

Если на первом этапе организации ГИС социально-экологического мониторинга зоны влияния Бурейской ГЭС приоритетными являлись задачи создания единой базовой топоосновы, то на втором этапе на первый план выдвигается организация и формирование банка данных фактического материала, полученного исполнителями договора в ходе проводимых работ.

В 2003 году, в рамках первого этапа работ по социально-экологическому мониторингу, ФГУГГП “Хабаровскгеология” был составлен ряд цифровых карт экологического содержания на весь бассейн р. Буреи масштаба 1:500 000, в формате и под управлением ГИС ArcView. При этом, исходной топографической основой, служила цифровая векторная карта масштаба 1:1 000 000 [4].

В 2004 году проводились работы по переводу всех цифровых картографических материалов под управление единой геоинформационной системы MapInfo, которая принята базовой для программы мониторинга. Было конвертировано и переоформлено пять комплектов карт: Геологическая карта, Карта природных геохимических и радиоактивных аномалий, Карта ландшафтов и природно-техногенных комплексов, Карта интенсивности проявления экзогенных геологических процессов, Карта оценки экологического состояния природной среды, созданные ФГУГГП “Хабаровскгеология” [4] По своей сути эти карты явились началом создания банка данных мониторинга Бурейской ГЭС.

В течение 2004 г. проводилась организация и формирование банка данных картографического и фактического материала по основным разделам мониторинга.

Водная среда - вынесены на карту пункты наблюдений, с полученными на них данными: 1) изучение видов и состава бентоса (пресноводных беспозвоночных) в горных водотоках бассейна р. Буреи;

2) альгологический анализ водотоков бассейна р. Бурея (замеры количества и состава водорослей пери-фитона); 3) изучение количества и состава фитопланктона по Бурейскому водохранилищу; 4) микробиологический анализ зоны Бурейского водохранилища и горных водотоков бассейна р.Буреи.

Животный мир - вынесены на сводную карту контрольные площадки с результатами наблюдений за животным миром: 1) зоонаблюдения – площадки зоологических наблюдений (Тырма, Стрелка, Нижний Чимчан, Мотовая-Людоед, Теплый); 2) территория заказника “Дубликанский”; 3) “звериные переходы” – основные звериные переходы различных типов в зоне водохранилища; 4) “млекопитающие” – зоны сезонных концентраций, а также возможной гибели различных видов млекопитающих; 5) “скопления рыб” – зоны возможных концентраций различных видов рыб; 6) “редкие виды” – места, где были встречены различные виды редких животных.

Метеонаблюдения. На сводную карту нанесено 9 метеостанций, входящих в зону влияния Бурейского водохранилища, по которым имеются данные многолетних метеонаблюдений (Архара, Малиновка, Ниман, Пайкан, Сектагли, Сутур, Усть-Умальта, Чегдомын, Чекунда).

Ихиология. Вынесены на сводную карту контрольные участки с результатами облова набором ставных сетей по р. Бурее на интервале устье р. Бурея – пос. Талакан

Почвы. Вынесены на сводную карту реперные участки, с результатами наблюдений за состоянием почвенного покрова, который будет испытывать влияние Бурейского водохранилища (рис. 1).

Растительность. На сводную карту вынесены точки сбора материала и описания растительности в нижнем бьефе Бурейской ГЭС и профили описания растительности, заложенные сотрудниками Хинганско-го заповедника.

Все материалы, занесенные в банк данных, были получены непосредственно от исполнителей разделов и из промежуточного отчета по мониторингу за 2003 г. [1]

За время работ был сформирован банк данных по дистанционному зондированию зоны Бурейской ГЭС. В дополнение к имеющимся космическим снимкам в американской компании U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey было приобретено еще два спектрональных космических снимка серии LANDSAT. На одном из них отражен уровень заполнения водохранилища по состоянию на 27 июля 2003 г. (рис. 2). В настоящее время космические снимки подготовлены для работы практически

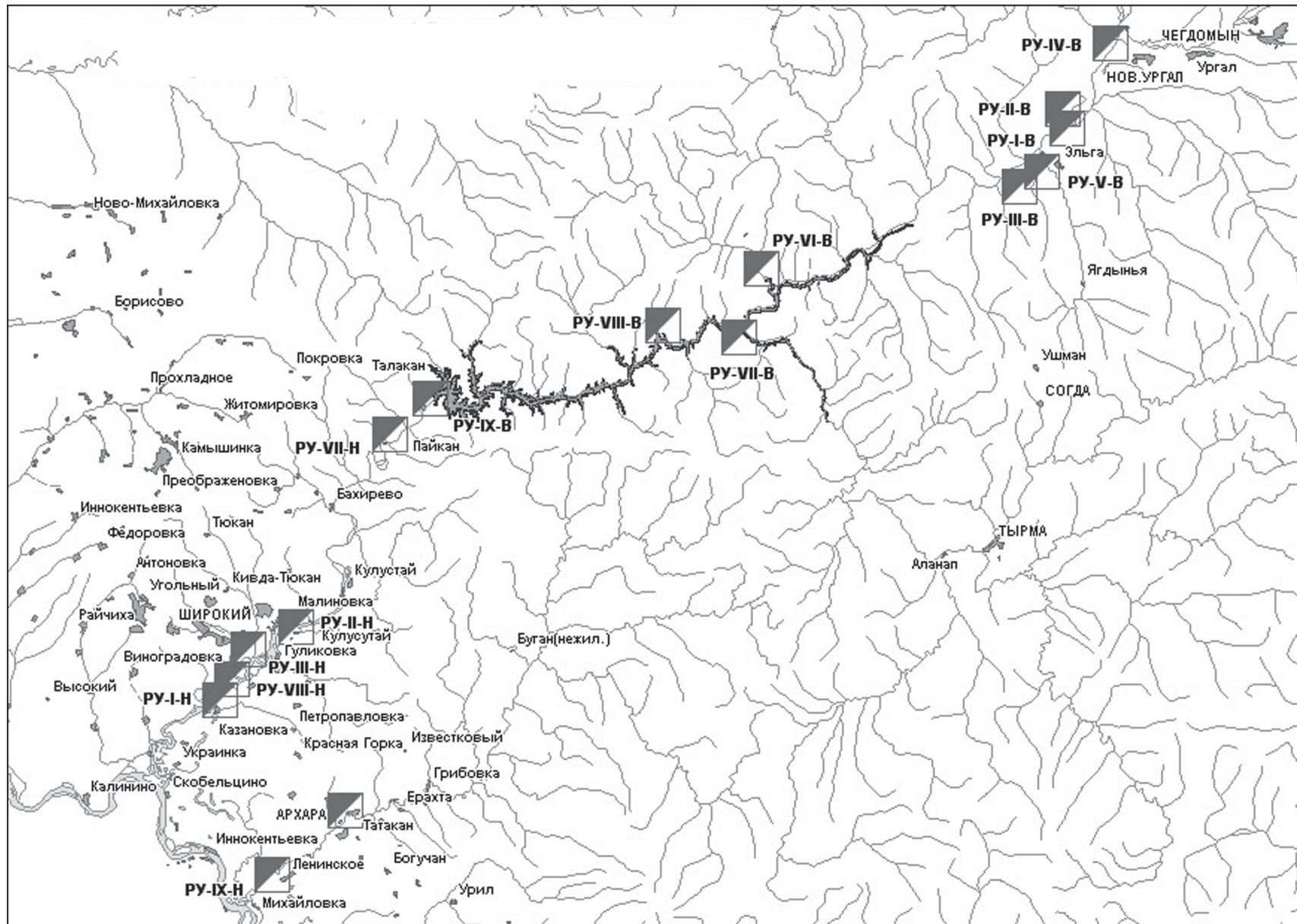


Рис. 1. Схема реперных участков мониторинга почвенного покрова зоны влияния Бурейской ГЭС.

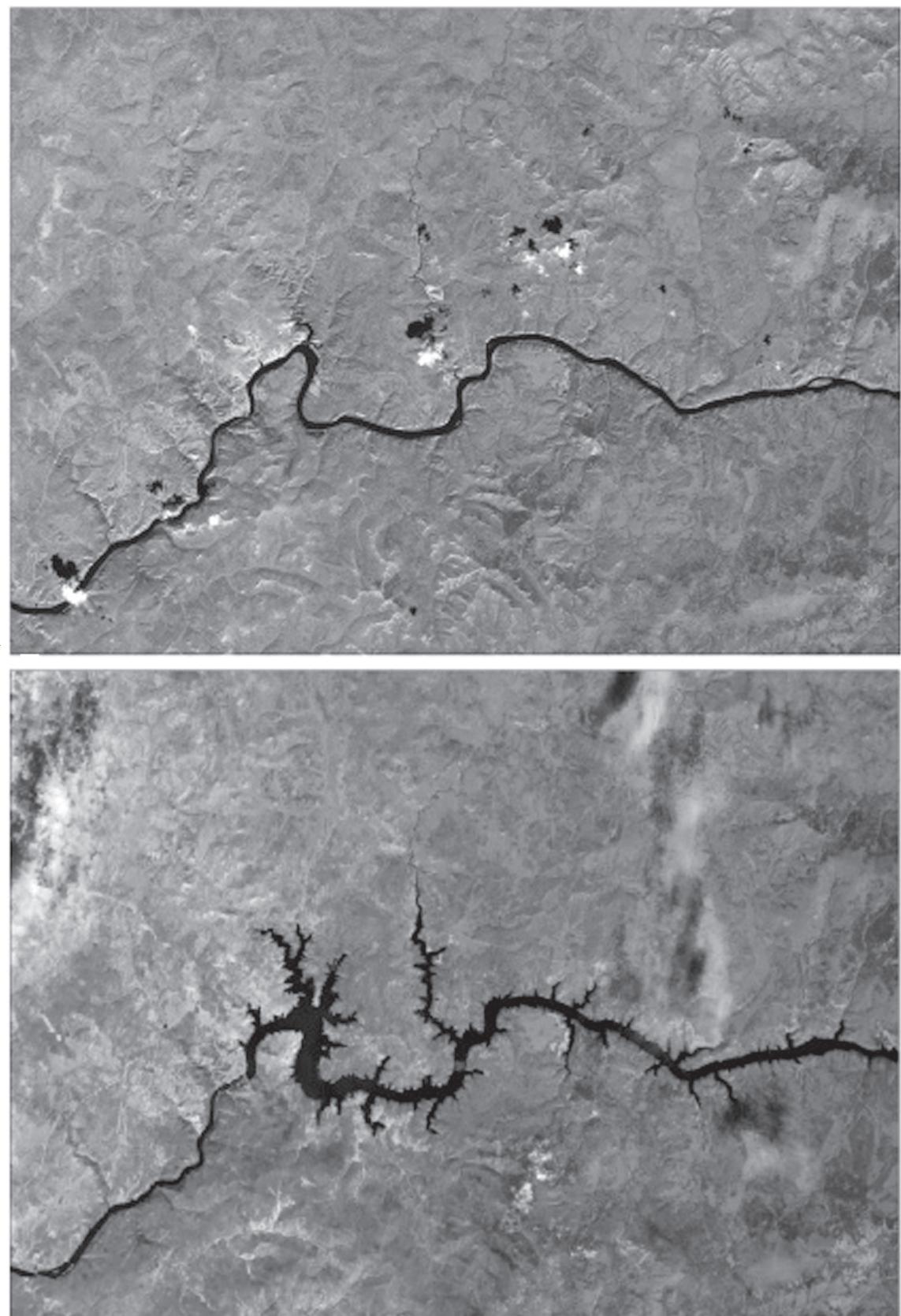


Рис. 2. Мониторинг заполнения Бурейского водохранилища с помощью космоснимков серии LandSat.
а – 7 сентября 2001 года, б – 27 июля 2003 года.

во всех спектральных диапазонах. На основе данных SRTM в лаборатории построена трехмерная модель рельефа на всю область мониторинга. Эта модель использовалась при расчете уровней заполнения Бурейского водохранилища, анализе форм рельефа, выявлении молодых, потенциально сейсмоопасных зон разломов.

В ходе работ по мониторингу Бурейской ГЭС лабораторией большое внимание уделялось текущему геоинформационному обеспечению специалистов, проводящих непосредственные исследования. Было подготовлено, распечатано и передано исследователям более тридцати карт самых различных масштабов.

В настоящее время практически завершается первый этап (накопительный и справочно-информационный) создания полнофункциональной ГИС. Назрела необходимость перехода ко второму этапу (обобщающему, аналитическому и прогнозирующему), в результате которого должна быть создана полнофункциональная геоинформационная система, обеспечивающая хранение, обработку, анализ, синтез полученной информации и составление достоверных

прогнозов социально-экологического мониторинга зоны влияния Бурейской ГЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронов Б.А., Сиротский С.Е. Научный и социально-экологический мониторинг и базы данных зоны влияния Бурейского гидроузла (промежуточный отчет за 2003 год). Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 2004.
2. Сидоров Ю.Ф. “Научный социально-экологический мониторинг и базы данных зоны влияния Бурейского гидроузла” (Экологическое сопровождение социально-экологического мониторинга на территории Амурской области). Этап № 2. Благовещенск, Хабаровск: НПП “Природоохраный центр”, 2004.
3. Ханов И.К. Промежуточный отчет о выполнении НИР “Научный социально-экономический мониторинг и базы данных зоны влияния Бурейского гидроузла” (Создание макета программного комплекса для ведения баз данных). Санкт-Петербург: ОАО ЛенГидроПроект, 2004.
4. Шаров Л.А., Анойкин В.И., Давидович М.С. “Комплект картографических материалов м-ба 1:500 000 для организации и ведения социально-экологического мониторинга в зоне влияния Бурейского гидроузла”. Поясн. зап. (Отчет по договору № 06-03/1 “Составление комплекта картографических материалов на бассейн р. Бурея в масштабе 1:500 000”). Хабаровск: ФГУГПП “Хабаровскгеология”, 2003.

Поступила в редакцию 2 марта 2006 г.

Рекомендована к печати С.М. Родионовым

V.I. Sinyukov, V.A. Glukhov, Ye.P. Maeva, O.V. Pybas

Geoinformation technologies in social-and-ecological monitoring of the zone affected by the Bureya hydroelectric power station.

Application of GIS technologies is described which involves geoinformation support and accompaniment of work on social-and-ecological monitoring of the zone affected by the Bureya hydroelectric power station. A system of digital topographic and special topical maps of three scale levels has been developed. The maps were used for data mapping, analysis and integration covering all the aspects of monitoring: the level of a reservoir filling, aquatic environment, animal world, ichthyology, soils, vegetation, and meteorological observations.

Key words: geoinformation technologies, map making, social-and-ecological monitoring, Bureya hydroelectric power station.

МОНИТОРИНГ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ Р. АМУР В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИИ НА ХИМИЧЕСКОМ ЗАВОДЕ В Г. ЦЗИЛИНЬ (КНР): НИТРОБЕНЗОЛ

**Н.В. Бердников, В.Л. Рапопорт, О.В. Рыбас, Т.И. Пелых, Г.Ф. Золотухина,
В.Е. Зазулина**

Институт тектоники и геофизики ДВО РАН им. Ю.А. Косягина, г. Хабаровск

Обобщены результаты мониторинга содержания нитробензола в экосистеме р. Амур после аварии 13 ноября 2005 г. на химическом заводе в г. Цзилинь, КНР. Нитробензол анализировался в воде, толще льда, рыбе и донных отложениях как во время прохождения фронта загрязнения, так и после него с целью прогноза последствий загрязнения.

Показано, что при выходе из р. Сунгари содержание нитробензола в амурской воде было выше предельно допустимых концентраций для питьевой воды (0,2 мг/л). Ниже по течению на всем интервале наблюдений она превышала ПДК для рыбохозяйственных водоемов (0,01 мг/л) в 2–20 раз, и только после г. Комсомольска-на-Амуре снизилась до безопасных значений. В соответствии с распределением водных потоков область нитробензольного загрязнения на отрезке от с. Нижнеленинское до с. Нижнеспасское двигалась вдоль правого берега р. Амур, а в районе Нижнеспасского – Хабаровска переместилась к левому берегу. Ниже по течению произошло интенсивное перемешивание вод и фрагментирование области загрязнения. В толще льда и в донных отложениях нитробензол не зафиксирован, в то время как в рыбе его концентрации достигали 0,026 мг/кг. Обнаружение нитробензола в рыбе, выловленной до появления загрязнения, говорит в пользу того, что описываемое загрязнение не было единичным, то есть нитробензол попадал в амурские воды и до описываемого выброса из Сунгари.

Ключевые слова: загрязнение, нитробензол, мониторинг, русловые потоки, р. Амур.

ВВЕДЕНИЕ

Авария 13 ноября 2005 г. на химическом заводе в г. Цзилинь, одном из крупнейших промышленных городов северо-восточных провинций Китая, поставила под угрозу экологическое благополучие как р. Сунгари, на которой расположен Цзилинь, так и экосистему р. Амур на протяжении более 1000 км от с. Нижнеленинское до устья. В зону загрязнения попали крупные российские города Хабаровск, Амурск, Комсомольск-на-Амуре и Николаевск-на-Амуре, а также большое количество поселков. Характер загрязнения достоверно известен не был, поэтому организации, привлеченные к мониторингу качества амурской воды, контролировали в ней содержание загрязнителей широкого спектра: бензола, нитробензола, толуола, ксиола, фенолов и их производных, тяжелых металлов и токсичных элементов и др.

Анализ первых образцов воды из области загрязнения показал, что одним из наиболее опасных

для здоровья человека загрязнителей в ней является нитробензол. Поэтому на контроль содержания этого вещества было направлено основное внимание исследователей. Помимо мониторинга нитробензола в воде в режиме реального времени, необходимого для предупреждения попадания его высоких концентраций в сети водоснабжения городов и поселков, контролировалось накопление нитробензола в рыбе, толще льда и донных отложениях для прогнозирования уровня его остаточных концентраций после прохождения фронта загрязнения.

Анализ содержаний нитробензола в воде, рыбе и донных отложениях Амура был поручен лаборатории физико-химических методов исследования Института тектоники и геофизики ДВО РАН. Для этого Правительством Хабаровского края приобретены и на время мониторинга переданы в институт 2 жидкостных хроматографа LC-20 фирмы Shimadzu, закуплено дополнительное оборудование и расходные материалы.

