

Отечественная ГЕОЛОГИЯ



ВНИИКАМ



6/1999

55 ЛЕТ ВСЕРОССИЙСКОМУ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМУ
ИНСТИТУТУ КОСМОАЭРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

55 лет

Всероссийскому научно-исследовательскому институту космоаэрогеологических методов ВНИИКАМ

За эти годы исследования нескольких поколений ученых и специалистов были направлены на изучение физических основ дистанционного зондирования природных ресурсов и создание теории космоаэрогеологических методов, разработку технических средств получения аэрокосмической информации и создание методов и технологий использования материалов дистанционного зондирования при решении широкого круга задач изучения регионального геологического строения, геологического картографирования, прогнозирования и поисков месторождений полезных ископаемых, изучения состояния природной среды и динамики ее изменения под воздействием природных и техногенных факторов, геоэкологического картографирования.

Современные технические средства дистанционного зондирования, позволяющие получать с космических и авианосителей данные в различных диапазонах электромагнитных волн (видимый, инфракрасный, в т.ч. тепловой и радиоволновый), открыли широкие возможности для разработки новых высокоэффективных компьютерных технологий комплексного анализа дистанционных данных совместно с геологической, геофизической, геохимической и ландшафтной информацией на базе технологий интерпретированных географических информационных систем, а также технологий по оптимизации мероприятий в области использования и охраны природных ресурсов. Именно разработка таких технологий и являлась предметом научно-исследовательских работ ВНИИКАМ в 90-е годы.

Важнейшим направлением деятельности ВНИИКАМ в настоящее время является разработка научно-методических основ, нормативно-методической документации и базовых комплектов дистанционной основы современных Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200 000 и Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. К наиболее значительным работам, реализуемым ВНИИКАМ в настоящее время, относится проект «Космический образ России», а в рамках совместной работы со странами СНГ — проект по созданию дистанционной основы палеогеографического атласа Центральной Евразии; по международному сотрудничеству — участие в проекте QUEEN (Quaternary Environment of the Eurasian North) — международная программа для изучения изменений природной среды севера Евразии в позднекайнозойский период, в проекте PECHORA (Paleoenvironments and Climate History of the Russian Arctic) — российско-норвежская программа изучения палеогеографии Арктики, в совместной программе Канадского (CSA) и американского (NASA) космических агентств по верификации материалов радиолокационной спутниковой системы RADARSAT, в программе космического агентства Японии (NASDA) по верификации материалов космических съемок со спутника ADEOS, в программе Европейского Космического агентства по комплексному использованию материалов космических съемок с различных спутников.

Отечественная ГЕОЛОГИЯ

Журнал выходит один раз в два месяца

Основан в марте 1933 года

6/1999

Учредители:

Министерство природных
ресурсов РФ

Российское геологическое общество

Центральный
научно-исследовательский
геологоразведочный институт
цветных и благородных металлов

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор А. И. Кривцов

Бюро: *И. Ф. Глумов, Р. В. Добровольская (зам. главного редактора), В. А. Ерхов, В. И. Казанский, А. А. Кременецкий, Г. А. Машковцев, Н. В. Милетенко, Л. В. Оганесян (зам. главного редактора), М. В. Рогачева (отв. секретарь), А. Ю. Розанов, Г. В. Ручкин (зам. главного редактора), Б. А. Соколов, В. И. Старостин, А. А. Шпак*

Редсовет: *А. Н. Барышев, Э. К. Буренков, В. С. Быкадоров, Г. С. Вартанян (председатель редсовета), Н. Н. Ведерников, И. С. Грамберг, А. И. Жамойда, А. Н. Золотов, А. Б. Каждан, М. М. Константинов, Т. Н. Корень, Л. И. Красный, Н. К. Курбанов, Н. В. Межеловский, И. Ф. Мигачев, В. М. Питерский, В. Ф. Рогов, Е. И. Семенов, В. В. Семенович, В. С. Сурков, В. А. Ярмолюк*