Нитробензол ($C_6H_5NO_2$) представляет собой бесцветную или желтоватую жидкость с запахом

горького миндаля. Температура плавления – 5,8 °С, кипения – 210,8 °С, плотность – 1,208 г/см³, растворимость в воде – 0,19 % при 20 °С. Он относится к группе сильнодействующих ядовитых соединений. Предельно допустимые концентрации в воде централизованных систем питьевого водоснабжения составляют 0,2 мг/л [3], класс опасности III. В водоемах рыбохозяйственного назначения концентрация нитробензола не должна превышать 0,01 мг/л [2].

РАЙОНЫ РАБОТ И ОСОБЕННОСТИ ОТБОРА ПРОБ

Для оперативного анализа нитробензола в воде были сформированы две хроматографические лаборатории: базовая в Институте тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН (г. Хабаровск) и мобильная, которую Правительство края разворачивало по мере движения области загрязнения в Нижнеленинском, Комсомольске-на-Амуре и Богородском. Пробы отбирались в створах напротив населенных пунктов Нижнеленинское, Луговое, Петровское, Нижнеспасское, Троицкое, Сарапульское, Вознесенское, Малмыж, Циммермановка, Богородское, Комсомольск-на-Амуре и о-ва Катерный (рис. 1). Кроме того, контрольная проба была взята в 20 км выше впадения р. Сунгари; детально изучена акватория р. Амур вблизи Хабаровска (протоки Пемзенская, Казакевичева, Амурская, водозаборы ТЭЦ и питьевого водоснабжения, резервуары очистных сооружений, сбросы Судостроительного завода). Отбор и доставка проб были организованы сотрудниками МЧС, Правительства Хабаровского края и Хабаровского ЦГМС-PCMЦ центра по мониторингу загрязнения окружающей среды. Пробы, где это было возможно, отбирались на поверхности и у дна реки вблизи правого берега, на середине и вблизи левого берега. Кроме того, как правило, готовились смешанные пробы, объединяющие придонные и поверхностные пробы воды. Отобранные с помощью специального пробоотборника пробы разливались в чистую стеклянную посуду и немедленно отправлялись на анализ. Время между отбором проб и анализом редко превышало 12 часов (обычно 5–6 часов), при этом пробы содержались при низкой (3–10 °С) температуре. Такие условия пробоотбора гарантировали неизменность концентрации нитробензола в пробах и достоверность анализа.

Выход загрязнения из р. Сунгари в р. Амур контролировался анализом проб воды на нитробензол в створе с. Нижнеленинское начиная с 25 ноября 2005 г. Каждые 3 часа отбиралось 6 проб: две пробы (поверхностная и придонная) вблизи правого берега, две – на середине реки, и две –

вблизи левого берега. Параллельно готовились смешанные пробы.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении аналитических исследований в качестве базовой была принята методика определения нитробензола в воде путем его экстракции смесью гептана и изопропанола с последующим замером концентрации методом высокоэффективной жидкостной хроматографии со спектрофотометрическим детектированием [1]. Эта методика позволяет определить концентрацию нитробензола в воде в диапазоне 0,04–1,0 мг/л. Однако с ее помощью было невозможно решить поставленную задачу мониторинга содержаний нитробензола в реальном времени, поскольку длительность анализа по методике с экстракцией составляет порядка 1,5 час. Кроме того, стандартная методика довольно трудоемка и связана с необходимостью использования больших объемов особо чистых реактивов.

Для экспресс-анализа нитробензола в воде нами была разработана методика прямого определения его концентраций, основанная на высокой чувствительности нового оборудования. Согласно этой методике экстракция нитробензола растворителями заменена прямым вводом анализируемой воды непосредственно в петлю-дозатор хроматографа.

Краткое описание разработанной методики

При выполнении измерений использовался жидкостный хроматограф LC-20A фирмы Shimadzu (Япония) со спектрофотометрическим детектором SPD-20A, терmostатом колонок СТО-20A, насосом LC-20AD и колонкой VP-ODS 1 = 250 мм, диаметр 4,6 мм. Для градуировки хроматографа готовились растворы нитробензола с концентрациями 0,001, 0,003, 0,005, 0,01, 0,02, 0,05, 0,1, 0,2, 0,5, 1,0 мг/л. В качестве элюента применялась смесь ацетонитрила со специально очищенной водой в объемном соотношении 8:2.

Условия хроматографирования:

- ввод пробы ручной через петлю-дозатор;
- объем пробы 20 мкл после предварительной фильтрации через стекловолоконный фильтр;
- изократический режим элюирования;
- аналитическая длина волны 260 нм;
- вспомогательная длина волны 225 нм;
- скорость потока элюента 1 мл/мин;
- температура термостата колонок 25 °С;
- время выхода нитробензола 4 мин.

Разработанная методика позволила сократить объем анализируемой воды с 0,5 л до 2–3 мл, время анализа с 1,5 час до 6–7 мин и снизить трудоемкость

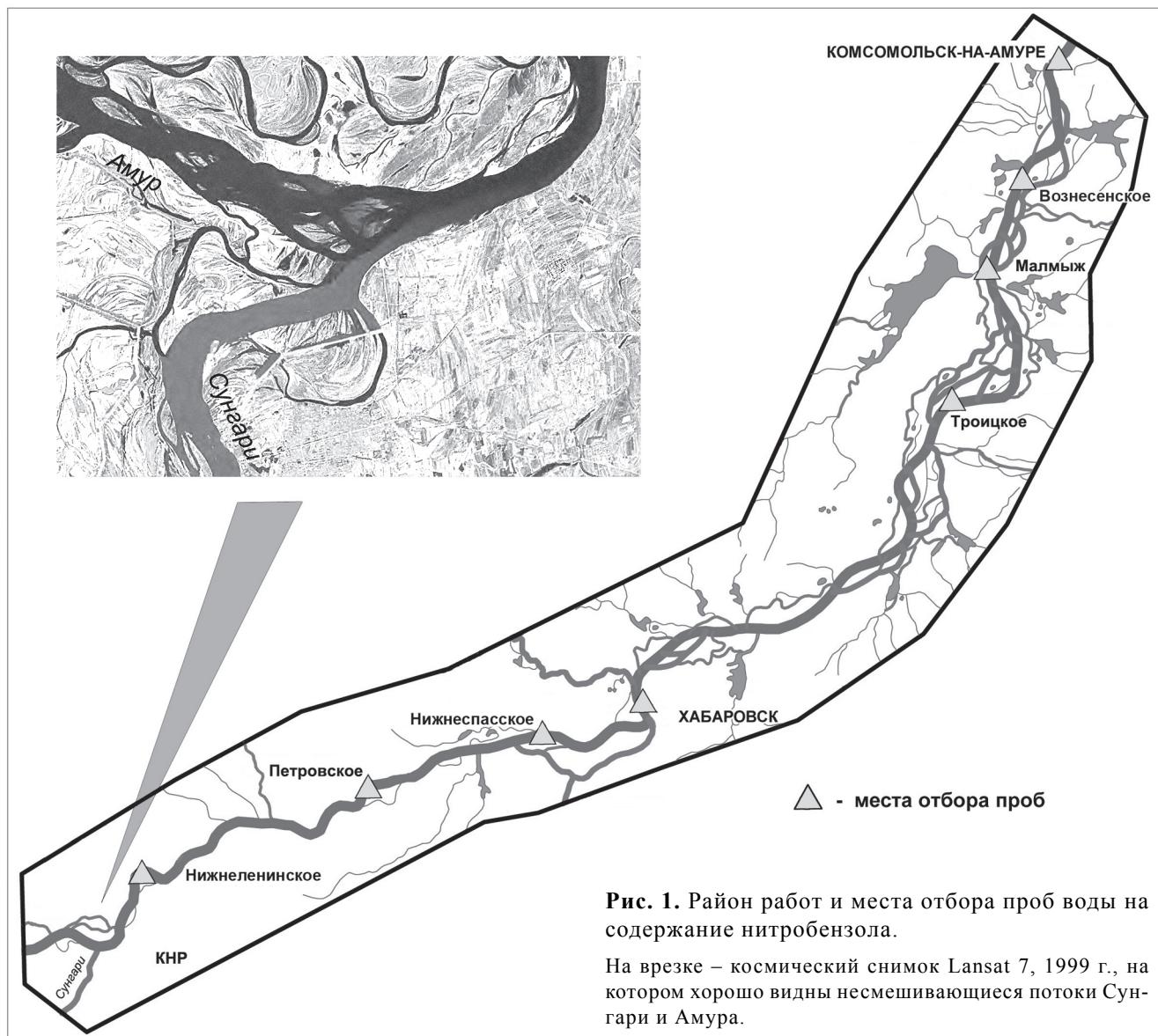


Рис. 1. Район работ и места отбора проб воды на содержание нитробензола.

На врезке – космический снимок Lansat 7, 1999 г., на котором хорошо видны несмешивающиеся потоки Сунгари и Амура.

анализа, что обеспечило решение основной задачи – проведение мониторинга содержаний нитробензола в режиме реального времени, выполняя до 50 анализов в день. Чувствительность определения повысилась до 0,002 мг/л.

В процессе работы новая методика была адаптирована к анализу нитробензола в толще льда, рыбе и донных отложениях.

Из кернов льда через каждые 2–3 см делались выплавки, которые анализировались по описанной выше методике.

Определение нитробензола в рыбе и донных отложениях основано на его свойстве образовывать с водой азеотроп (содержание нитробензола 12 %, температура кипения 97 °C), который полностью от-

деляется при перегонке. 20 г рыбного фарша или донных отложений растирали с сульфатом натрия, добавляли 40 г воды. После этого смесь перегоняли и определяли нитробензол в отгоне по описанной выше методике. При анализе рыбы для лучшего отделения пика нитробензола от примесей в качестве элюента использовали смесь ацетонитрила с водой в объёмном соотношении 45:55. Время вытока нитробензола 11,7 мин.

Результаты исследований представлялись в виде протоколов и графиков. Для выяснения особенностей движения области загрязнения в системе водных потоков р. Амур создана динамическая компьютерная модель. Далее приводится процедура создания этой модели с использованием пакета ПО Matlab v.7.04.

Исходные данные модели

В обработку взяты результаты анализов смешанных проб амурской воды с 25 декабря 2005 г. по 9 января 2006 г. в 8 контрольных точках (створах) возле населенных пунктов Нижнеленинское, Петровское, Нижнеспасское, Хабаровск, Троицкое, Малмыж, Вознесенское, Комсомольск-на-Амуре. Каждые сутки движения области загрязнения характеризовались одним набором проб, одновременно взятых в трех точках: вблизи правого и левого берегов, а также на середине реки. Из суточного цикла опробования выбирался набор, характеризующийся максимальными для этих суток содержаниями нитробензола. В каждом из выбранных створов присутствие нитробензола наблюдалось в течение 6–9 дней – периода, характерного для прохождения области загрязнения через створ.

Построение исходных матриц

На основе исходных данных были построены три 2D матрицы, соответствующие трем потокам (струям) загрязнения: левый берег, середина, правый берег. Каждая из матриц представляет собой 2-мерную поверхность, где ось X – набор контрольных точек (8 створов), ось Y – время (день взятия пробы), и $f(x,y)$ – величина концентрации нитробензола в мг/л. По каждой из контрольных точек для всех матриц выделяется начало волны, т.е. дата первого ненулевого значения концентрации, дата прохождения ее максимума и дата окончательного ухода волны – регистрация последних ненулевых значений.

Описание формы волны

Учитывая дату прохождения пика концентраций, подбиралось преобразование исходной матрицы, позволяющее оценить форму волны. Для этого по каждой из контрольных точек делалось такое смещение по оси Y, что все пиковые значения оказываются приравнены к y_{fix} , где y_{fix} – произвольное значение, взятое на оси Y (например, $y_{fix} = 0$). Т.е. $f_2(x_i, \max(y)) = \max(f_2(x_i, y))$, для всех $i=1\dots 8$, где f_2 – исходная поверхность (матрица) как результат этого преобразования. Таким образом можно оценить форму волны вне зависимости от времени, но в зависимости от ее положения на реке относительно контрольных точек отбора проб.

Используя расстояния между контрольными точками, делается первый шаг интерполяции (функция Matlab `interp2()`), результатом которой является регулярная поверхность с частотой дискретизации 5 км по оси X и 1 час по оси Y. Далее выполняется обратное преобразование, т.е. все интерполированные данные возвращаются в свои реаль-

ные временные рамки. Здесь также используется интерполяция 1-мерного набора данных пиковых значений волн в контрольных точках, которая позволяет построить набор индексов для обратного смещения. В итоге получились три (левый берег, середина, правый берег) независимых набора данных с единой регулярной структурой (ячейка с размерностью 1 час × 5 км), т.е. с временной и пространственной привязкой. Объединив их в 3D матрицу и применив функцию `interp3()`, получаем конечный результат. На этапе 3D интерполяции были использованы следующие параметры: время дискретизации – 1 час – оставлено без изменения, шаг дистанции по оси X уменьшен до 1 км, количество струй по ширине реки – 41.

Визуализация результирующей матрицы

Поскольку одна из осей 3D матрицы – время, проекцией на эту ось в фиксированный момент времени является 2D-матрица (размерность – длина участка взятия проб на ширину потока). Исходя из этого, для получения динамической картины использовалась последовательная реализация функции `imagesc()` для всех значений временной оси, которая в конечном итоге записывается в видео-файл.

Оценка погрешности построений

В первую очередь необходимо отметить, что все интерполяции проводились с использованием линейных функций, поэтому говорить о полной достоверности можно только в контрольных точках в 12-00 (полдень) каждого суток. Все остальное – результат линейной интерполяции. Следующий важный момент состоит в том, что на первом шаге интерполяции исходным набором данных была матрица, нормализованная по максимумам измерений в контрольных точках, но не по длине волны, так как невозможно достаточно точно описать ее аппроксимирующую функцию из-за малого числа замеров (не более 9 на каждую контрольную точку). Следовательно, точный, с точки зрения линейной интерполяции, результат между контрольными точками достигается только на участках прохождения максимума волны; на участках же, близких к началу (концу) волны, возможны небольшие отклонения, связанные с взаимным влиянием соседних контрольных точек.

Результаты

Силами стационарной и полевой лабораторий ИТиГ ДВО РАН было выполнено более 1500 определений содержаний нитробензола в воде, льду, рыбе и донных отложениях методом высокочастотной жидкостной хроматографии.

Нитробензол в воде во время прохождения области загрязнения

Первые признаки загрязнения у выхода из р. Сунгари с концентрациями нитробензола 0,005 мг/л в р. Амур в створе с. Нижнеленинское были зафиксированы 16 декабря в пробах, отобранных с поверхности вблизи правого берега и со дна на середине реки. Затем его концентрации быстро нарастали и к 18 декабря достигли максимального значения 0,209 мг/л (поверхностные воды вблизи правого берега). При этом загрязнение захватило середину реки, распространяясь в основном по дну; в левобережных водах нитробензол отсутствовал до 17 декабря. В целом же основной объем загрязнения здесь шел вдоль правого берега (рис. 2). Общая продолжительность движения области загрязнения через створ Хабаровска – 6 суток.

В амурской воде у с. Петровское нитробензол фиксировался с 19 декабря. Так же, как и в Нижнеленинском, основной фронт загрязнения распространялся вдоль правого берега, причем в поверхностных водах у правого берега концентрация нитробензола была выше, чем у дна, а на середине реки и вдоль левого берега, наоборот, основная масса загрязнителя шла в придонных слоях воды. Судя по рис. 2, загрязнение в большой мере распространялось и на середину реки. Максимальная концентрация нитробензола в створе с. Петровского составила 0,138 мг/л (21 декабря, поверхностные воды у правого берега), последние его следы отмечены 24 декабря (рис. 2).

В районе с. Нижнеспасское первые признаки загрязнения нитробензолом были определены 20 декабря в левобережных водах (смешанная проба). Концентрации нитробензола в зоне загрязнения в целом значительно снизились, максимальное значение 0,079 мг/л было отмечено днем 24 декабря вблизи правого берега. Загрязнение распространялось на середину реки и левобережные воды, хотя область максимальных концентраций шла все же вдоль правого берега (рис. 2). Последние признаки загрязнения нитробензолом в створе Нижнеспасского отмечены 28 декабря.

Города Хабаровска область загрязнения достигла утром 23 декабря. Максимальная концентрация нитробензола 0,05 мг/л зафиксирована 24 декабря в воде у левого берега. Детальный мониторинг качества воды у правого берега, где расположен главный водозабор очистных сооружений питьевого водоснабжения города, показал, что во время прохождения области загрязнения вода здесь оставалась практически чистой (<0,003 мг/л

нитробензола). Это подтверждает распределение потоков, зафиксированное на космическом снимке (рис. 3). Из рисунка видно, что вдоль правого берега проходит струя Амурской протоки, практически не смешанная с основным потоком р. Амур, по которому двигался основной объем загрязнения. В то же время, в верхней части снимка хорошо видна область турбулентии и фрагментирования потоков, в которой происходит их перемешивание. Как следует из рис. 2, область максимальных концентраций нитробензола заметно сместилась к фронтальной части зоны загрязнения. Общее время движения загрязненной нитробензолом воды через створ Хабаровска – 7 суток.

У с. Троицкого фронт загрязнения зафиксирован 29 декабря. Здесь максимальные концентрации нитробензола снизились до 0,042 мг/л (30 декабря возле левого берега), фактически же произошло распределение загрязнения воды по всему сечению реки (рис. 2). Область максимальных концентраций нитробензола смешена к фронтальной части области загрязнения: 29–31 декабря отмечались максимальные содержания, далее в течение более 4 суток наблюдался медленный спад концентраций. Общее время прохождения загрязненных вод увеличилось до 9 дней.

В амурской воде около с. Малмыж нитробензол появился 30 декабря, пиковое значение 0,028 мг/л отмечено 31 декабря в придонных водах на середине реки. Максимальные концентрации наблюдались во фронтальной части области загрязнения вблизи левого берега и на середине реки, ближе к окончанию зоны загрязнения содержание нитробензола по профилю реки выровнялось (рис. 2). Время прохождения загрязненных нитробензолом вод через Малмыж составило 9 дней.

Первые признаки загрязнения воды нитробензолом в районе с. Вознесенское зафиксированы 31 декабря, максимальное его содержание здесь составило 0,022 мг/л (1 января 2006 г., придонные воды вблизи левого берега). Судя по рис. 2, через створ Вознесенского прошли два максимума концентраций нитробензола, приуроченные к началу и к концу области загрязнения. Основной объем загрязнения двигался вдоль левого берега, общий период прохождения – более 9 дней.

В створе Комсомольска-на-Амуре нитробензол впервые обнаружен 2 января в воде на середине реки, а максимальные концентрации 0,019 и 0,02 мг/л отмечены на следующий день вблизи правого и левого берегов, соответственно. Как видно из рис. 2, область загрязнения здесь имела 2

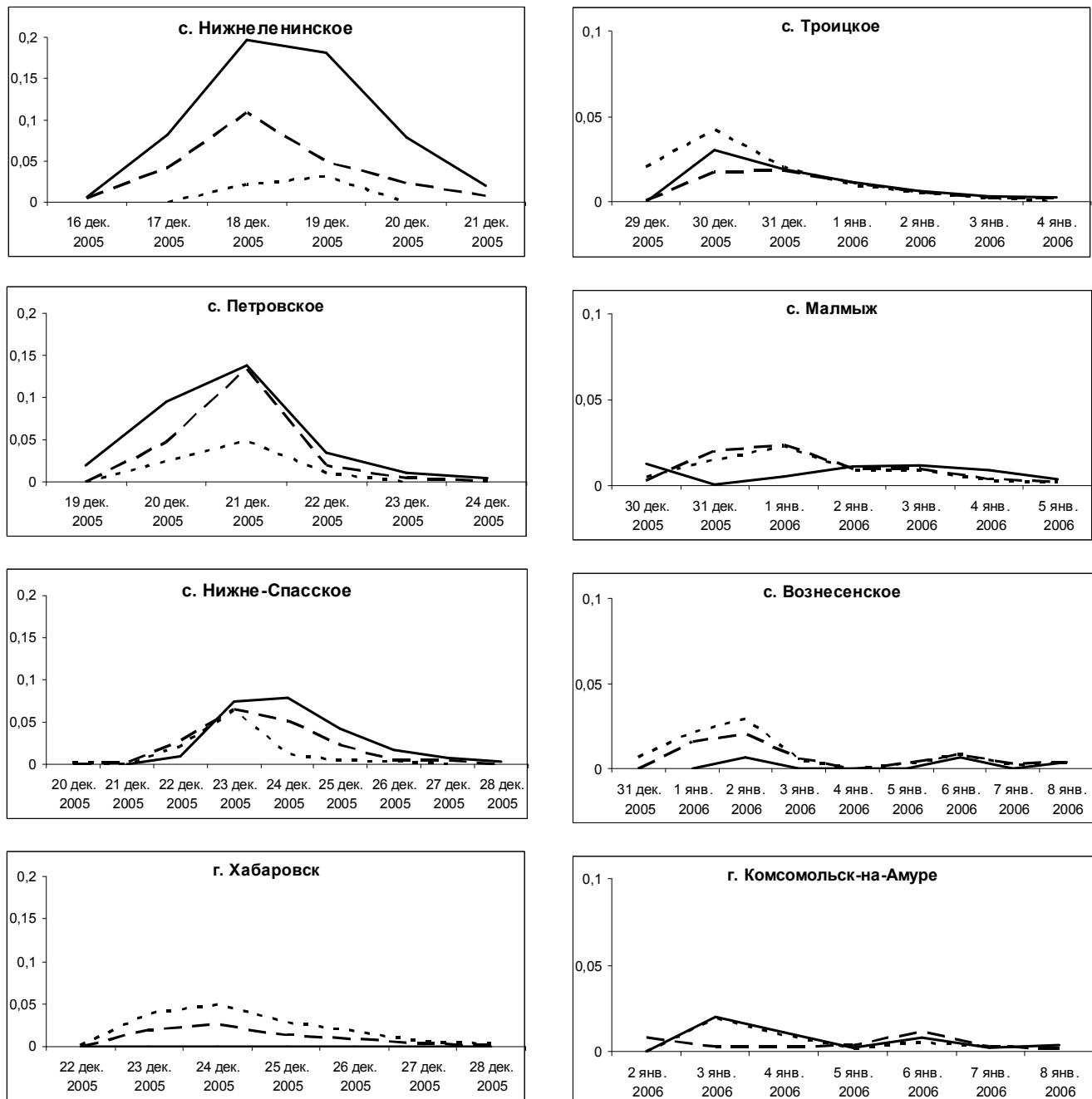


Рис. 2. Концентрации нитробензола (мг/л) в смешанных пробах воды из р. Амур во время прохождения зоны загрязнения.

Сплошная линия – вблизи правого берега, пунктир – середина реки, точки – вблизи левого берега.

максимума концентраций нитробензола, отмеченные 3 и 6 января; к ее окончанию содержание нитробензола по профилю реки выравнивается. Общее время прохождения загрязнения – более 7 суток (далее наблюдения не велись).

После Комсомольска-на-Амуре наблюдения велись в с. Богородское. Здесь только 13 января было

зарегистрировано содержание нитробензола 0,001 мг/л, в остальных пробах воды его концентрация была ниже предела обнаружения (<0,001 мг/л).

На рис. 4 представлены фрагменты видео-файла, иллюстрирующего движение зоны загрязнения от Нижнеленинского до Комсомольска-на-Амуре.



Рис. 3. Космический снимок Aster 5 сентября 2002 г. района г. Хабаровска.

Хорошо видны потоки, сформированные Амуром и Амурской протокой (нижняя часть снимка) и область их смещения (верхняя часть снимка).

Нитробензол в воде, толще льда, донных отложениях и рыбе после прохождения области загрязнения

Предполагалось, что определенная (возможно, значительная) часть нитробензола после прохождения области загрязнения останется вмерзшей в лед, законсервированной в донных отложениях и рыбе. Для проверки этого предположения и принятия соответствующих мер защиты населения Правительством Хабаровского края был организован мониторинг экосистемы р. Амур перед весенним паводком. Пробы льда, воды, донных отложений и рыбы отбирались в декабре 2005 г. и январе–марте 2006 г. Результаты, полученные в ИТИГ ДВО РАН, представлены в таблице. Из таблицы видно, что воды р. Сунгари от г. Цзямы до г. Тунцзян и р. Амур от Нижнеленинского до Комсомольска-на-Амуре в феврале–марте 2006 г. не содержали нитробензола. Не осталось нитробензольного загрязнения воды и в районе временной дамбы через протоку Казакевичева. Это же касается и ледяного покрова в этих районах. Нитробензол не был обнаружен и в пробах донных отложе-

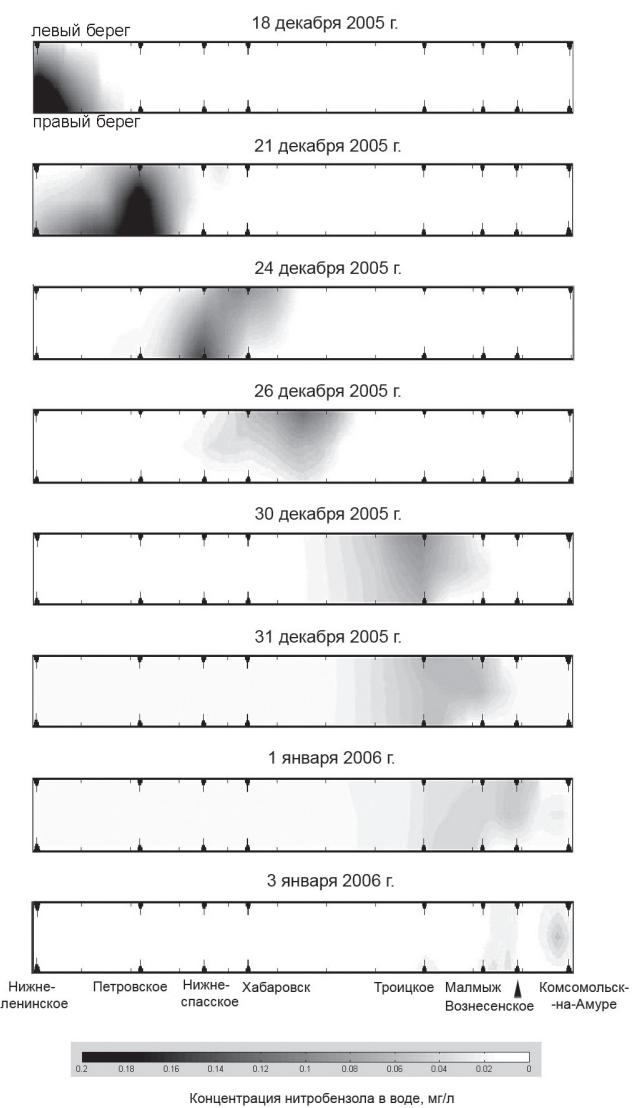


Рис. 4. Фрагменты видео-файла, иллюстрирующего движение области загрязнения от Нижнеленинского до Комсомольска-на-Амуре.

ний, хотя их отбор в ряде случаев производился непосредственно во время движения области загрязнения или сразу после ее прохождения (Петровское, Троицкое, Малмыж). В то же время, в большинстве проб рыбы установлено наличие нитробензола, что делает ее непригодной для использования в пищу. Наиболее загрязненной оказалась рыба, отловленная во время прохождения зоны загрязнения (среднее по 10 пробам – 0,0133 мг/кг). Существенно меньшие концентрации нитробензола зафиксированы в рыбе, отловленной после прохождения загрязнения (среднее по 4 пробам – 0,00033 мг/кг). Примечательно, что значительные содержания нитробензола отмечены в рыбе, отловленной до подхода области загрязнения (среднее по 5 пробам – 0,0056 мг/кг).

Таблица. Содержания нитробензола в воде, толще льда, донных отложениях и рыбе.

Объект анализа	Место отбора проб	Дата отбора	Нитробензол, мг/л (вода), мг/кг (донные и рыба)
Вода	Сунгари, вблизи Цзямусы		
	Сунгари, вблизи Харбина	7.03.06.	
	Сунгари, вблизи Тунцзяна		
	Амур, вблизи с. Нижнеленинское	12.03.06.	
	Амур, вблизи Фуюаня	23.03.06.	
	Амур, вблизи Нижнеспасского	3.02.06.	<0,001
	Прот. Казакевичева, ниже плотины		
	Прот. Казакевичева, выше плотины	10.03.06.	
	Амур, вблизи Хабаровска	14.03.06.	
	Амур, вблизи Амурзета	12.03.06.	
	Амур, вблизи Комсомольска-на-Амуре	17.03.06.	
Лед	Сунгари, вблизи Цзямусы		
	Сунгари, вблизи Харбина	15, 16.03.06.	
	Сунгари, вблизи Тунцзяна		
	Амур, вблизи Фуюаня	13.03.06.	<0,001
	Амур, вблизи с. Нижнеспасское	3,7,9.02.06.	
Донные отложения	Прот. Казакевичева, выше плотины	10.03.06.	
	Амур, вблизи с. Нижнеленинское	26.12.05.	
	Амур, вблизи с. Петровское	23.12.05.	
	Амур, вблизи с. Нижнеспасское	03.02.06.	<0,001
	Амур, вблизи Хабаровска	09.02.06.	
	Амур, вблизи с. Троицкое	06.01.06.	
	Амур, вблизи с. Малмыж	05.01.06.	
	Амур, вблизи Комсомольска-на-Амуре	2,10.01.06.	
	Прот. Казакевичева, ниже плотины	10.03.06.	
	Прот. Казакевичева, выше плотины		
Рыба	Амур, карась, с. Троицкое	15.12.05.	0,017
	Амур, налим, Ульчский район	21.12.05.	<0,001
	Амур, щука, с. Малмыж	21.12.05.	0,004
	Амур, щука, с. Малмыж	21.12.05.	0,007
	Амур, налим, с. Иннокентьевка	26.12.05.	<0,001
	Амур, тригуб, Хабаровск	4.01.06.	0,002
	Амур, верхогляд, Хабаровск	4.01.06.	<0,001
	Амур, тригуб, с. Джари	4.01.06.	0,013
	Амур, конь пестрый, с. Джари	4.01.06.	0,009
	Амур, тригуб, с. Джари	4.01.06.	0,017
	Амур, налим, с. Джари	4.01.06.	0,026
	Амур, конь пестрый, с. Джари	4.01.06.	0,01
	Амур, красноперка, с. Джари	4.01.06.	<0,001
	Амур, конь пестрый, сов. Хорпинский	6.01.06.	0,002
	Амур, чебак, сов. Хорпинский	6.01.06.	0,003
	Амур, тригуб, с. Джари	16.01.06.	<0,001
	Амур, толстолобик, с. Джари	16.01.06.	<0,001
	Амур, чебак, с. Нижнеспасское	17.01.06.	<0,001
	Амур, конь пестрый, с. Нижнеспасское	17.01.06.	<0,001

Примечание. Проба отобрана: до (жирный шрифт), после (нормальный шрифт) и во время (курсив) прохождения области загрязнения.

ОБСУЖДЕНИЕ

Как показали наши исследования, выброс из р. Сунгари явился причиной значительного загрязнения нитробензолом вод р. Амур. В створе Нижнеленин-

ского максимальная концентрация нитробензола (0,209 мг/л) превысила предельно допустимое значение для питьевой воды (0,2 мг/л), ниже по течению на всем протяжении интервала наблюдений она превышала ПДК для рыбоводческих водоемов

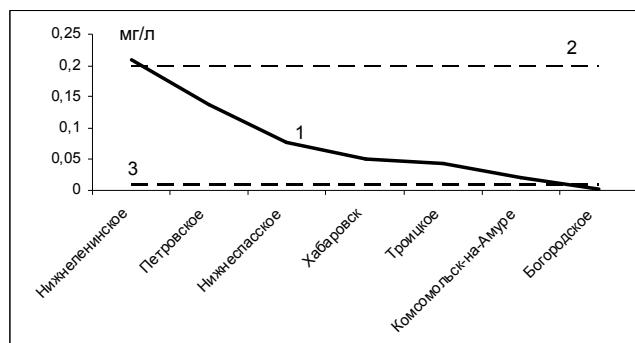


Рис. 5. Максимальные концентрации нитробензола (мг/л) в пунктах наблюдений (1); 2, 3 – ПДК нитробензола для питьевой воды (2) и водоемов рыбохозяйственного значения (3).

(0,01 мг/л) в 2–20 раз и только ниже Комсомольска-на-Амуре уменьшилась до безопасных значений (рис. 5).

От места впадения Сунгари нитробензольное загрязнение двигалось преимущественно вдоль правого берега Амура, в районе Нижнеспасского – Хабаровска произошло его перемещение к левому берегу, ниже Хабаровска область загрязнения фрагментируется и практически равномерно заполняет русло реки. На участке Нижнеленинское – Петровское наибольшие концентрации нитробензола отмечались в поверхностных водах, ниже по течению произошло перемешивание. Скорость продвижения области загрязнения в зависимости от гидрологического режима реки изменялась: через створ Нижнеленинского она прошла за 6 суток, в створе Нижнеспасского наблюдалась 9 суток, а Хабаровск миновала за 7 суток.

При прогнозировании негативных последствий прохождения области загрязнения обсуждались три основных возможности накопления нитробензола в экосистеме Амура: захват кристаллизующимся льдом, аккумуляция в донных отложениях и загрязнение рыбы. Вмерзание в лед считалось наиболее опасным, так как загрязнение происходило во время ледостава на Сунгари и интенсивного наращивания ледяного покрова на Амуре. Поэтому не исключалась возможность повторного загрязнения воды во время весеннего таяния льда. Детальное исследование льда на Сунгари и Амуре после прохождения области загрязнения показало полное отсутствие в нем нитробензола. Поскольку суточный прирост льда в ноябре 2005 г. – январе 2006 г. на Амуре был

0,9–1,9 см в сутки (данные Хабаровского ЦГМС-PCMЦ центра по мониторингу загрязнения окружающей среды), керны льда “сканировались” с шагом 2–3 см. Отсутствие нитробензола во льду мы связываем с вымораживанием – процессом очищения кристаллизующейся фазы от примесей. Однако существовала возможность попадания нитробензола в лед совместно с нефтепродуктами, в которых нитробензол хорошо растворим. Нефтепродукты хорошо смачивают лед и могли быть захвачены в его толщу. Однако концентрации нефтепродуктов в амурской воде во время загрязнения были низкими (в основном 0,05–0,1, редко 0,3–0,4 мг/л), поэтому вмерзания нитробензола в лед совместно с ними не произошло.

Отсутствие нитробензола в пробах донных отложений можно объяснить низкой скоростью седиментации в русле Амура в зимнее время, в результате чего загрязненный нитробензолом слой не успел сформироваться или был смыв (промыт) следующими за областью загрязнения водами, не содержащими нитробензол.

Нитробензол имеет свойство концентрироваться в тканях живых организмов, особенно в жировых отложениях. Это продемонстрировали анализы рыбы, выловленной в Амуре до, во время и после прохождения зоны загрязнения. Наибольшая концентрация нитробензола 0,026 мг/кг зафиксирована в налиме, выловленном в районе Троицкого во время прохождения области загрязнения. Рыба, выловленная после прохождения области загрязнения, оказалась менее загрязненной, что, возможно, объясняется самоочищением живых организмов от нитробензола. Обнаружение нитробензола в рыбе, выловленной до появления загрязнения, говорит, вероятно, о том, что описываемое загрязнение не было единичным, т.е. нитробензол так или иначе попадал в амурские воды и до описываемого Сунгарийского загрязнения.

ЛИТЕРАТУРА

- ВЖХ определение нитробензола в воде. Методы контроля. Химические факторы. МУК 4.1.750-99. С. 133–140.
- Перечень рыбохозяйственных нормативов: предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасного уровня воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. М.: ВНИРО, 1999.
- Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. СанПИН 2.1.4. 1074-01. п.4.2.1.2.2.1.

Поступила в редакцию 7 июля 2006 г.