МОСКВА

Содержание

Перцов А.В. Методологические основы использования материалов дистанционного зондирования в геологии	3	46
Перцов А.В., Антипов В.С., Кирсанов А.А. Концепция развития аэрокосмических методов природоресурсных исследований	9	54
Перцов А.В., Захаров В.И., Стрельников С.И., Антипов В.С., Гальперов Г.В. Дистанционная основа Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200 000 второго издания	14	60
Перцов А.В., Гальперов Г.В., Антипов В.С., Турченко С.И. Космоструктурные критерии локализации рудных гигантов Рукояткин А.А. Глубинное линеamentное зондирование при металлогенических исследованиях	17	68
Вострокнутов Е.П. «Генезис» — экспертная система для прогнозно-геологических исследований	21	72
Смирнова И.О., Русанова А.А. ГИС-технология обработки и интерпретации материалов дистанционного зондирования для изучения тектонических критериев размещения месторождений углеводородов	27	77
Бычкова И.А., Викторов С.В., Кильдюшевский Е.И., Сухачева Л.Л. Синергетический подход к использованию аэрокосмической информации для изучения прибрежных зон	40	79
Русанова А.А., Смирнов М.Ю., Пупков О.М. Исследование цифровых аэро- и космических радиолокационных снимков при структурно-геологических исследованиях Сортавальско-Питкярантской зоны поднятий		80
Самсонова В.В., Кирсанов А.А., Филиппов В.Н. Некоторые результаты дешифрирования радиолокационного изображения RADARSAT для геологических целей на примере северной части гор Принс-Чарльз		81
Попова Т.А., Семенова Н.Н., Леонтьева Е.В. Геодинамика береговой зоны Ладожского озера под влиянием выпуска сточных вод целлюлозно-бумажного производства по материалам дистанционных съемок		82
Кильдюшевский Е.И., Воронов П.С. Новый метод дистанционного геологического изучения шельфовых акваторий		
Афанасьев Н.Ф., Перцов А.В. Новое направление в развитии дистанционных методов геологических исследований		
Викторов С.В., Кильдюшевский Е.И., Кирсанов А.А., Перцов А.В. К вопросу о кадастре морских берегов		
Информация		
60-летие В.И. Астахова		
50-летие А.А. Кирсанова		
К 300-ЛЕТИЮ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ РОССИИ		
О чем писал наш журнал		

Редакция: Р.В.Добровольская, М.В.Розачева
Компьютерный набор В.К.Комарова
Верстка и оригинал-макет Н.П.Кудряцева

Сдано в набор 15.08.99. Подписанно в печать 30.10.99. Формат 60х88/8. Бумага мелованная.
Печать офсетная. Тираж 1000 экз.

Адрес редакции: 113545 Москва, Варшавское шоссе, 129Б
Телефон: 315—28—47

Отпечатано Государственным картографо-геодезическим предприятием «Поликарт»

Методологические основы использования материалов дистанционного зондирования в геологии

А.В. ПЕРЦОВ

Рассматривая дистанционное зондирование (ДЗ) с позиций системного подхода, необходимо определить его входные и выходные элементы, внутреннюю структуру и окружающую среду. Входными элементами системы ДЗ являются физические поля, образуемые отражением или излучением объектами земной поверхности и недр Земли естественных полей различной природы или полей техногенного происхождения, а также эмпирические и теоретические закономерности связи физических полей с природной средой. Выходными элементами системы ДЗ следует считать дистанционную основу (ДО) карт природоресурсного содержания. Применительно к геологическим задачам дистанционная основа карт геологического содержания может быть определена как оптимальная совокупность данных ДЗ и результатов их обработок и интерпретации, представленная в цифровом и аналоговом видах, необходимая для составления карт заданного масштаба. Она должна состоять из фактографической и интерпретационной частей. Компоненты фактографической части ДО — нормализованные данные ДЗ в цифровой и аналоговой формах, а также результаты формализованных преобразований этих данных. Интерпретационная часть ДО (схемы и карты дешифрирования и интерпретации результатов дешифрирования) создается по результатам экспертного визуального, интерактивного и автоматизированного анализов изображений с учетом имеющейся геолого-геофизической информации на основе геоиндикационных взаимосвязей и отношений.

В целом, дистанционное зондирование как один из методов изучения природных ресурсов представляет собой интерактивный процесс выявления и изучения природной реальности путем сбора, обработки и интерпретации аэрокосмической информации. Таким образом, наиболее естественным способом система ДЗ подразделяется на следующие три стадии, отождествляемые нами с подсистемами ДЗ, а именно: сбор, обработка, тематическая интерпретация данных ДЗ.

В соответствии с общей теорией систем в них постоянно идет процесс преобразования, в ходе которого элементы системы изменяют свое состояние, что в свою очередь определяет развитие всей системы. Развитие системы ДЗ определяется и определяется в настоящее время изменением окружающей среды — уровнем развития авиации, космонавтики, приборостроения (подсистема получения данных ДЗ), электронно-вычислительной (компьютерной) техники, компьютерными технологиями обработки информации (подсистема обработки данных ДЗ), наук о Земле (геология, геофизика, география, ландшафтоведение, почвоведение, гидрология, ботаника и др.) — подсистема интерпретации данных ДЗ. Вместе с тем, развитие системы ДЗ определялось и определяется внутренними противоречиями, возникающими в ходе неравномерного развития подсистем ДЗ.