Рекомендована к печати С.М. Родионовым

N.V. Berdnikov, V.L. Rapoport, O.V. Rybas, T.I. Pelykh, G.F. Zolotukhina, V.Ye. Zazulina

Monitoring of the Amur River ecosystem pollution resulting from the accident at the chemical plant in Jilin (China): nitrobenzene

The results of monitoring of nitrobenzene content in the Amur River ecosystem are summarized after the November 13, 2006 accident at the chemical plant in Jilin (China). Nitrobenzene was analyzed in water, ice pack, fish, and bed material both during the passage of the pollution front and after it aimed at prediction of pollution consequences.

It is shown that the nitrobenzene concentration at the confluence of the Songhua and Amur rivers was higher than the maximum permissible value for drinking water (0.2 mg/l). Downstream, along the whole interval of monitoring, it exceeded the permissible concentration for fish-farming reservoirs (0.01 mg/l) by 2–20 times, and only downstream from Komsomolsk-na-Amure it dropped to safe values. In accordance with the distribution of water streams, the area of nitrobenzene pollution at the stretch from Nizhneleninskoye Settlement to Nizhnespasskoye Settlement moved along the right bank of the Amur River; in the Nizhnespasskoye Settlement – Khabarovsk area it shifted to the left bank. Downstream, there was intense mixing and fragmentation of the pollution area. No nitrobenzene was registered in the ice pack or bed material, while in the fish its concentrations were as high as 0.026 mg/l. The detection of nitrobenzene in the fish caught prior to the pollution argues for the fact that the described pollution was not a single case, i.e., nitrobenzene was in the Amur waters before its discharge from the Songhua.

Key words: pollution, nitrobenzene, monitoring, channel streams, Amur River.

АНАЛИЗ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

УДК 622.831:551.24

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВРЕМЕННОГО ПОЛЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБЛАСТИ СОЧЛЕНЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНО-АЗИАТСКОГО И ТИХООКЕАНСКОГО ПОЯСОВ

И.Ю. Рассказов

Институт горного дела ДВО РАН, г. Хабаровск

Рассмотрена проблема численного моделирования современного регионального поля напряжений в сложных геодинамических и сейсмических условиях области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского поясов. Предложен подход, позволяющий в первом приближении оценивать характер регионального поля напряжений для его учета при геомеханических исследованиях на опасных по горным ударам месторождениях региона. Обсуждаются вопросы, связанные с усложнением расчетной модели на следующих этапах исследований.

Ключевые слова: региональное поле напряжений, численное моделирование, горные удары, рудные месторождения, область сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского поясов.

ВВЕДЕНИЕ

Подземное освоение недр и горное строительство на больших глубинах сопряжены с необходимостью осуществлять работы в условиях опасных проявлений горного давления, как в статической, так и в динамической его формах. Отличительной чертой динамических проявлений горного давления, особенно горных и горно-тектонических ударов, является их внезапность и большая разрушительная сила. Они наносят большой материальный и социальный урон горнодобывающим предприятиям, приводят к длительным (на несколько месяцев) остановкам добычи полезного ископаемого. Это связано с необходимостью выполнения масштабных восстановительных работ на больших площадях шахтного поля. По степени тяжести и негативным последствиям мощные горные и горно-тектонические удары могут быть отнесены к техногенным катастрофам.

Несмотря на усилия многих ученых в России и мире, проблема прогноза и предотвращения опасных динамических проявлений горного давления до настоящего времени сохраняет свою остроту, обусловленную постоянно растущими объемами выработанных пространств, увеличением глубины ведения горных работ и широкой вариацией геотектонических условий мест их проведения.

Характерной особенностью ныне эксплуатируемых удароопасных месторождений, расположенных восточнее оз. Байкал, является их приуроченность к тектонически активным районам земной коры. Данное обстоятельство предопределяет необходимость выявления возможных специфических особенностей решения проблем горной геомеханики и управления горным давлением. Для подобных условий характерен эффект весьма неравномерного напряженного состояния участков массива горных пород, находящегося под воздействием как техногенных, так и неотектонических процессов, что не может не накладывать отпечаток на локальную геодинамическую систему, а, следовательно, и на характер динамических проявлений горного давления.

На геомеханическое состояние разрабатываемого массива горных пород конкретного месторождения оказывает влияние его расположение не только относительно главных структурных элементов земной коры, но и относительно современных сейсмоактивных зон. Необходимо учитывать также особенности геологического строения и структуры рудных полей.

В этих условиях одним из путей решения проблемы горных ударов является построение расчетных моделей, адекватно описывающих сложные геомеханические и геодинамические процессы в массивах горных пород. На этой основе появляется воз-

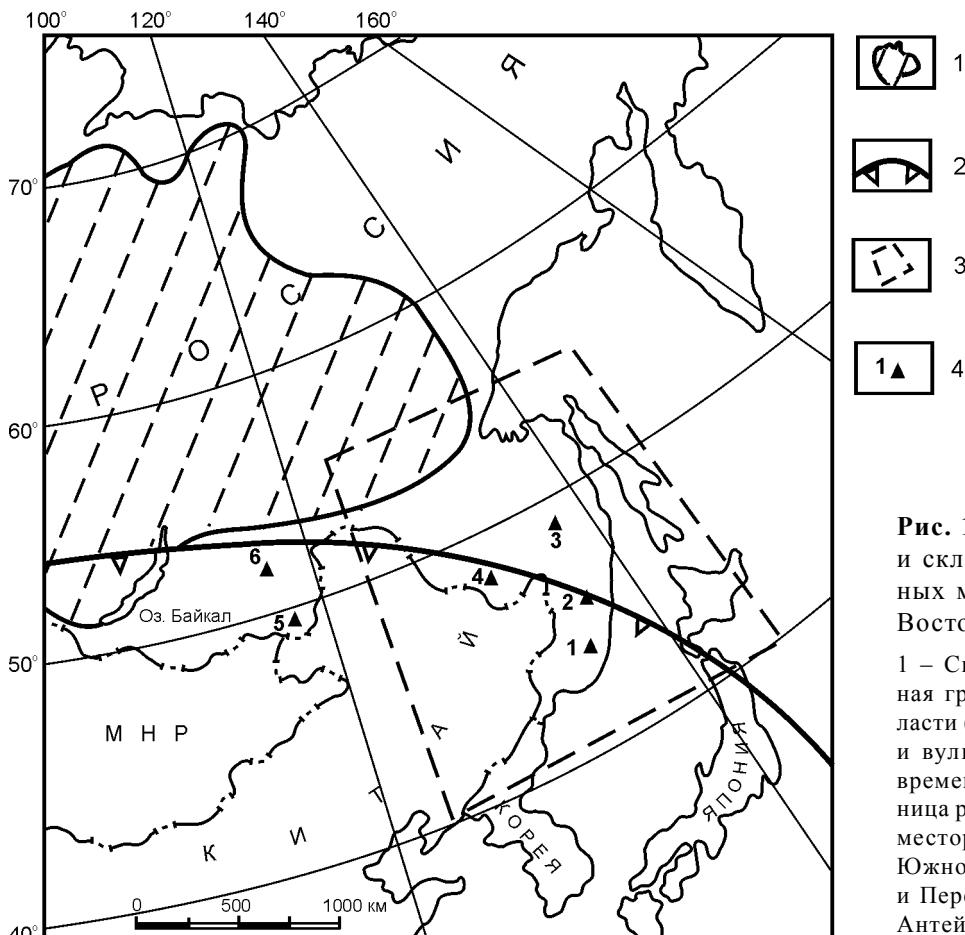


Рис. 1. Общее положение опасных и склонных к горным ударам рудных месторождений юга Дальнего Востока и Забайкалья.

1 – Сибирская платформа; 2 – северная граница Сино-Индонезийской области (СИО) наибольшей сейсмической и вулканической активности Нового времени (по Черкасову Р.Ф.); 3 – граница расчетной области; 4 – положение месторождений: 1 – Николаевского и Южного; 2 – Восток-2; 3 – Солнечного и Перевального; 4 – Хинганского; 5 – Антей; 6 – Дарасунского.

можность выявлять наиболее общие закономерности формирования природных и техногенных полей напряжений, использование которых существенно повышает надежность прогноза опасных горнодинамических явлений и создает основу для разработки комплекса эффективных мер по их предотвращению.

В настоящей статье описываются результаты моделирования регионального поля напряжений верхней части земной коры в области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского поясов, сопоставленные с данными о параметрах напряженного состояния массивов горных пород ряда рудных месторождений юга Дальнего Востока России.

ГЕОТЕКТОНИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Геологическое строение, структурные особенности и геодинамика территории юга Дальнего Востока России и Забайкалья, в пределах которой расположен целый ряд опасных и склонных к горным ударам рудных месторождений, имеет ряд важных особенностей, отличающих ее от других регионов. Одной из них является приуроченность рассматри-

ваемого участка земной коры к северной границе Сино-Индонезийской области (СИО) наибольшей сейсмической и вулканической активности Нового времени (рис. 1), которую в качестве планетарной глубинной структуры впервые выделил Р.Ф. Черкасов в 2004 г. По данным этого автора [29], СИО занимает 6 % поверхности Земли. Однако в ее пределах случилось до половины известных сильнейших землетрясений и вулканических извержений, в результате которых погибло больше людей, чем на остальной части Земли. Это единственная крупная изометрическая активная область Нового времени, глубинной причиной возникновения которой считается смещение субъядра с центра Земли (эксцентризация субъядра).

Исследуемый регион характеризуется также еще одной специфической особенностью – он расположен в области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского поясов на юго-восточной периферии Сибирской платформы (или Северо-Азиатского кратона, по Л.М. Парфенову и др., 2003) (рис. 2). В соответствии со схемой районирования М.В. Гзовского [2], данная область относится к числу участков

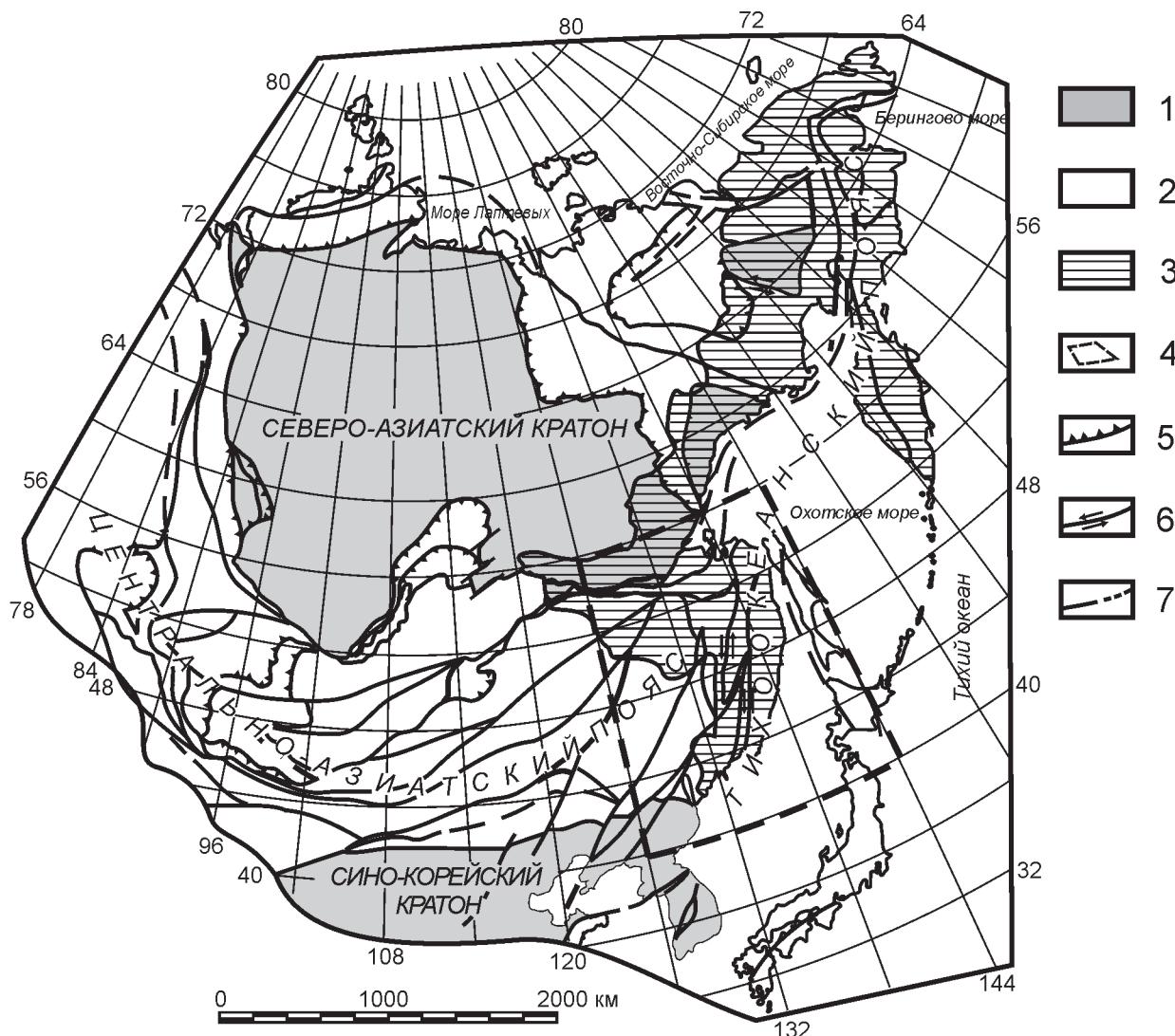


Рис. 2. Положение исследуемой области в структурах Северо-Востока Азии (тектоническая основа по Парфенову и др., 2003, с упрощениями и дополнениями).

1 – кратоны и их фрагменты; 2 – орогенные пояса различного возраста; 3 – российская часть Дальнего Востока; 4 – исследуемая область; 5 – надвиги; 6 – сдвиги; 7 – прочие разломы.

земной коры, характеризующихся одним из наиболее высоких уровней максимальных касательных напряжений. При этом аномальные абсолютные значения верхнего предела максимальных касательных напряжений в земной коре отчетливо контролируются внешним контуром СИО, а также направлением Тихоокеанского пояса. Исключение составляют участки, перекрытые молодыми осадками (Среднеамурская и Амуро-Зейская впадины).

В работе [2] отмечается, что глубинная структура региона определяется двумя главными факторами: а) взаимодействием тихоокеанской океанической литосферы (литосферных плит) с азиатской

континентальной; б) взаимодействием друг с другом континентальных литосферных плит. По результатам трехмерного моделирования установлено преобладание современных обстановок сжатия в исследуемом регионе.

Активная глубинная геодинамика в мезозое–кайнозое определяла сложные геодинамические процессы: субдукцию, сдвиговые и надвиговые деформации, деструкцию земной коры (включая послойные срывы). Обстановки растяжения в мезозое формировались в осадочных бассейнах и крупных магматических ареалах. Все перечисленные эндогенные геодинамические процессы, так или иначе, влияли на

формирование геологических особенностей и структуры месторождений и рудных полей изучаемой нами части территории России. В результате здесь создавалась очень сложная современная геологоструктурная и геодинамическая ситуация, обусловившая повышенную степень напряженности и удароопасности массивов горных пород, где расположены рудные месторождения.

В качестве первой стадии учета этих особенностей целесообразно выполнить анализ современного поля тектонических напряжений в районе эксплуатируемых месторождений. Ниже подробнее остановимся на одном из вариантов теоретического определения параметров современного поля тектонических напряжений (далее ПТН) и их распределения в массиве горных пород, вмещающих удароопасные месторождения.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Для оценки региональных напряжений в земной коре в последние годы широко применяются численные методы. В рамках проблемы прогнозирования опасных проявлений горного давления при подземном освоении недр исследования современных природных полей напряжений выполнялись для условий Кольского полуострова, Урала, Алтай-Саянской горной области и ряда других регионов [8, 18, 26, 28]. Геотектоническая специфика названных территорий существенно отличается от описанной выше. При постановке задачи моделирования напряженного состояния авторы указанных работ руководствовались следующими рабочими гипотезами: а) региональные поля тектонических напряжений формируются в результате взаимодействия литосферных плит в зонах субдукции, столкновения плит, скольжения и сдвига относительно друг друга; б) земная кора разбита системами разломов различного ранга на блоки, размеры которых изменяются от нескольких сантиметров до десятков и сотен метров.

Последнее утверждение базируется на блочно-иерархичной модели земной коры М.А. Садовского, согласно которой любой блок определенного порядка (ранга) состоит из более мелких, сам являясь частью более крупного блока. Линейные размеры блоков не произвольны, а формируют дискретный ряд с коэффициентом $3,33 \pm 0,95$ [19]. Система блоков массива горных пород в земной коре находится в постоянном взаимодействии и толчкообразном движении по границам слагающих ее блоков, как в естественных условиях, так и под действием изменения ее

напряженного состояния, вызванного техногенным воздействием [12].

Применительно к изучаемому нами участку земной коры в зоне сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского поясов учет только блоковой составляющей местных тектонических движений, по-видимому, не позволит получить полную картину современного поля тектонических напряжений, поскольку для региона характерен сводово-глыбовый характер дислокаций. Однако предлагаемый подход позволит выявить главные характеристики современного поля тектонических напряжений, которые впоследствии могут быть детализированы и уточнены.

Разработка расчетной модели для оценки напряженного состояния участка земной коры, к которому приурочены удароопасные месторождения Дальнего Востока, выполнялась в два этапа. Первый этап включал в себя выбор и обоснование границ расчетной области и выделение ее блочной структуры. Вторым этапом являлось обоснование механических свойств среды и условий нагружения моделируемой области.

В региональном геодинамическом плане месторождения находятся в пределах Амурского геоблока, который, по данным Ф.Г. Корчагина, охватывает юг Сибирской платформы и ее вогнутую часть, начиная от Байкальской рифтовой зоны Центрально-Азиатского складчатого пояса, захватывает часть Сино-Корейской платформы и Сихоте-Алинский сегмент Тихоокеанского складчатого пояса [5]. При обосновании его границ учитывались, прежде всего, сейсмотектонические и сейсмические данные, отражающие современное напряженно-деформированное состояние земной коры региона. Они несколько отличаются от границ одноименного геоблока, выделяемого Л.И. Красным по структурно-вещественным и геофизическим признакам [6]. Положение границ Амурского геоблока близко к положению границ Амурской литосферной плиты, выделяемой в работах [20, 25].

Для реализации принятого подхода введем некоторые допущения. Линии границ исходного блока в модели отвечают не зонам разломов, а их осевым линиям. Сами же зоны разломов имеют изменяющуюся по простирианию ширину (от десятков до первых сотен километров) при длине более 1000 км. В качестве исходного блока была взята северо-восточная часть Амурского геоблока, северной и восточной границами которого приняты, соответственно, восточный фланг Становой зоны разломов и Сахалино-Хоккайдская зона разломов (рис. 3). Становую зону разломов мы условно продлили до побережья Охотс-

кого моря в субширотном направлении. Основанием для такого решения послужили геофизические данные, согласно которым от северной оконечности острова Сахалин под водами и осадками Охотского моря в северо-западном направлении прослеживаются скрытые сейсмоактивные разломы, которые могут соединять Становую и Сахалино-Хоккайдскую зоны разломов [4, 27]. Возможным северо-западным продолжением этих разломов на континенте является известный Улканский разлом.

В качестве южной границы исходного блока в пределах материка принята Сино-Корейская зона разломов, которую выделяло целый ряд исследователей [6, 9 и др.]. Западная часть этой зоны разломов соответствует Внутренне-Монгольской оси, а восточная – разлому Вэй-бэй [14]. На восточном продолжении этой зоны, под водами и осадочным чехлом впадины Японского моря, вдоль бровки его шельфа и далее на восток до 138° в.д. по геофизическим данным прослеживается субширотный разлом, условно продленный до о. Хоккайдо с целью оконтуривания исходного блока и соединения с Сахалино-Хоккайдской зоной разломов.

Западная граница исходного блока, взятая в качестве опорной, проведена условно вдоль 122 граду-

са в.д., исходя из условий и особенностей постановки и решения задачи численными методами.

Мозаичная структура исходного блока (рис. 3) определялась на основе морфометрического анализа с учетом структурно-вещественных и сейсмотектонических признаков по методике, изложенной в работе [12]. Всего в пределах исходного блока было выделено 8 аналогичных элементов меньшего ранга. Границами этих блоков являлись глубинные разломы, хорошо выраженные в рельефе и геофизических полях, такие как Сихотэ-Алиньский и Западно-Туранский разломы, зона разломов Тан-Лу и другие. При этом расчетная схема несколько упрощалась, разломы, разделяющие блоки, спрямлялись. На границах между блоками и разломными зонами предполагалось жесткое сцепление без разрыва сплошности. Толщина контактной зоны (тектонического шва) в модели составляла $(2-5) \cdot 10^{-2}$ от линейного размера блока [7]. Модуль деформации (модуль Юнга) материала E_b , слагающего геоблоки, составляет 10^4 МПа. Модуль деформации геоматериала в разломных зонах $E_p = 10^3$ МПа. Коэффициент Пуассона геоблоков принят равным $\nu_b = 0,25$, а для разломных зон $\nu_p = 0,3$.

При обосновании условий внешнего нагружения моделируемой области учитывались данные о современной геодинамической активности данного участка земной коры и оконтуривающих ее тектонических зон. Из последних наибольшей геодинамической активностью характеризуются Становая и Сахалино-Хоккайдская зоны разломов, принятые в качестве, соответственно, северной и восточной границ исходного блока.

В неотектоническом отношении Становая зона разломов соответствует осевой части и северному крылу субширотного Станового поднятия, ограниченного с севера Южно-Алданским понижением, а с юга – понижением в бассейне р. Гилуй и Верхне-Зейской впадиной. Поднятие и понижения являются южной частью системы субширотных чередующихся поднятий и опусканий, осложняющих Алдано-Становой свод и сформировавшихся, по мнению ряда авторов [17], в условиях одностороннего сжатия, ориентированного с ЮЗ на ССВ и затухающего в этом направлении. Подвижность рассматриваемой зоны подтверждается совпадающей с ней в плане субширотной полосой очагов землетрясений, прослеживаемой от бассейна среднего течения р. Олекмы до Удской губы Охотского моря и названной Олекмо-Становой сейсмической зоной (ОСЗ) [20]. В рельефе Становая зона разломов совпадает с водораздельной частью и северным склоном одноименного субширотного хребта, а ее ось имеет ломано-ли-

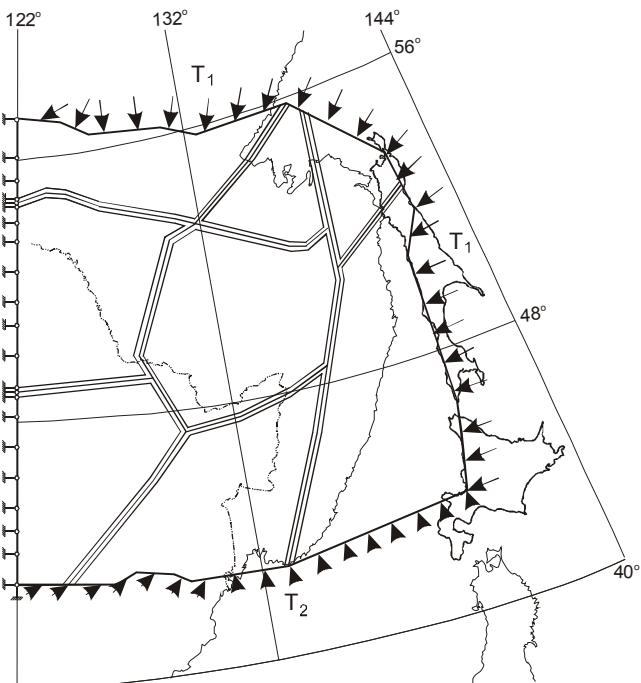


Рис. 3. Расчетная схема для моделирования региональных полей напряжений в пределах восточной части Амурского геоблока.

Пояснения в тексте.

Таблица 1. Параметры фокальных механизмов наиболее крупных землетрясений юга Дальнего Востока.

№ п/п	Дата	Координаты эпицентра, град		Магнитуда	Азимут направления действия главных напряжений, град			Тип подвижки в очаге
		с.ш.	в.д.		σ_1	σ_2	σ_3	
Становая зона разломов								
1	09.04.1971	56,9	133,1	4,4	276	136	30	Взбросо-сдвиг
2	14.06.1971	56,2	123,7	5,9	162	76	252	Левый сдвиг
3	09.08.1972	56,9	127,7	4,9	149	267	2	Взброс
4	01.11.1977	55,9	130,6	4,9	93	224	356	Правый сдвиг
5	27.04.1979	55,9	130,5	4,5	98	249	345	Взброс с правым сдвигом
6	20.04.1989	57,2	122,2	6,6	340	158	249	Взбросо-сдвиг
Сахалино-Хоккайдская зона разломов								
1	2.10.1964	51,9	143,3	5,75	139	18	242	Правый сбросо-сдвиг
2	5.09.1971	46,47	141,13	7,5	355,5	194,5	98,5	Правый взбросо-сдвиг
3	27(28).05.1995	52,76	143,18	7,6	153	324-333	62-63	Правый взбросо-сдвиг
4	4(5).08.2000	48,81	142,38	6,7-6,8	144-201	343-354	73-95; 260 157 135 45	Левый сдвиго-взброс
5	10.1996–9.2000	44-46	141-143	Нет данных	200	Нет данных	110	Нет данных
					183		93	
					169		79	

нейную конфигурацию, связанную, вероятно, со сложным характером деформаций в пределах зоны, в т.ч. и современных, о чем свидетельствует изменчивость ориентировок осей напряжений в очагах регистрируемых здесь в последние десятилетия наиболее сильных землетрясений [23] (табл. 1).

Из таблицы видно, что современное ПТН в пределах Становой зоны разломов характеризуется устойчивым субгоризонтальным положением оси максимальных главных нормальных напряжений σ_1 (сжатия), а ее ориентировка изменяется по простиранию зоны с ВСВ (на западном фланге) через субдолготную на ССЗ (в центре), а затем обратно – на ССВ (на восточном фланге). Непосредственно для расчета характеристик ПТН внутри исходного блока были взяты проекции ориентировок осей σ_1 в очагах выбранных землетрясений на горизонтальную плоскость, спроектированные на линию генерального простирания оси Становой зоны разломов.

Сахалино-Хоккайдская зона разломов имеет выдержанное субмеридиональное простижение и протягивается от северного окончания острова Сахалин до южного окончания острова Хоккайдо более чем на 1000 км при ширине от нескольких десятков до первых сотен км. Она соответствует линейно вытянутому в субмеридиональном направлении неотектоническому поднятию, ограниченному на севере и востоке впадинами Охотского моря, на западе – впадинами Татарского пролива и Японского моря, на юге – Тихим океаном. В рельефе эта зона пространственно совпадает с островами Сахалин и Хоккайдо.

В современном геодинамическом плане Сахалино-Хоккайдская зона разломов является активной тектонической границей, разделяющей Охотоморский и Амурский геоблоки. Высокая тектоническая активность зоны подтверждается совпадающей с ней в плане узкой и протяженной субмеридиональной полосой очагов землетрясений [4, 5], в пределах которой выделяются 4 ареала наиболее сильной сейсмичности.

Общее ПТН в пределах Сахалино-Хоккайдской зоны разломов характеризуется выдержаненным субгоризонтальным положением оси сжатия, ориентировка которой изменяется от ВСВ в северной части зоны до субширотной – в южной. Для расчета ПТН в пределах исходного блока из имеющихся современных геодинамических данных по Сахалино-Хоккайдской зоне разломов были взяты ориентировки оси “сжатия” в очагах прежде всего самых сильных землетрясений, характеризующихся максимальными объемами напряженных пород в недрах и наиболее адекватно отражающих их напряженное состояние в пределах рассматриваемой зоны разломов (табл. 1) [21, 22].

Сино-Корейская зона разломов, являющаяся южной границей исходного блока, характеризуется меньшей геодинамической активностью, чем рассмотренные выше тектонические зоны. Восстановленные по сейсмологическим данным оси главных нормальных напряжений σ_1 меняют свою ориентировку от субмеридиональной в пределах восточной и центральной части южной границы до северо-восточной на ее западном фланге.

Величина внешней тектонической нагрузки, действующей по границам исходного блока, задавалась с учетом схемы районирования М.В. Гзовского (рис. 2) и составила: по северной и восточной границам $T_1 = 70 \text{ MPa}$; по южной – $T_2 = 30 \text{ MPa}$.

Задачу о напряженном состоянии верхней части земной коры в пределах Амурского геоблока решали методом конечных элементов (МКЭ), основная идея которого состоит в аппроксимации любой непрерывной величины (например, перемещения) дискретной моделью, строящейся на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе. Реализацию МКЭ осуществляли с помощью разработанного в ИГД ДВО РАН пакета прикладных программ для ПК "NETSFEM", ориентированного на решение задач в упругой двумерной постановке. Исследовали плоское напряженное состояние, в котором осевая главная деформация $\varepsilon_z \neq 0$, напряжения $\sigma_z = 0$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Расчеты напряженного состояния массива пород выполнены для двух вариантов: а) случай однородной сплошной среды, когда исходный блок является цельным; б) исходный блок разделен на блоки меньшего ранга, согласно схеме на рис. 3.

Анализ полученных результатов показал, что в однородном блоке напряжения σ_x (ориентированные в субширотном направлении) и σ_y (ориентированные

субмеридионально) распределяются по его площади относительно равномерно. В пределах исходного блока напряжения σ_x и σ_y колеблются в пределах от 0,8 до 1,15 T , где $T=(T_1+T_2)/2$. В центральной части блока $\sigma_x \approx T$.

Совсем другая картина распределения напряжений складывается в случае, когда исходный геоблок сложен блоками меньшего ранга (рис. 4). Характер напряженного состояния в этом случае определяется пространственным положением блока и ограничивающих его разломов, формой блока, а также величиной и направлением усилий, действующих на границе исходного геоблока. Напряженное состояние исследуемой части Амурского геоблока весьма неоднородно: на одних участках – преимущественно вблизи разломных зон – отмечается некоторое снижение напряжений до 0,7–0,8 T , на других – рост напряжений до 1,4 T и более. В центральной области большинства блоков поле напряжений более однородно, в то время как в зоне влияния разломных зон напряженное состояние намного сложнее. Здесь отмечается более высокий уровень касательных напряжений.

На рис. 5 показаны ориентация главных напряжений σ_1 и σ_2 и их соотношение σ_1/σ_2 (крестики) в отдельных точках геоблоков.

Установлено, что в рассматриваемой части Амурского геоблока преобладают субширотные напряжения, по величине в 1,2 раза и более в среднем

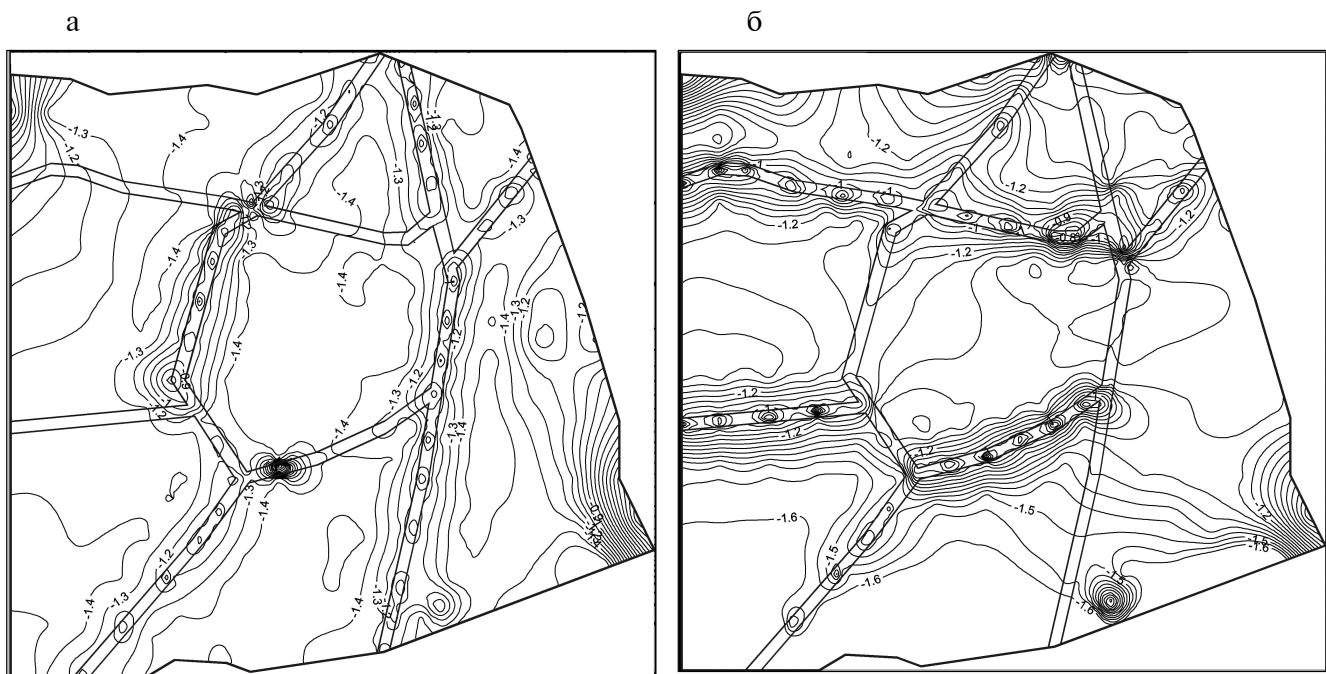


Рис. 4. Характер распределения напряжений в пределах восточной части Амурского геоблока: а – σ_x/T ; б – σ_y/T .

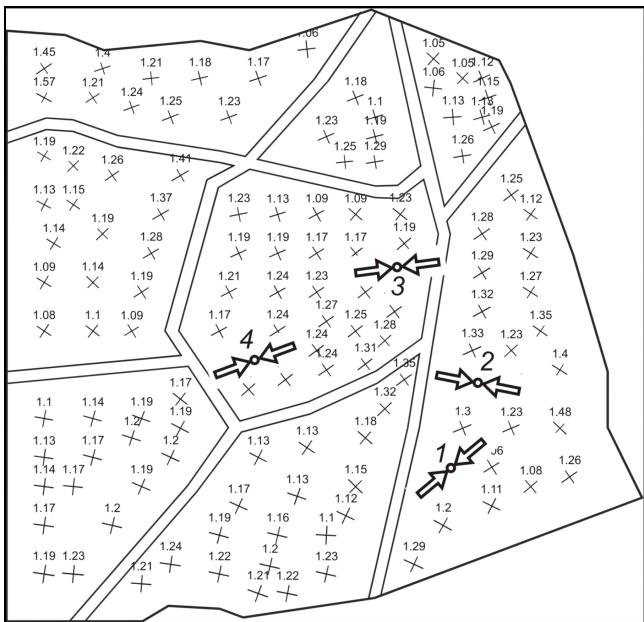


Рис. 5. Ориентация и соотношение главных субгоризонтальных напряжений в пределах восточной части Амурского геоблока.

Стрелками показаны направления действия наибольших сжимающих напряжений в массивах, вмещающих месторождения.

1 – Николаевское и Южное; 2 – Восток-2; 3 – Солнечное и Перевальное; 4 – Хинганско.

превышающие напряжения, ориентированные в субмеридиональном направлении. Наиболее выдержанной является ориентация главных напряжений в центральном блоке, в то время как в пограничных блоках наблюдается отклонение до $40\text{--}50^\circ$ в ориентации главных напряжений при удалении от границ исходного блока.

Результаты моделирования, в целом, удовлетворительно согласуются с данными о параметрах полей напряжений в массивах горных пород ряда рудных месторождений Дальнего Востока, определенных тектонофизическими и инструментальными методами (табл. 2) [10, 13, 16]. При этом отметим, что напряженное состояние массивов, вмещающих ряд месторождений, характеризуется сдвиговым типом. Об этом, в частности, свидетельствуют субгоризонтальные борозды и штрихи скольжения, наблюдавшиеся в швах тектонических нарушений, вскрытых подземными горными выработками. Данное обстоятельство в целом подтверждает развиваемое в работах В.П. Уткина (1989, 1997, 2003 и др.) важное для горной геомеханики предположение о приуроченности основных рудных районов Дальнего Востока к глобальной сдвиговой зоне.