Ретроспективный анализ становления и развития подсистем сбора, обработки и интерпретации данных ДЗ показывает существование ряда противоречий в системе ДЗ. Первые экспериментальные работы по использованию материалов аэрофотосъемки показали их широкие возможности при решении природоресурсных задач. Сделанные выводы способствовали развитию аппаратуры, методов и способов аэрофотосъемки, методов дешифрирования получаемых материалов. Развитие на этой базе теории ДЗ и исследование его физических основ привели к необходимости развития технических средств дистанционного зондирования в других, помимо видимого, диапазонах электромагнитного спектра. Таким образом, возникло противоречие между возросшим спросом на данные ДЗ и возможностями их

получения. Как разрешение этого противоречия интенсивно начала развиваться подсистема сбора данных ДЗ. Выразилось это в интенсивном проведении работ по созданию радиолокационных станций и систем тепловой аэросъемки — тепловизоров. С развитием космонавтики, естественно, возникла возможность съемок из космоса, что способствовало созданию и развитию соответствующих технических средств съемки, систем передачи данных, их архивированию и подготовке к передаче пользователям.

В 80-х годах развитие средств дистанционного зондирования (подсистема сбора данных ДЗ) привело к резкому увеличению получаемой информации. К материалам фотографических съемок с летательных аппаратов добавились данные, получаемые радиолокационными и тепловыми аэросъемочными системами, а также данные космических съемок. Последние содержали особенно большие объемы информации благодаря их большой обзорности, получению данных в нескольких узких каналах видимого диапазона электромагнитного спектра, съемкам в ближнем инфракрасном и тепловых диапазонах, автоматическому режиму выполнения съемок. Адекватных средств (технических и программных) обработки таких объемов данных в рамках системы ДЗ в тот период времени не существовало. Возникшее противоречие между значительными объемами получаемых данных ДЗ и средствами их обработки привело к изменению в системе ДЗ. В 80-х годах интенсивно развивались методы автоматизированной обработки аэрокосмической информации. При этом основные надежды возлагались на машинное, т.е. автоматическое дешифрирование. Особенно это было заметно в геологических приложениях ДЗ. При этом упор делался на объективный характер компьютерной обработки данных ДЗ, на стабильность повторяемости результатов обработки в отличие от визуального дешифрирования изображений разными специалистами. В результате было создано специализированное программное обеспечение, которое не принесло практических результатов, но послужило основой нового противоречия в системе ДЗ. Субъективное визуальное дешифрирование заменялось субъективным выбором алгоритма, заложенного в основу соответствующей программы для ЭВМ. При этом само понятие субъективный характер дешифрирования исследовалось в отношении повторяемости результатов и показало их низкую сходимость. Проведение такого же исследования в отношении различных применяемых алгоритмов не проводилось из-за отсутствия альтернативных наработок в области программного обеспечения. Таким образом, возникшее противоречие можно сформулировать как противоречие между потенциальными возможностями компьютерной обработки данных ДЗ и адекватностью интерпретации ее результатов, т.е. между подсистемами обработки и интерпретации данных ДЗ. Разрешение этого противоречия привело к созданию современного программного обеспечения для обработки данных ДЗ. Это программное обеспечение характеризуется его доступностью для непосредственной интерактивной работы специалистам в области природных ресурсов.

Чрезвычайная простота и удобство интерфейсов современного программного обеспечения для обработки данных ДЗ, которые привели к устранению вышеупомянутого противоречия между подсистемами ДЗ и соответственно развитию самой системы ДЗ, породили новое противоречие в системе. Дело в том, что именно простота и удобство интерфейсов дают возможность использовать чрезвычайно большое число вариантов обработки данных ДЗ при том, что простые критерии

сравнения эффективности этих вариантов в подавляющем большинстве случаев отсутствуют. Противоречие в системе ДЗ, которое существует в настоящее время, является опять-таки противоречием между подсистемами обработки и интерпретации данных ДЗ. Разрешение этого противоречия и должно привести к дальнейшему развитию всей системы ДЗ и определить перспективные направления, на которых следует сконцентрировать имеющиеся ресурсы.

Одно из таких направлений — разработка и создание экспертных систем (ЭС) — специализированного программного обеспечения (ПО), основанного на знаниях высококвалифицированных специалистов (экспертов) в области изучения геологического строения методами ДЗ. Именно ЭС способны разрешить противоречие между огромными возможностями современного ПО, предназначенного для обработки данных ДЗ, и отсутствием практической возможности выбора оптимальных вариантов обработки путем их механического перебора. Только в ЭС реализуется возможность использования знаний, помещаемых в соответствующую базу (БЗ), экспертов, позволяющих избрать оптимальный для конкретного класса геологических задач вариант обработки аэрокосмической информации.

Цель и задачи системы ДЗ. Цель системы ДЗ геологической среды в общем виде можно определить как изучение геологической реальности на разных уровнях ее иерархии. Анализ задач системы ДЗ основан на рассмотрении объектов тематического картографирования. Применительно к геологической отрасли знаний это объекты геологического картографирования. В общем случае такими объектами являются геологические тела, представляющие собой часть статического и динамического геологического пространства, ограниченного поверхностью, внутри которой остаются непрерывными те свойства, которые были использованы для выделения границ тел.