Указанный автор считает, что вдоль восточного края Евроазиатского континента, вероятно в мезозое, заложилась левосторонняя сдвиговая система [1]. В процессе длительного развития сдвиги многократно активизировались. В результате в пределах глобальной зоны фиксируются многочисленные сдвиговые дислокации различного вида. Это – протяженные сдвиги северо-северо-восточного простирания, которые ограничивают узкие тектонические блоки и линзы, а также косоориентированные к ним взбросы, надвиги, взбросо-надвиги. По данным массовых замеров слоистости, ориентировка слоев в пределах сдвиговых зон развернута по отношению к фону на $20\text{--}30^\circ$ против часовой стрелки. Разворот слоев объясняется проявлением механизма вращения в сдвиговых зонах. Согласно данным глубинного сейсмозондирования, подобные зоны являются крутопадающими ($70\text{--}80^\circ$) разрывными структурами, которые проникают в верхнюю мантию.

Вышеизложенное, в том числе, определяет сложную структурно-динамическую обстановку в пределах рудных полей месторождений региона. Отмеченная структурно-кинематическая особенность восточной окраины Азии также является достаточно специфичной, и это обстоятельство потребуется учесть в будущем при последовательном усложнении модели исходного расчетного блока. Уточненная модель должна учитывать роль сдвигово-магматического режима в формировании современного поля тектонических напряжений.

Тем не менее, результаты первого этапа исследований дают основания считать принятый для оценки региональных напряжений подход применимым для построения обобщенной геомеханической модели тектонически напряженного породного массива блочного строения. Полученные данные о характере распределения поля напряжений в пределах восточной части Амурского геоблока, которые на данном этапе исследований носят в большей степени качественный характер, предполагается уточнить в процессе последующих стадий моделирования.

Для детализации полей напряжений в районе конкретных месторождений, особенно приуроченных к крупным разломам, может быть использован предложенный нами в работе [15] принцип, заключающийся в дополнении регионального поля напряжений полями локальных напряжений, закономерно формирующимися вокруг активных тектонических нарушений. При обосновании данного принципа мы опирались на разработанную в ИФЗ РАН схему распределе-

Таблица 2. Параметры главных напряжений и элементы залегания рудных тел опасных и склонных к горным ударам месторождений Дальнего Востока.

Месторождения	Угол падения рудных тел, град.	Азимут простирания рудных тел, град.	Параметры главных напряжений (в числителе – азимут направления действия, в знаменателе – величина напряжений)		
			(σ_1) субширотное	(σ_2) меридиональное	(σ_3) вертикальное
Николаевское	0–15	80–100	$\frac{45^\circ}{2,5\gamma H^*}$	$\frac{135^\circ}{1,5\gamma H}$	$\frac{100^\circ}{\gamma H}$
Южное	45–80	55	$\frac{55^\circ}{1,8\gamma H}$	$\frac{162^\circ}{\gamma H}$	$\frac{260^\circ}{\gamma H}$
Хинганское	70–90	–	$\frac{250^\circ}{2,7\gamma H}$	$\frac{160^\circ}{\gamma H}$	$\frac{290^\circ}{\gamma H}$
Перевальное	70–90	290–320	$\frac{83^\circ}{2,0\gamma H}$	$\frac{290^\circ}{\gamma H}$	$\frac{188^\circ}{\gamma H}$
Восток-2	50–90	50–53	$\frac{283^\circ}{2,5\gamma H}$	$\frac{192^\circ}{1,3\gamma H}$	$\frac{96^\circ}{\gamma H}$

^{*)} γ – удельный вес пород, кг/м³; H — глубина от поверхности, м.

ния напряжений в окрестностях разрыва, согласно которой напряжения в зоне его влияния меняют свою первоначальную ориентировку и действуют строго определенным образом [11].

С использованием этого подхода была разработана геодинамическая модель и определены параметры поля напряжений в районе Хинганского месторождения, которые впоследствии были подтверждены в процессе непосредственных шахтных измерений в подземных горных выработках [3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, рудные месторождения юга Дальнего Востока характеризуются сложным напряженным состоянием массива вмещающих их горных пород, которое, прежде всего, связано с природной спецификой формирования структуры земной коры на этой территории. Они могут быть отнесены к категории еще недостаточно изученных типовых объектов геомеханических исследований, которые отличаются от известных аналогов дополнительно тем, что расположены в зоне влияния Сино-Индонезийской области – активной сейсмической структуры новейшего времени. Последнее обстоятельство уникально для России. Оно требует организации постоянного контроля удароопасности разрабатываемых массивов горных пород, повышения точности и оперативности прогноза опасных проявлений горного давления, т.е. серьезного усовершенствования методов и средств

геомеханического мониторинга применительно к условиям региона.

В качестве первого этапа автором выполнена реализация методом конечных элементов обобщенной расчетной модели, составленной в рамках представлений о блочно-иерархичном строении земной коры и с учетом геодинамической характеристики основных элементов этого строения на исследуемой территории. Показано, что этот подход дает возможность оценить региональное поле современных напряжений в области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского поясов.

Установлено, что блоковое строение участка земной коры в пределах восточной части Амурского геоблока усложняет исходное поле тектонических напряжений и вызывает переориентацию и изменение соотношения главных субгоризонтальных напряжений.

Выявленный в массивах, вмещающих ряд месторождений Дальнего Востока, сдвиговый тип напряженного состояния указывает на существенное влияние глобальной сдвиговой зоны, заложенной вдоль восточного края Евроазиатского континента, на формирование современной структуры рудных полей месторождений. Изложенное потребует усложнения расчетной модели в будущем.

Данные о характере распределения поля напряжений в пределах восточной части Амурского геоблока могут быть уточнены с использованием принципа, заключающегося в дополнении регионального

поля напряжений полями локальных напряжений, за-
кономерно формирующимися вокруг активных тек-
тонических нарушений.

Автор выражает признательность чл.корр. РАН
Родионову С.М., д.г.-м.н. Саксину Б.Г. и научному со-
труднику Пересторонину А.Н. за ценные советы и
помощь при подготовке настоящей работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геодинамика, магматизм и металлогенез Востока России: в 2 книгах / Под. ред. А.Н. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. 981 с.
2. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.
3. Динамические проявления горного давления на Хинганском руднике / И.Ю. Рассказов, Г.А. Курсакин, Б.И. Берман и др. // Горный журнал. 1992. № 3. С. 56–60.
4. Злобин Т.К. Тектонические границы Охотской литосферной плиты // Тектоника, глубинное строение и геодинамика Востока Азии: III Косыгинские чтения, 23–25 января 2001 г., г. Хабаровск. Хабаровск: ИТИГ ДВО РАН, 2001. С. 142–159.
5. Корчагин Ф.Г. Геодинамика Амурского геоблока / Проблемы геодинамики и прогноза землетрясений: I Российско-Японский семинар, Хабаровск, 26–29 сентября 2000 г. / Под. ред. Ф.Г. Корчагина. Хабаровск: ИТИГ ДВО РАН, 2001. С. 18–39.
6. Красный Л.И. Геология региона Байкало-Амурской магистрали. М.: Недра, 1980. 159 с.
7. Курленя М.В., Опарин В.Н., Еременко А.А. Об отношении линейных размеров блоков горных пород к величинам раскрытия трещин в структурной иерархии массивов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1993. № 3.
8. Леонтьев А.В., Назаров Л.А., Назарова Л.А. Модельные представления полей региональных напряжений для Алтая-Саянской горной области // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1996. № 4. С. 53–61.
9. Nikolaev V.B., Vrublevskiy A.A., Akmadulin V.A., Kuznetsov V.E. Геодинамика и сейсмическое районирование материевой части Дальнего Востока. Владивосток: ДВО РАН, 2000. 90 с.
10. О напряженно-деформированном состоянии Николаевского месторождения / В.Д. Барышников, М.В. Курленя, А.В. Леонтьев и др. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1982. № 2. С. 3–11.
11. Осокина Д.Н., Цветкова Н.Ю. Изучение локального поля напряжений и прогноз вторичных нарушений в окрестностях тектонических разрывов и в очагах землетрясений с учетом третьего главного напряжения // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука, 1979. С. 163–184.
12. Петухов И.М., Батугина И.М. Геодинамика недр. М.: Недра, 1996. 217 с.
13. Повышение эффективности подземной разработки рудных месторождений Сибири и Дальнего Востока / А.М. Фрейдин, В.А. Шалауров, А.А. Еременко и др. Новосибирск: Наука, СИФ, 1992. 177 с.
14. Подгорный В. Я. Плотностное строение литосферы юга российского Дальнего Востока и северо-востока Китая // Тектоника, глубинное строение и геодинамика Востока Азии: III Косыгинские чтения, 23–25 января 2001 г., г. Хабаровск. Хабаровск: ИТИГ ДВО РАН, 2001. С. 121–134.
15. Рассказов И.Ю. Исследование особенностей формирования поля напряжений в районе Хинганского оловорудного месторождения // Геодинамическое районирование недр. Кемерово, 1991. С. 94–101.
16. Рассказов И.Ю., Курсакин Г.А. Оценка и контроль удароопасности массива горных пород на рудниках. Владивосток: Дальнаука, 2001. 167 с.
17. Роль разломов в формировании тектонической структуры юга Дальнего Востока / Л.М. Парфенов, Б.А. Натальин, А.А. Врублевский, Л.П. Карсаков, В.В. Юшманов // Разломы и эндогенное оруденение Байкало-Амурского региона. М.: Наука, 1982. С. 21–34.
18. Савченко С.Н., Козырев А.А., Мальцев В.А. Напряженное состояние блочного строения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1994. № 5. С. 38–47.
19. Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы // Докл. АН СССР. 1979. Т. 247. № 4.
20. Сейсмотектоника Якутии и проблема выделения границ литосферных плит на Северо-Востоке Азии / В.С. Имаев, Л.П. Имаева, Б.М. Козьмин, С.В. Слепцов, М.Ф. Третьяков // Проблемы геодинамики и прогноза землетрясений: I Российско-Японский семинар, Хабаровск, 26–29 сентября 2000 г. Хабаровск: ИТИГ ДВО РАН, 2001. С. 7–17.
21. Старовойт О.Е., Габсатарова И.П., Коломиец М.В., Чепкунас Л.С. Оперативное определение параметров очага разрушительного Нефтегорского землетрясения 27(28) мая 1995 г. // Нефтегорское землетрясение 27(28).05.1995 г. Информационно-аналитический бюллетень ФССН. Экстренный выпуск, октябрь 1995 г. – М., 1995. 236 с.
22. Тамура Макото, Касахара Минору, Итияниги Масайоси, Сен Рак Се, Ким Чун Унг, Иващенко А. Сейсмичность Южного Сахалина и северной части о. Хоккайдо // Проблемы геодинамики и прогноза землетрясений: I Российско-Японский семинар, Хабаровск, 26–29 сентября 2000 г. Хабаровск: ИТИГ ДВО РАН, 2001. С. 96–108.
23. Тектоника, геодинамика и металлогенез территории Республики Саха (Якутия). М.: МАИК “Наука/Интерperiодика”, 2001. 571 с.
24. Тектоника, глубинное строение, металлогенез области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского пояса / Объен. зап. к тектонической карте м-ба 1:1500000. Владивосток; Хабаровск: ДВО РАН, 2005. 264 с.
25. Уломов В.И. Оценка сейсмической опасности и временная схема сейсмического районирования Сахалина // Нефтегорское землетрясение 27(28).05.1995 г. Информационно-аналитический бюллетень ФССН. Экстренный выпуск, октябрь 1995 г. М., 1995. 236 с.
26. Управление горным давлением в тектонически напряженных массивах // А.А. Козырев, В.И. Панин, С.Н. Савченко и др. Апатиты: КНЦ РАН, 1996.
27. Харахинов В.В., Гальцев-Безюк С.Д., Терещенков А.А. Разломы Сахалина // Тихоокеан. геология. 1984. № 2. С. 77–86.
28. Хронусов В.В., Константинова С.А., Барский М.Г. Оценка

региональных напряжений в верхней части земной коры Среднего Урала и Пермского Приуралья // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1999. № 4. С. 33–42.

29. Черкасов Р.Ф. Современная вулкано-сейсмическая актив-

ность Сино-Индонезийской области как следствие эксцен-тризации субъядра Земли // Тектоника, глубинное строе-ние и минерагения Востока Азии: V Косыгинские чтения. Материалы конференции / Под ред. С.М. Родионова. Ха-баровск: ИТиГ ДВО РАН, 2006. С. 76–80.

Поступила в редакцию 6 июля 2006 г.

Рекомендована к печати Ю.А. Мамаевым

I.Yu. Rasskazov

Numerical simulation of the present-day tectonic stress field in the Central Asia and Pacific belts junction area

The problem of numerical modeling of the present-day regional stress field in complex geodynamic and seismic conditions of the Central Asia and Pacific belts junction area is considered. An approach is suggested allowing assessment at a first approximation of the character of the regional stress field to be taken into consideration in geodynamic investigations at deposits of the region dangerous in terms of mine shocks. Questions pertaining to the complication of the calculated model at subsequent stages of investigations are discussed.

Key words: Central Asia and Pacific belts junction area, ore deposits, mine shocks, numerical modeling, regional stress field.

БАТИМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТИХОГО ОКЕАНА ПО ЦИФРОВЫМ ДАННЫМ ETOPO 2'

Б.А. Казанский

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильчева ДВО РАН, г. Владивосток

Новые результаты статистического анализа распределения глубин Тихого океана на основе цифровых данных ETOPO 2' представлены в форме батиграфических и батиметрических кривых и поверхностей с интервалом 100 м по глубине для всего океана и для различных его частей, а также по 5-градусным широтным и 10-градусным долготным зонам. Отмечается крайнее разнообразие и отсутствие корреляции типов распределений глубин по широтным зонам. Выявлено два стиля эволюции рельефа дна Тихого океана, соответствующих океанической коре мезозойского и кайнозойского возраста, отличающихся характером распределения глубин и определяющих широтную и долготную асимметрию Тихого океана.

Ключевые слова: рельеф дна, батиграфическая кривая (поверхность), батиметрия, средняя глубина, асимптотически-пределная глубина, модальная глубина, распределение глубин, асимметрия, Тихий океан.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ распределения глубин (батиметрический анализ) в океане является непременной составляющей в геолого-геофизическом анализе. Но приводимые в Атласе [1] морфометрические данные по Тихому океану уже существенно устарели, а в новом геолого-геофизическом атласе Тихого океана [12] статистические батиметрические данные вообще не приводятся. Существующие общедоступные цифровые базы данных по топографии земной поверхности (ETOPO) позволяют анализировать батиметрию океанов более детально, чем это было возможно по картам [1, 2, 11]. Однако построенная, например, по данным ETOPO 30' гистограмма плотности вероятности распределения высот для всей поверхности Земли с интервалом высот 50 м [14] обнаруживает явную несоразмерность между размерами расчетных площадок ($30' \times 30'$) и выбранным интервалом высот, сопоставимым с точностью определения высот на таких площадках. В итоге, на полученной гистограмме имеется несколько «выбросов» на отдельных интервалах глубин в океанах, не отражающих реальное их распределение. Гистограммы же плотности вероятности распределения глубин в океанах, рассчитанные Дэвидом Вёлкером (Devid Völker) по данным ETOPO 5' с интервалом глубин

250 м, представленные на сайте <http://userpage.fu-berlin.de>, недостаточно детальны для современного батиметрического анализа, к тому же в данных ETOPO 5' были обнаружены ошибки. В связи с изложенным, автором был выполнен батиметрический анализ океанов на основе данных ETOPO 2' [7], результаты которого, относящиеся к Тихому океану, излагаются в данной статье.

МАТЕРИАЛЫ И ПРОГРАММЫ ДЛЯ БАТИМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Экспериментально установлено, что для адекватного представления распределения высот (при сложном рельефе) соотношение между интервалом высот и длиной стороны квадратной сетки (расчетной площадки) не должно быть меньше 1–2 %. Поэтому нами для батиметрического анализа Тихого океана были выбраны данные ETOPO 2', ранее использованные В. Смитом и Д. Сэндвеллом (W. Smith, D. Sandwell) при построении известной карты “Measured and Estimated Seafloor Topography” масштаба 1:31 млн (по экватору) [13]. Данные, полученные для трапеций $5^\circ \times 5^\circ$ и $5^\circ \times 10^\circ$ с помощью Data Acquisition Form сайта <http://topex.ucsd.edu> для равномерной сетки в меркаторской проекции ($2' \times 2'$ в районе экватора) для широт от 72° с.ш. до 72° ю.ш., были пересчитаны в равноплощадные с интервалом

глубин 100 м, достаточным для построения непрерывных графиков распределения вместо традиционных гистограмм. Общее число точек равноплощадной сетки с глубинами от -1 м (нулевые отметки высот в данных ЕТОРО 2' крайне редки) в пределах использованных границ Тихого океана составило 13155809. Акватория Тихого океана почти полностью (исключая часть моря Росса) вписывается в широтные границы данных ЕТОРО 2'. Представленные ниже иллюстрации сделаны на основе полученных результатов (имеющихся, естественно, и в табличной форме). Значения площадей поверхности дна на приводимых иллюстрациях даются количеством точек равноплощадной сетки, каждой из которых соответствует площадь $\sim 13,7 \text{ км}^2$ (несферичность Земли не учитывалась).

Минимальный набор программ для выполнения данной работы включал программы Maple 9, Surfer 8, MS Office 2003, Bred 2, CorelXara 2. Математическая программа Maple использовалась для аналитических и статистических вычислений, построения графиков, гистограмм и 3-мерных поверхностей, программа Surfer использовалась для вычисления статистических характеристик распределений глубин по трапециям (более 10 различных характеристик одновременно), для сортировки данных в файлах базы данных по долготе или высоте (изначально данные ЕТОРО 2' отсортированы по широте) и для графических построений. Из офисных программ, помимо, естественно, текстового редактора Word, наиболее широко использовался табличный редактор Excel, на листах которого создавались таблицы-сводки частот и статистических характеристик распределений глубин океанов по 5-градусным широтным и 10-градусным долготным зонам, на основе которых стандартными средствами самой программы рассчитывалось и строилось большинство статистических графиков и диаграмм, иллюстрирующих данную работу.