Методы ДЗ позволяют получать качественные и количественные характеристики природных объектов с точной географической привязкой и параметры их пространственного распределения, необходимые для решения широкого круга геологических задач.

Задачи, решаемые методами ДЗ применительно к геологическим телам разного иерархического уровня, по Б.Н.Можаеву [13], следующие: выявление взаимоотношений геологических тел одного или разных иерархических уровней друг с другом, выявление внутренней структуры, определение вещественного состава, классификация, проведение границ.

Применительно к геологическим процессам и явлениям методами ДЗ решаются следующие задачи: классификация, определение масштаба проявления, определение интенсивности, выявление стадии (этапа) развития.

Учитывая, что основой всех видов геологических исследований является геологическое картографирование, перечень задач, решаемых по материалам ДЗ, может быть рассмотрен применительно к составлению геологических карт масштабов 1:1 000 000 и 1:200 000. Анализ данных ДЗ играет существенную роль при уточнении существующих представлений о геологическом строении района картографирования, анализе размещения и прогнозе полезных ископаемых, проведении эколого-геологических исследований, оценке эколого-геологической обстановки и прогнозе ее развития, оценке геологических опасностей. При этом при составлении основных документов таких геологических карт данные ДЗ применяются при решении следующих задач (по С.И.Стрельникову):

уточнение структурного каркаса и блокового строения;

уточнение контуров (границ) геологических тел с учетом явления естественной генерализации;

уточнение рисунка складчатых структур;

структурно-металлогеническое районирование;

выявление эколого-геологических условий и потенциально опасных для обитания и деятельности человека процессов и явлений;

выделение площадных стратифицированных и нестратифицированных объектов, прослеживание их границ, получение информации о вещественном составе тел;

выделение линейных объектов (прослеживание отдельных пластов и маркирующих горизонтов, даек, жил и малых жилообразных интрузий, разрывных нарушений и узлов их пересечения, зон смятия и повышенной трещиноватости);

структурно-тектонические исследования (выделение разрывных дислокаций, структурно-формационных зон, тектонических блоков, кольцевых и складчатых структур);

выявление скрытых на глубине геологических объектов, погребенных частей геологических тел, выходящих на поверхность, их геометризация;

установление закономерностей размещения полезных ископаемых;

минерагеническое районирование;

выявление и локализация потенциально рудоносных объектов, перспективных участков;

изучение эколого-геологических условий, выявление потенциально опасных для обитания и деятельности человека геологических процессов и явлений, прогноз их возможного развития.

Подсистема сбора данных ДЗ. В процессе дистанционного зондирования для каждого разрешаемого элемента поверхности (элементарной площадки) регистрируются энергетические, спектральные и/или поляризационные параметры. Поскольку съемочные системы позволяют получать информацию с разным пространственным и радиометрическим разрешением, в процессе ДЗ происходят пространственная и факторная интеграции информации, которые по своей сути являются естественной генерализацией. Применительно к задачам изучения геологической среды данные ДЗ позволяют получать информацию о геологических структурах разного ранга и различного глубинного залегания. Такая пространственная и факторная интеграция данных ДЗ — важнейшее свойство аэрокосмической информации, определяющее как направления развития технических средств получения данных ДЗ, так и направления использования получаемой информации.

В содержательном отношении генерализация приводит не столько к потере информации (при сравнении мелкомасштабных данных с более крупномасштабными), но в первую очередь обеспечивает получение качественно новой информации, позволяющей выявлять новые закономерности.

Данные ДЗ представляют собой первичные модели земной поверхности, на основе которых создаются различного рода тематические карты. Сходство картографических моделей и данных ДЗ как моделей земной поверхности проявляется в наличии таких свойств, как подобие, содержательное соответствие, метричность, непрерывность, обзорность и др. В этой связи важным представляется сопоставление свойств картографических моделей и аэрокосмической информации. Геометрическое подобие проявляется в подобии размеров и форм объектов земной поверхности их изображениям на аэро- и космических снимках. Это обеспечивает точность измерений в пределах возможностей каждого конкретного уровня генерализации (УГ). Как и в отношении картографических моделей [4], применительно к аэрокосмической информации можно говорить о полном, приближенном и неполном геометрическом подобии для снимков различного УГ.

Временное подобие — это правильная передача на разновременных снимках состояния и развития процессов и явлений на земной поверхности. Подобие отношений заключается в подобии изображения на аэро- и космических снимках взаимного расположения объектов земной поверхности, их иерархии и территориальной подчиненности. Подобие отношений, как и для картографических моделей, — главное условие адекватного построения с использованием аэрокосми-

ческой информации карт многокомпонентных природных систем.

Содержательное соответствие — также одно из важнейших свойств как картографических моделей, так и данных ДЗ. Содержательное соответствие, как известно, проявляется через отношения изоморфизма и гомоморфизма модели и объекта [3]. Изоморфизм предполагает взаимно однозначное соответствие модели и объекта. В отношении картографических моделей он присущ лишь крупномасштабным аналитическим картам, где генерализация сказывается в малой степени. Для аэро- и космических снимков ситуация аналогичная — о наличии изоморфизма можно утверждать лишь для крупномасштабных изображений.

При переходе к мелкомасштабным изображениям все больше сказывается естественная генерализация, что приводит к гомоморфным соотношениям, когда конкретным объектам на снимках соответствует некоторое множество реальных объектов земной поверхности.

Метричность — свойство, в равной мере присущее и картографическим моделям, и данным ДЗ. Оно обеспечивается законами проекции, наличием масштаба, которые позволяют выполнять по аэро- и космическим снимкам разнообразные измерения качественных и количественных характеристик объектов и явлений.

Однозначность — свойство, вытекающее из математического закона построения картографических моделей, и понимается оно шире, чем взаимно однозначное соответствие точек на карте и земной поверхности. Каждый знак, любая точка или линия на карте имеют лишь один указанный в легенде смысл [3]. Иная ситуация возникает применительно к данным ДЗ. Элементы изображения при их однозначном соответствии объектам земной поверхности могут иметь различный смысл для разных специалистов и, следовательно, свойство однозначности для данных ДЗ не характерно.

Непрерывность изображения — одно из самых характерных свойств данных ДЗ. В отличие от картографических моделей, для которых это свойство может стать недостатком при неравномерности изученности территории, для данных ДЗ оно является бесспорным преимуществом перед моделями земной поверхности иного рода.

Обзорность — самое специфическое свойство не только для картографических моделей, но и для аэро- и космических снимков. По утверждению А.М. Берлянта, «ни одна из известных моделей не обладает этим свойством в такой степени, как карта» [3, с. 42]. Уступают ли данные ДЗ картам в отношении обзорности, как утверждает А.М. Берлянт, на самом деле зависит от УГ аэро- и космических снимков.

Развитие технических средств сбора данных ДЗ с начала 40-х годов до настоящего времени привело к созданию ряда съемочных систем с различной разрешающей способностью на местности и различным радиометрическим (яркостным, температурным) разрешением.

Аппаратура ДЗ, размещаемая на космических и воздушных носителях, обеспечивает получение данных ДЗ разных уровней генерализации (таблица). При этом следует учитывать, что УГ данных ДЗ зависит не только от пространственного разрешения, но и от того, в каких спектральных диапазонах получается информация. Съемка в узких диапазонах соответствует низкому уровню генерализации, в широких — более высокому. При этом следует учитывать, что системы ДЗ включают следующие составные части:

космические платформы и воздушные носители, на которых размещается аппаратура ДЗ;

аппаратура ДЗ; средства передачи данных на Землю (радиоканалы и спускаемые капсулы);

наземные комплексы приема информации и ее подготовки для предоставления потребителям.

В настоящее время в ряде стран функционируют как системы ДЗ, предназначенные для изучения природных ресурсов, так и метеорологические системы. Ин-

Классификация данных ДЗ по уровням генерализации

Уровень генерализации (УГ)	Пространственное разрешение, м	Масштабный ряд
Глобальный	1000 и более	1:10 000 000 и мельче
Континентальный	100—1000	1:5 000 000—1:2 500 000
Региональный	50—100	1:1 000 000—1:500 000
Локальный	10—50	1:200 000—1:100 000
Детальный	<10	1:50 000—1:10 000

формация, получаемая последними, иногда также может использоваться для изучения природных ресурсов, особенно при решении геологических задач.

Разработка новых средств ДЗ ставит проблему обоснованного выбора как состава аппаратуры бортовых информационно-измерительных комплексов, так и создания технологии сбора, обработки и тематической интерпретации данных. Актуальность проблемы оптимального планирования систем ДЗ определяется не только их высокой стоимостью, но и другими причинами. Так, для космических систем ДЗ это — ограничения на массу аппаратуры, мощности источников питания, объем информации, накапливаемой на борту, возможные параметры орбит и др. [12].

Особого внимания заслуживают системы ДЗ в микроволновом диапазоне, т.е. радиолокационные станции с синтезированной апертурой (РСА). Съемки осуществляются в сантиметровом и дециметровых диапазонах волн как с космических, так и с авиационных носителей. В России в отличие от других стран мира разработаны радиолокационные системы и метрового диапазона, которые функционируют в составе самолетных многочастотных радиолокационных станций ИМАРК и НИТЬ-РАЗРЕЗ.

Радиолокационная съемка обладает свойствами, которые принципиально отличают ее от других видов ДЗ, а именно: возможность получения информации независимо от погодных условий и освещенности; высокой чувствительностью к содержанию влаги в почво-грунтах; высокой чувствительностью к неровностям подстилающей поверхности.