Частоты распределения глубин, заносимые в таблицы Excel, определялись с помощью текстового редактора Bred 2, удобного тем, что он работает без разбивки на страницы и не имеет (в отличие от офисных программ) ограничений на длину файлов. Поэтому количество точек до заданной глубины в расчетной трапеции определялось по положению курсора (номеру строки, отображаемому в информационной строке), совмещаемого с последней точкой диапазона глубин, отсортированных в порядке увеличения с исключением высот > 0 м.

Графический редактор CorelXara использовался для оформления всех иллюстраций данной работы.

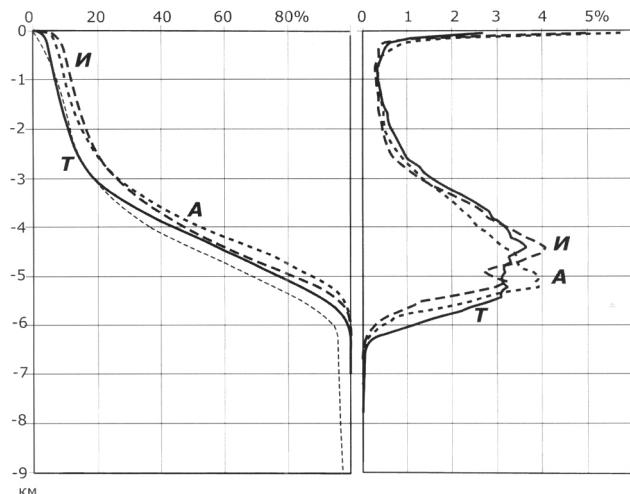


Рис. 1. Рассчитанные по данным ЕТОРО 2' с шагом 100 м батиграфическая (слева) и батиметрическая (справа) кривые Тихого (T) океана в сопоставлении с аналогичными кривыми Атлантического (A) и Индийского (I) океанов.

Тонким пунктиром показана батиграфическая кривая Тихого океана, приводимая в Атласе океанов [1].

РЕЗУЛЬТАТЫ БАТИМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

На рис. 1 представлена новая батиграфическая кривая (график интегральной или кумулятивной функции распределения глубин, $S(h)$) Тихого океана в сопоставлении с новыми батиграфическими кривыми других океанов (рассчитанных по тем же данным) и с батиграфической кривой Тихого океана, приведенной в Атласе океанов [1], а также батиметрические кривые (графики дифференциального распределения или плотности вероятности распределения глубин, $f(h) = -dS/dh$) трех океанов. Как видно из рис. 1, прежние представления о глубинах Тихого океана давали существенно завышенные значения, в основном, видимо, за счет хуже изученной южной части Тихого океана, на которую экстраполировались представления о более глубокой северной части океана. Полученная нами расчетная средняя глубина ложа Тихого океана (без окраинных морей) равна 4108 м, тогда как в Атласе океанов 1974 г. приводится величина 4334 м, а в [11] – 4273 м; средняя глубина Тихого океана с окраинными морями получена равной 3897 м (соответственно 3984 в [11]). Сопоставление новых батиметрических кривых трех океанов на рис. 1 показывает, как и ранее, существенно большую глубину Тихого океана (средние глубины Атлантического и Индийского океанов получились, соответственно, 3708 и 3629 м). Двувершинность

(бимодальность) распределений глубин во всех океанах выявлена впервые, хотя для Тихого океана еще в работе [11] отмечено уменьшение площади ступени 4500–5000 м по сравнению с соседними (4000–4500 м и 5000–5500 м). Примечательно, что максимальные значения плотности вероятности распределения глубин во всех океанах примерно одинаковы, а формы кривых свидетельствуют об общем для всех океанов законе распределения глубин.

Наиболее информативными в оценке распределений глубин в океанах являются, видимо, модальные значения распределений (глубины, соответствующие локальным максимумам или пикам плотности распределения) и асимптотически-предельная глубина $H_{\text{пп}}$, определяемая по пересечению касательной к нижней ветви батиметрической кривой с осью глубин. Значения этих глубин в меньшей мере подвержены искажениям из-за влияния подводных окраин континентов и островов, а также глубоководных желобов, чем обычно используемая средняя глубина (статистическое среднее или математическое ожидание).

Как видно по рис. 1, асимптотически-предельная глубина максимальна в Тихом океане ($H_{\text{пп}} = 6300$ м) и минимальна в Индийском. Средняя высота рельефа дна (равная разности между средней и предельной глубинами) получается равной 2192 м при прежней оценке в 2070 м [2]. “Запредельные глубины” – глубины больше $H_{\text{пред}}$, приходящиеся в основном на глубоководные желоба (аномальные отрицательные формы рельефа дна), – занимают менее 1% площади Тихого океана, при этом площади 100-метровых батиметрических ступеней в глубоководных желобах сокращаются примерно вдвое на каждые 100 м увеличения глубины. Максимальная глубина в Тихом океане, 10799 м, зафиксированная в данных ЕТОРО 2', расположена в его юго-западной части, в желобе Тонга (23,28° ю.ш. и 185,25° в.д.), несколько меньше максимальная глубина (10747 м) в северо-западной части Тихого океана, в Марианском желобе (11,37° с.ш. и 142,58° в.д.). Среднеквадратичное отклонение σ глубин Тихого океана получилось равным 1327 м, меньше, чем в Атлантическом (1640 м) и Индийском (1441 м) океанах.

Бимодальность распределения глубин Тихого океана связана с его ярко выраженной асимметрией как относительно экватора, так и меридиональной, как морфологической, так и возрастной, что отражают и батиметрические кривые, рассчитанные попарно для двух его частей (рис. 2, **C** и **Ю**, **B** и **3**), разделенных экватором или меридианом 150° з.д., почти

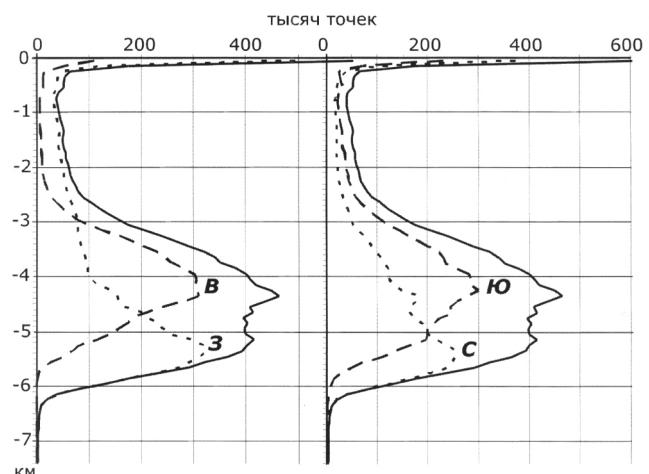


Рис. 2. Иллюстрация батиметрической асимметрии Тихого океана относительно экватора и меридиана 150° з.д.

C – батиметрическая кривая северной половины Тихого океана, **Ю** – батиметрическая кривая южной половины Тихого океана, **3** – батиметрическая кривая западной половины Тихого океана (западнее 150° з.д.), **B** – батиметрическая кривая восточной половины Тихого океана в сопоставлении с суммарной батиметрической кривой. Кривые построены в абсолютном масштабе количества точек (площадок 13,7 км²), приходящихся на 100-метровый интервал глубин.

совпадающим с возрастным рубежом 65 млн лет. Вся мезозойская океаническая кора сосредоточена в западной половине Тихого океана (точнее – в северо-западном секторе) со средней глубиной 3915 м ($\sigma = 1545$ м), примерно половина площади которой приходится на Западно-Тихоокеанскую зону перехода, а вся восточная половина Тихого океана со средней глубиной 3873 м ($\sigma = 1000$ м) имеет кору только кайнозойского возраста. Незначительное различие средних глубин восточной и западной половин Тихого океана при существенном различии модальных значений (порядка 1 км) объясняется влиянием мелководных окраинных морей, снижающих значение средней глубины западной части Тихого океана. Распределение глубин восточной части Тихого океана симметрично относительно средней глубины, тогда как распределение глубин в западной половине резко асимметричное. Аналогичны им распределения глубин в северной и южной частях океана со средними глубинами 4093 и 3727 м, соответственно. Как видно по рис. 2, два пика батиметрической кривой (локальные максимумы) Тихого океана, приходящиеся на интервалы глубин 4300–4400 и 5200–5300 м, соответствуют максимумам батиметрических кривых его асиммет-

ричных половин. Попарное подобие батиметрических кривых В-Ю и З-С свидетельствует о наличии линии симметрии Тихого океана с направлением СЗ-ЮВ. Такая линия (и соответствующая ей плоскость симметрии) выделена автором еще в 1983 г. и названа Тектоническим экватором [3]. Плоскость Тектонического экватора является унаследованной плоскостью симметрии литосферы Земли [4, 5], к которой приурочены экстремальные высоты и глубины рельефа.

Поскольку на большей части площади северной и западной половин Тихого океана представлена кора мезозойского возраста, а на большей части восточной и южной половин – кайнозойского, различие форм распределений на этих площадях можно интерпретировать как различие процессов рельефообразования (стилей эволюции) Тихого океана в мезозое и кайнозое (подтверждаемое и двукратным различием дисперсий σ^2), а соответствующие модальные значения суммарной кривой можно с полным обоснованием именовать мезозойским и кайнозойским.

Приведенные выше кривые (рис. 1 и 2) и числа являются, можно сказать, традиционными (стандартными) характеристиками рельефа дна, но цифровые данные позволяют рассчитать не только традицион-

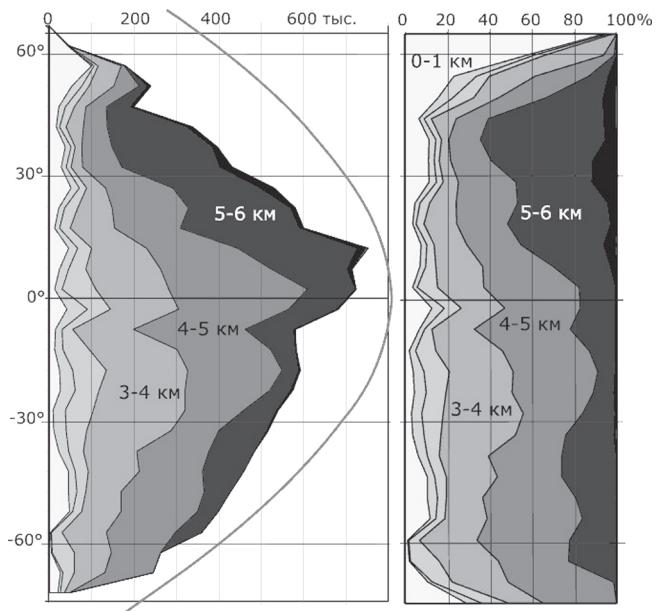


Рис. 3. Двухмерное распределение глубин (широтная батиграфическая поверхность) $S(h, \varphi)$ Тихого океана в проекции на координатную плоскость $S\varphi$ (слева); справа – нормированное распределение глубин океана в зависимости от широты.

Изолинии глубин представлены через 1 км при линейной интерполяции с шагом 5° по широте. Кривой синусоиды показано широтное распределение площади поверхности для одного полушария Земли.

ные одномерные распределения глубин $S(h)$ и $f(h)$, отображаемые батиграфическими и батиметрическими кривыми, но и впервые, видимо, рассматриваемые здесь пространственные (двухмерные) распределения $S(h, \varphi)$, $S(h, \lambda)$ или $h(S, \varphi)$, $h(S, \lambda)$, т.е. в зависимости от широты или долготы, а также их частные производные по глубине, широте и долготе. Так, на рис. 3 приводится двухмерное распределение $S(h, \varphi)$ Тихого океана в проекции на координатную плоскость “ $S\varphi$ ” в относительном (в %) и абсолютном (в количестве точек равномерной сетки) масштабе площади дна, рассчитанные по 5-градусным широтным зонам (всего 28 зон от 65° с.ш. до 72° ю.ш.). Для со-поставления масштаба распределения абсолютных площадей, кривой ($\cos \varphi$) очерчено широтное распределение площади одного полушария Земли (на Тихий океан приходится 70 % площади полушария). Как видно по рис. 3, распределение площади Тихого океана асимметрично относительно географического экватора (как и распределение континентальной коры) со смещением максимума распределения в зону $10-15^\circ$ с.ш. Минимум площади в распределении глубин почти на всех широтах приходится на интервал 1–2 км, который, видимо, следует считать гипсо-

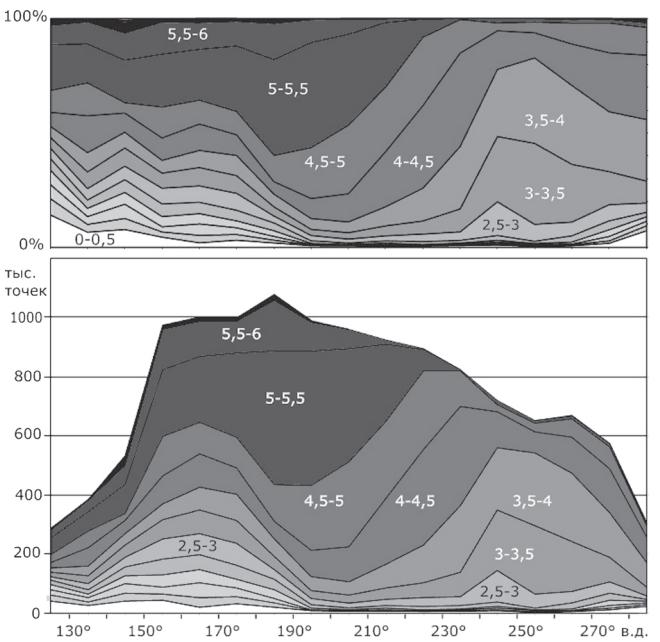


Рис. 4. Двухмерное распределение глубин (долготная батиграфическая поверхность) $S(h, \lambda)$ Тихого океана в проекции на координатную плоскость $S\lambda$ (внизу); вверху – нормированное (относительное) распределение глубин океана в зависимости от долготы.

Изолинии глубин представлены через 0,5 км при линейной интерполяции с шагом 10° по долготе.

метрической границей раздела континентальной и океанической коры. Максимальные глубины (> 6 км) сосредоточены, в основном, в северной части Тихого океана с наиболее древней океанической корой.

Долготное распределение $S(h, \lambda)$ глубин Тихого океана по семнадцати 10-градусным долготным зонам представлено на рис. 4 аналогичными проекциями батиграфической поверхности на координатную плоскость “ $S\lambda$ ”.

Из сравнения рис. 3 и 4 видно, что асимметрия Тихого океана в долготном распределении проявляется более четко, чем в широтном, что связано с распределением океанической коры по возрасту.

Дифференциальное распределение глубин по 5-градусным широтным зонам Тихого океана в абсолютном и в относительном масштабе показано на рис. 5 в виде “диаграмм областей с нарастанием” офисной программы MS Excel, отображающих как изменение общей суммы, так и изменение вклада отдельных значений. Обращает на себя внимание равномерность относительного широтного распределения глубин до 5 км при крайней неравномерности распределения больших глубин.

Из диаграммы для абсолютных значений плотности распределения видно, что бимодальность рас-

пределения начинает проявляться в широтном распределении только южнее 5° с.ш., выделенном на рис. 5 белой линией.

Дифференциальное распределение глубин Тихого океана по 10-градусным долготным зонам с востока на запад (аналогичное широтным распределениям рис. 5) в абсолютном и в относительном масштабах показано на рис. 6. Небольшие различия в абсолютных значениях рис. 5 и 6 связаны с тем, что на последнем не учтены площади мелководья Тихого океана западнее 120° в.д., куда попадают Южно-Китайское и Яванское моря. Бимодальность в долготном распределении начинает проявляться западнее 210° в.д. (т.е. от меридиана 150° з.д., который и послужил ранее линией для раздела Тихого океана на западную и восточную половины). В отличие от широтного распределения в долготном равномерность не просматривается и относительное распределение оказывается подобным абсолютному из-за того, что абсолютные размеры площадей долготных зон различаются существенно меньше, чем широтных.

Диаграммы, подобные представленным на рис. 5 и 6, можно, естественно, строить для любых акваторий, разделенных на широтные или долгот-

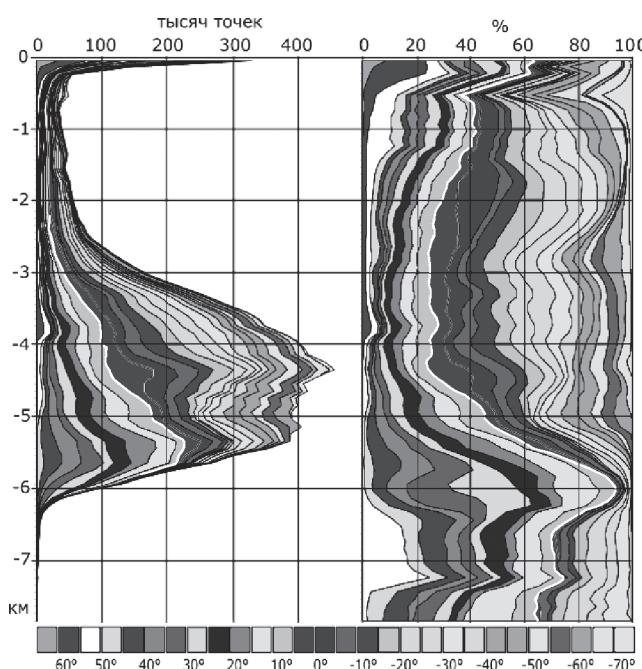


Рис. 5. Широтное дифференциальное распределение глубин (площадей 100-метровых батиметрических ступеней) Тихого океана по 5-градусным широтным зонам в абсолютном (слева) и относительном (справа) масштабах.

Белой линией маркирован 5° с.ш.