Первичные данные радиолокационной съемки представляют собой не привычные изображения земной поверхности, а так называемые голограммы, по которым с использованием специальных программных средств затем синтезируют собственное изображение. Космические радиолокационные станции способны получать изображения с разрешением на местности 10—20 м, в новых разработках разрешение достигает первых метров. Кроме пространственного разрешения важными параметрами радиолокационной съемки являются также частотный диапазон, поляризация и угол падения луча.

Важная особенность радиолокационной съемки — возможность варьирования пространственным разрешением, а, следовательно, и управления УГ при получении информации одной и той же РЛ станцией с одной и той же орбиты (высоты). Так, в зависимости от режима работы РСА RADARSAT пространственное разрешение может изменяться от 10 до 100 м, что соответствует разным УГ — региональному и локальному.

В целом, эффективность функционирования аппаратуры ДЗ определяется информативностью получаемых данных. Параметры данных ДЗ — пространственное и спектральное разрешения, ширина захвата на местности (обзорность и детальность), периодичность съемок характеризуют свойства аппаратуры. При этом тот или иной вид аппаратуры, обладая соответствующими характеристиками, может быть оптимальным для решения одного класса задач изучения природных ресурсов и неэффективным для другого.

Подсистема обработки данных ДЗ. Задачи, возникающие при обработке данных ДЗ, можно разделить на три большие группы — предварительная и тематическая обработки, а также создание цифровой модели рельефа (ЦМР).

Предварительная обработка — геометрические и радиометрические коррекции и масштабирование имеет целью подготовку получаемой информации к последующему анализу и тематической интерпретации.

Методы тематической обработки могут быть разделены на две группы — преобразование структуры изображений и определение обобщенных показателей фотометрического поля (поля спектральной яркости). Все виды преобразований структуры изображений исчерпываются следующими видами обработки: вычленение, схематизация, детализация, квантификация, континуализация, квалификация, дискретизация.

Вычленение проводится для получения отдельных изображений каких-либо элементов исходного изображения. Наиболее распространенные случаи такого преобразования — получение рисунка прямолинейных элементов изображения (линеаментов), речной сети, озер, болот и др. Параметры распределения отдельных элементов ландшафта часто связаны с особенностями геологического строения и, следовательно, этот вид обработки необходим для последующих тематического анализа и интерпретации.

Схематизация имеет целью устранение второстепенных деталей изображения (высокочастотной составляющей). Параметры обработки изменяются в широких пределах и подбираются в каждом конкретном случае при решении разнообразных задач тематического дешифрирования. Наиболее распространенный случай — классификация (районирование) изображения по какому-нибудь заранее выбранному параметру.

Детализация — подчеркивание высокочастотной составляющей и устранение низкочастотной. При визуальном дешифрировании отдаленным аналогом такого вида обработки является дешифрирование мелких деталей изображения.

Цель квантификации — перевод качественных характеристик изображения в количественную форму. Наиболее характерный пример — перевод изображения из фотографической формы в цифровую.

Континуализация — перевод дискретных элементов изображения в изображение непрерывное. При этом происходит полная трансформация изображения. Примером может служить перевод изображения в картину изолиний плотности фототона (яркости), а также перевод картины системы линеаментов в картину изолиний плотности их распределения.

Квалификация представляет собой замену изображения, содержащего количественные показатели, новым, дающим качественные характеристики. В качестве примера можно привести операцию цветового кодирования, когда участки с разной яркостью (плотностью тона) либо с разными диапазонами цифровых данных ДЗ кодируются и изображаются различными цветами. Представление изображений в цветокодированном виде позволяет подчеркнуть информацию, содержащуюся в исходном изображении в неявном виде.

Цель дискретизации — перевод непрерывного изображения в дискретную форму. В качестве примера можно привести операцию сегментации, заключающуюся в районировании изображений по градиенту плотности тона изображения (спектральной яркости). Другим примером может служить применение операторов дифференцирования (Лапласа и др.), которые позволяют преобразовывать изображение в зависимости от особенностей его рисунка. Такие преобразования позволяют представить исходные изображения в упрощенном виде, что облегчает пользование поиски закономерных связей элементов изображения с изучаемыми объектами.

Определение обобщенных показателей фотометрического поля (поля спектральной яркости). Установлено, что результаты измерений характеристик фотометрического поля природных образований (данные ДЗ) не позволяют непосредственно оценивать параметры их состояния в связи с отсутствием однозначного соответствия между ними. Для осуществления такой оценки предложены обобщенные показатели. Исследования по выбору информативных спектральных признаков, про-

веденные первоначально зарубежными исследователями, а затем и в России, привели к созданию таких показателей, как спектральные индексы [15]. При этом весь набор разработанных спектральных признаков можно разбить на три группы: контрастные индексы (вегетационный, нормализованной разности и др.); структурные индексы (перпендикулярный вегетационный индекс и индексы, получаемые с помощью преобразований Каута-Томаса); обобщенные индексы (проактивные индексы растительности).

Построение цифровой модели рельефа осуществляется как традиционными способами фотограмметрии по стереопарам, так и с использованием материалов ДЗ в микроволновом диапазоне. Для решения этой задачи по радиолокационным снимкам применяются стереоскопический, интерферометрический и клинометрический методы.

Обработка данных ДЗ еще в конце 80-х годов выполнялась преимущественно фотографическими и оптико-электронными методами. В настоящее время несмотря на развитие компьютерных технологий разумной альтернативы обработке данных ДЗ не существует. При этом важно отметить, что специализированное (профессиональное) ПО обработки данных ДЗ — ERDAS Imagine, ER Mapper, PCI, Intergraph и другие имеет ряд особенностей, отличающих его от ПО обработки изображений общего назначения (Photo Styler, Photo Point, Photo Shop и др.).

Во-первых, специализированное ПО обеспечивает решение задач предварительной и тематической обработки данных ДЗ, во-вторых, такое ПО доступно для непосредственной работы специалистам естественного профиля, а не только профессионалам программистам, в-третьих, оно обеспечивает возможности быстрого перехода от результатов обработки данных ДЗ к выполнению операций моделирования, анализа и интерпретации средствами ГИС.

Обобщая современное состояние подсистемы обработки данных ДЗ, следует отметить одно важное обстоятельство — процедуры предварительной обработки данных ДЗ в обязательном порядке должны предшествовать процедурам тематической обработки. Дело в том, что наиболее значимые группы характеристик рисунков изображения, а именно состав (соотношение площадей), конфигурационные особенности контуров (их форма), особенности взаимной ориентации и топологические характеристики (взаимное расположение) [13] для данных ДЗ, подвергнутых геометрическим коррекциям и для «сырых» данных, как правило, отличаются, что неизбежно ведет к погрешностям при тематической обработке и последующей интерпретации.

Подсистема интерпретации данных ДЗ. Интерпретация данных ДЗ, полученных в видимом диапазоне. Изображение дневной поверхности, получаемое при дистанционном зондировании, представляет собой модель ландшафта, особенности которого в той или иной степени обусловлены геологическим строением территории. Данные, получаемые в нескольких узких интервалах видимого диапазона, образуют серию моделей ландшафта. Эти модели сложны в силу их многокомпонентности. Анализ распределения и взаимных связей большого числа элементов таких моделей как между собой, так и с элементами геологического строения, представляет собой трудную задачу. В то же время, например, для дешифрирования коренных пород, выходящих на дневную поверхность, разработаны достаточно простые методические приемы [2]. Изучение же структуры и вещественного состава не выходящих на дневную поверхность геологических объектов требует углубленного анализа ландшафтной ситуации. При этом, как правило, требуется разложение сложных моделей ландшафта на ряд более простых методами тематической обработки МДЗ. Такое разложение необходимо для представления отдельных элементов изображения в более наглядной форме, что помогает выявлению закономерностей, выраженных на исходных изображениях в неявном виде.

Для реализации такого подхода во ВНИИКАМ с начала 70-х годов развиваются методы геоиндикационного анализа МДЗ [1,8,9]. Эти методы основаны на изучении взаимосвязей элементов геологического строения с элементами ландшафта и использовании полученных закономерностей при дешифрировании.

Реализация геоиндикационного подхода заключается в построении гипотезы о характере связей элементов и компонентов ландшафта с геологическими объектами, ландшафтном дешифрировании материалов аэро- и космических съемок, в т.ч. и обработанных по различным методикам снимков, и проверке геоиндикационной гипотезы на тестовых участках. Если такая проверка не дает положительного результата, то гипотеза уточняется и применяется тематическая обработка МДЗ, в частности перевод качественной картины распределения отдельных элементов ландшафта в количественные характеристики — плотность, неоднородность и др. [5]. Эта уточненная гипотеза также проверяется путем установления соотношения количественных характеристик распределения элементов ландшафта с геологическими объектами. Если и такая проверка не дает положительного результата, то пересматривается геоиндикационная гипотеза, и процедура повторяется. Таким образом может быть осуществлен переход от фактографической части ДО к интерпретационной.

Рассматривая применение геоиндикационного подхода при решении задач геологического картографирования по МДЗ, следует отметить, что все разнообразие картографических образов геологических объектов сводится, по А.И.Бурдэ [6], к нескольким типам: линейному складчатому и линейному разрывному (классы полосчатых образов), изометричному, кольцевому и радиально-концентрическому (классы пятнистых образов). Соответственно, все видимое на МДЗ разнообразие элементов ландшафта может быть сведено к нескольким основным геометрическим типам: линейному, площадному и кольцевому. В наиболее простых случаях элементы ландшафта могут непосредственно соответствовать элементам геологического строения. Например, линейные элементы ландшафта — разрывным нарушениям либо элементам напластования горных пород. В этих случаях задача решается на первых этапах геоиндикационного анализа.