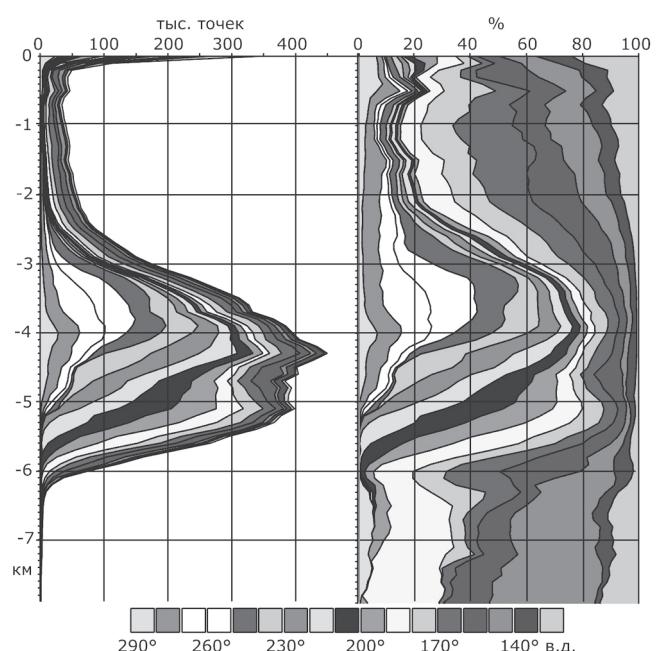


Рис. 6. Долготное дифференциальное распределение глубин (площадей 100-метровых батиметрических ступеней) Тихого океана по 10-градусным долготным зонам с востока на запад от 290° в.д. до 120° в.д. в абсолютном (слева) и в относительном масштабах.

ные зоны, а для каждой из этих зон, в свою очередь, строить “ортогональные” диаграммы, т.е. долготные для широтных зон и широтные для долготных, вплоть до минимальных областей, соответствующих исходным трапециям базы данных. Это создает богатые, совсем еще не реализованные возможности для батиметрического анализа океанов. Но подобные диаграммы искажают представления о характере распределения (или плотности распределения) глубин по отдельным областям диаграмм (кроме первой слева, наименее, как правило, информативной), поэтому для сравнительных характеристик рядов областей следует использовать раздельное представление батиметрических кривых для каждой области (долготной или широтной зоны). В качестве примера на рис. 7 представлены батиметрические кривые (графики плотности распределения глубин) двенадцати 5-градусных широтных зон северной половины Тихого океана, а на рис. 8 – кривые семнадцати 10-градусных долготных зон той же акватории. Кривые приведены в абсолютном масштабе с постоянным сдвигом и с отсечением верхних ветвей для глубин меньше 300 м, значения плотности для которых для некоторых зон выходят за пределы рисунка.

Графики рис. 7 отличаются разнообразием форм и отсутствием четкой корреляции между соседними зонами. Ни один из графиков не похож на сум-

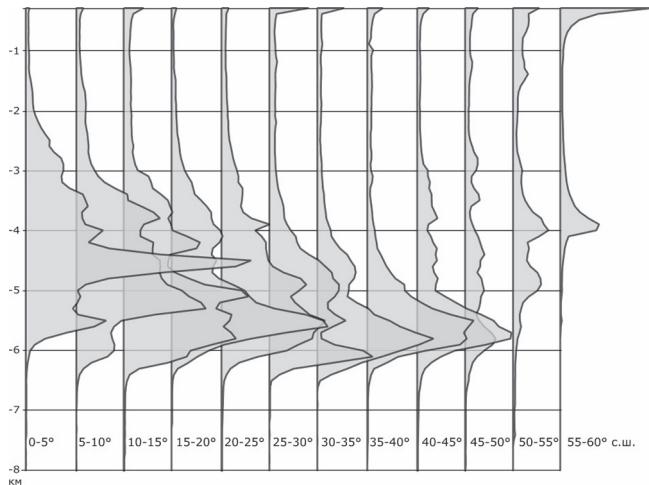


Рис. 7. Графики плотности распределения глубин по 5-градусным широтным зонам северной половины Тихого океана. Горизонтальный сдвиг между графиками соответствует 15000 точек в масштабе графиков.

Максимуму плотности в зоне 0–5° на глубине 4.5 км соответствует значение 67300 точек (9.12 % площади зоны), а на глубине 4.6 км – 62700 точек (8.5 %).

марную батиметрическую кривую Тихого океана, хотя большая часть широтных зон пересекает все возрастные границы океанической коры и все характерные структуры. Близкими для большей части графиков оказались только асимптотически-предельные глубины (порядка 6300–6400 м).

Максимум плотности на графике для широтной зоны 0–5° с.ш. является абсолютным максимумом для широтного распределения. Ему соответствуют самые выровненные площади океанического дна (с минимальной дисперсией глубин).

Графики рис. 8, напротив, характеризуются меньшим разнообразием форм и заметной корреляцией между соседними зонами. Асимптотически-предельные и модальные глубины показывают закономерное уменьшение с запада на восток по мере уменьшения возраста океанической коры. Но графиков, подобных батиметрической кривой Тихого океана, среди долготных зон не наблюдается уже по понятной причине: все долготные зоны северной половины Тихого океана практически параллельны возрастным границам океанической коры. Абсолютный максимум (49835 точек) среди представленных графиков находится в зоне 230–240° в.д.

На рис. 9 представлено долготное распределение для широтной зоны 0–5° с.ш., которое позволяет локализовать абсолютный максимум (самый ровный участок дна океана): этот максимум в долготном распределении с шагом 5° распадается на несколько максимумов для четырех трапеций 5°×5° в пределах Восточной котловины южнее разлома Клиппертон.

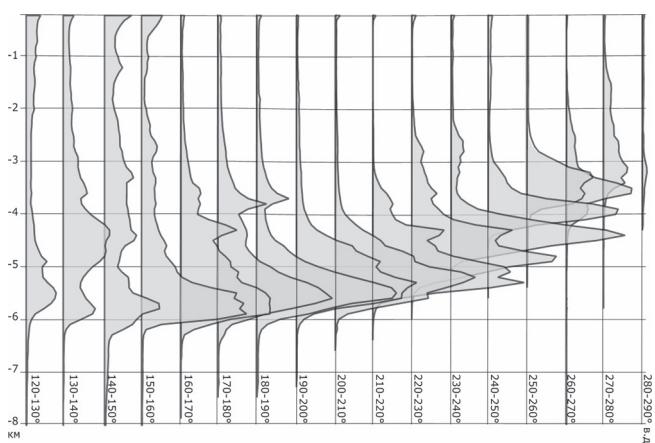


Рис. 8. Графики плотности распределения глубин по 10-градусным долготным зонам северной половины Тихого океана.

Горизонтальный сдвиг между графиками соответствует 10000 точек в масштабе графиков.

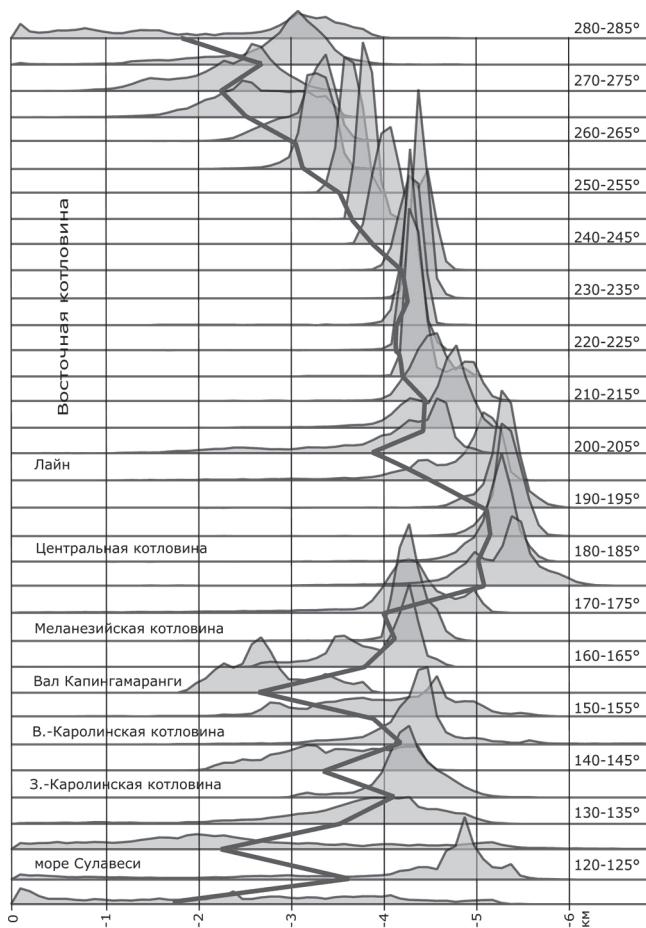


Рис. 9. Графики плотности распределения по 5-градусным долготным зонам широтной зоны 0–5° с.ш. и соответствующий им график средних глубин трапеций 5°×5°.

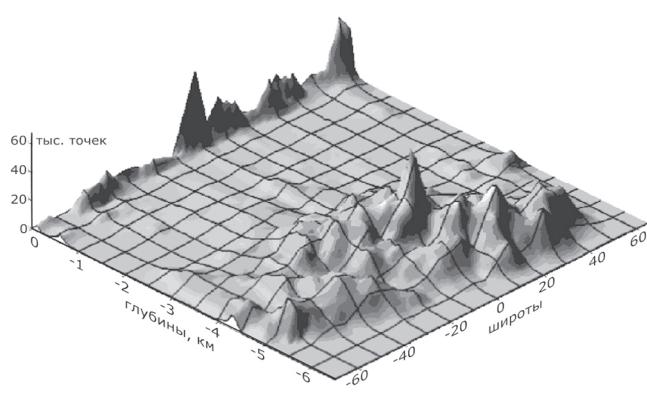


Рис. 10. Трехмерное изображение широтной батиметрической поверхности Тихого океана.

Приведенный на рисунке график значений средних глубин трапеций 5°×5° показывает систематический сдвиг средних глубин вверх от модальных, которые дают более информативное представление о глубинах, чем средние.

Поверхностную плотность широтного распределения глубин (широтную батиметрическую поверхность) Тихого океана в диапазоне от 0 до 6,5 км в зависимости от широты, $f(h, \varphi) = -\partial S/\partial h$, иллюстрируют рис. 10 и 11. На рис. 10 представлена 3-мерная модель батиметрической поверхности, а на рис. 11 – ее проекция на плоскость “ $h\varphi$ ”. Изолинии плотности даны через 5000 точек на 100-метровый перепад глубин. Абсолютный максимум плотности широтного распределения в 67300 точек (922000 км² или 9,12 % площади зоны) приходится на интервал глубин 4,5–4,6 км зоны 0–5° с.ш. Примечательно, что этот интервал совпадает с относительным минимумом на батиметрической кривой Тихого океана и соответствует, как отмечено выше, глубинам Восточной котловины. Второй максимум с глубинами 5,5–5,6 км на 20° с.ш. соответствует модальным глубинам Филиппинской и Северо-Западной котловин. Таким образом, эти два максимума расположены в полосе, приуроченной к Тектоническому экватору [3–5] – линии тренда максимумов – и не соответствуют “мезозойскому” и “кай-

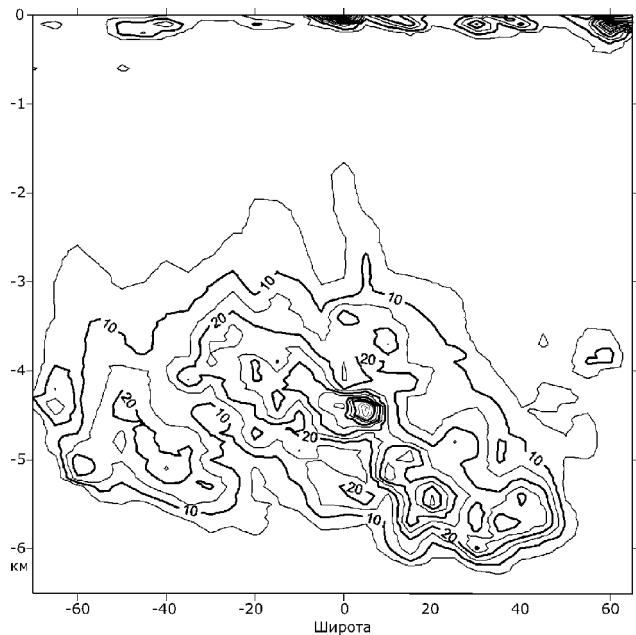


Рис. 11. Контурная карта широтной батиметрической поверхности Тихого океана.

Изолинии плотности проведены через 5 тысяч точек.

нозойскому” пикам плотности. Тренд относительного минимума на широтной батиметрической поверхности соответствует полосе, смещенной на 30° к югу и параллельной первой, совпадающей с осью древнего поднятия Дарвина. Она проходит через поднятия Каролинских островов, вала Капингамаранги, островов Кука, Туамоту, самую широкую часть Восточно-Тихоокеанского поднятия и по Чилийскому поднятию.

Как видно из рис. 10 и 11, широтная батиметрическая поверхность обладает довольно сложным рельефом (который, в свою очередь, может служить объектом морфометрического анализа), но при этом следует иметь в виду неравномерность сетки, по которой строились эти изображения (триангуляция с линейной интерполяцией по 65×28 точек), и отсутствие видимой корреляции между широтными батиметрическими кривыми (рис. 7). Для более точного отображения рельефа широтной батиметрической поверхности необходимо уменьшить ширину широтных зон (оптимально до 2° , тогда сетка станет равномерной, 65×70 точек), но для этого требуется переделать исходную базу данных.

Плотности долготного распределения изменяются в более широком диапазоне, чем широтного из-за большей площади долготных зон, а неравномерность сетки еще хуже (65×16 точек), поэтому иллюстрации долготной батиметрической поверхности здесь не приводятся, хотя коррелиованность долготных распределений даже при 10-градусном шаге довольно высокая (рис. 8). Максимумы плотности не совпадают по глубине с максимумами широтного распределения, но совпадают с локальными максимумами батиметрической кривой Тихого океана (т.е. с “мезозойским” и “кайнозойским” пиками плотности), а интервал плотности 5000–10000 точек на 100-метровый перепад глубин протягивается с глубин 5–6 км до мелководья, выделяя Западно-Тихоокеанскую зону перехода, батиметрический анализ которой выполнен отдельно [10]. Максимумы плотности долготного распределения локализованы на 180° в.д. (“мезозойский”) и 230° в.д. (“кайнозойский”).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты батиметрического анализа Тихого океана могут служить достаточно надежной основой для геолого-геофизических обобще-

ний по эволюции и геодинамике Тихого океана и при выяснении его происхождения.

Приведенными примерами не ограничиваются возможности батиметрического анализа по цифровым данным, даже в рамках стандартных средств программы MS Excel. Реализованные дополнительные возможности анализа рассмотрены в работах [6, 8, 9].

Работа выполнена в рамках ФЦП “Мировой океан”.

ЛИТЕРАТУРА

1. Атлас океанов: Тихий океан. ГУНиО МО СССР. 1974. 302 л.
2. Казанский Б.А. Батиметрическая функция Атлантического и Тихого океанов // Океанология. 1974. Т. XIV. Вып. 3. С. 489–492.
3. Казанский Б.А. Тектонический экватор Тихого океана // Тихий океан. Геология, геоморфология, магматизм: Тез. докл. Владивосток: 1983. С. 54–55.
4. Казанский Б.А. Тектоническая симметрия Тихого океана и ее связь с глобальными элементами симметрии / Геофизические исследования тихоокеанских активных окраин. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1983. С. 81–87.
5. Казанский Б.А. Ещё раз о симметрии и антисимметрии Земли // Закономерности строения и эволюции геосфер. Вып. VI. Хабаровск, 2004. С. 75–83.
6. Казанский Б.А. Потенциальная энергия рельефа как количественный показатель энергозатрат тектонических процессов // Тектоника земной коры и мантии. Тектонические закономерности размещения полезных ископаемых (Материалы XXXVII Тектонического совещания). Т. 1. М.: ГЕОС, 2005. С. 254–258.
7. Казанский Б.А. Результаты батиметрического анализа океанов по цифровым данным ЕТОРО 2' // Геология морей и океанов: Тез. докл. XVI Междунар. школы морской геологии. Т. II. 2005. С. 132–133.
8. Казанский Б.А. Гипсометрия крупнейших океанических островов // Геоморфология. 2005. № 3. С. 66–71.
9. Казанский Б.А. Прямой расчет потенциальной энергии рельефа поверхности Земли по цифровым данным // Физика Земли. 2005. № 12. С. 72–75.
10. Казанский Б.А. Батиметрия морей Западно-Тихоокеанской переходной зоны по цифровым данным ЕТОРО 2' // Тихоокеан. геология. 2006. Т. 25 ..(в печати)
11. Ларина Н.И. Расчет площадей Тихого океана, его морей и котловин // Океанология. 1968. Т. VIII. Вып. 4. С. 646–657.
12. Международный геолого-геофизический атлас Тихого океана. М.-С.-Пб. 2003. 192 л.
13. Smith W.H.F. and Sandwell D.T. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth sounding // Science. 1997. V. 277. P. 1957–1962.
14. Taylor S.R. and McLennan S.M. The evolution of continental crust // Sci. Am. 1996. V. 274. N.1. P. 76–81.

B.A. Kazansky

Bathymetric analysis of the Pacific Ocean based on the ETOPO 2' digital data

New results of the statistical analysis of the depths distribution in the Pacific Ocean based on the ETOPO 2' digital data are presented in the form of cumulative and differential bathymetric curves and surfaces with an interval of 100 m in depth for the whole ocean and for its different parts, and also for 5° latitudinal and 10° longitudinal zones. An extreme diversity and absence of correlation of types of depths distributions for latitudinal zones is noted. Two styles of evolution of relief of the Pacific Ocean floor are recognized which correspond to Mesozoic and Cenozoic oceanic crust, both distinguished by the character of distribution of depths and determining latitudinal and longitudinal asymmetry of the Pacific Ocean.

Key words: Pacific Ocean, ocean floor relief, bathymetric curve (surface), bathymetry, average depth, asymptotically ultimate depth, modal depth, depths distribution, asymmetry.