Однако в большинстве случаев геоиндикационные связи имеют достаточно сложный характер. Особенно четко это проявляется в ходе решения задач изучения глубинного геологического строения и при прогнозировании месторождений полезных ископаемых. В ходе таких исследований на хорошо изученных эталонных площадях могут быть установлены некоторые характеристики геоиндикационных связей. Так, некоторые параметры распределения отдельных элементов ландшафта могут хорошо коррелировать с некоторыми элементами геологического строения [9].

Интерпретация данных, получаемых в тепловом диапазоне. Объекты земной поверхности излучают тепловую энергию, образующую геотермическое поле, которое зависит от солнечной радиации, внутренних источников тепла земной коры и теплофизических свойств как объектов земной поверхности, так и пород геологического разреза. Следовательно, интерпретация данных ДЗ, получаемых в тепловом диапазоне электромагнитных волн, должна проводиться с учетом теплофизических свойств объектов, погодных, сезонных и временных (время суток) условий съемки, суточной динамики температурного поля, а также особенностей ландшафта. Кроме того, необходимо учитывать возможность положения объектов антропогенного происхождения, имеющих собственные внутренние источники тепла [10]. Одна из причин возникновения тепловых аномалий — конвективный тепловой поток из недр Земли по зонам современной активизации. Такие зоны характерны не только для районов современной вулканической и гидротермальной деятельности, но и для прочих регионов, в т.ч. сейсмически стабильных.

Разнообразие характеристик внутренних источников

тепла требует учета значимости в каждом конкретном случае всех температурообразующих факторов на характер геотемпературного поля. Оценка интенсивности температурных аномалий, создаваемых на земной поверхности внутренними источниками тепла различного генезиса, рассмотрена в работе [10].

Разнообразие теплофизических свойств геологических объектов, выходящих на дневную поверхность, позволяет при интерпретации данных ДЗ, получаемых в тепловом диапазоне, решать ряд поисковых задач. Так, в частности, имеется различие в теплофизических свойствах гидротермально измененных и первичных пород. Из этого следует принципиальная возможность прогноза руд гидротермального генезиса.

В связи с развитием методов ДЗ из космоса стало возможным изучение состояния теплового поля одновременно на значительных территориях. В связи с этим открылись широкие возможности использования данных тепловой космической съемки для изучения строения нефтегазоносных бассейнов.

Интерпретация данных ДЗ, получаемых в микроволновом диапазоне. Формирование радиолокационного изображения определяется большим количеством технических и природных факторов. Поэтому знание физических основ радиолокационной съемки особенно важно при интерпретации МДЗ в этом диапазоне.

Выявление и прогнозирование по материалам РЛ аэросъемки элементов геологического строения, как и для других МДЗ зависит от степени обнаженности горных пород, их вещественного состава, структурных особенностей территории, характера рельефа, почвенно-растительного покрова, физического состояния дневной поверхности. При этом геологическую интерпретацию получаемых данных нельзя свести к изучению РЛ изображения только как модели ландшафта. Дело в том, что характер РЛ изображения во многом зависит от длины волны, поляризации и угла встречи радиолуча с поверхностью объекта. Длина волны, например, определяет проникающую способность излучения. Это обстоятельство во многом определяет круг решаемых геологических задач. В последние годы проведены эксперименты с многочастотными РЛ станциями. Их результаты показали, что при переходе от сантиметрового к метровому диапазону существенно увеличивается глубина проникновения радиоволн. При этом она зависит от вещественного состава верхних горизонтов пород, а также от глубины залегания первого от поверхности горизонта, способного поглотить или отразить радиосигнал, и его физических свойств. Такими горизонтами могут быть линзы грунтовых вод, электропроводящие рудные тела, многолетнемерзлые породы и т.п.

Так, еще в 1973 г. были проведены эксперименты для определения возможностей радиолокационного обнаружения и измерения глубины залегания водоносных горизонтов в пустынных районах Средней Азии (район Ясханской линзы пресных вод в Туркмении). Полученные данные позволили ориентировочно оценить удельное затухание радиоволн (длина волны 5 м) в песчаном грунте по известной толщине зондируемого слоя и отношению амплитуд отраженных сигналов. Из этого был сделан вывод, что при использовании радиолокатора, применявшегося в данном эксперименте, в принципе возможно зондирование сухого песчаного грунта на глубину 50—100 м [16].

В последние годы в рамках подсистемы интерпретации развиваются новые подходы к анализу МДЗ. В первую очередь, это фрактальный подход и метод нейронных сетей. При решении задач анализа изображений земной поверхности возникает потребность в создании моделей распределения значений яркости в поле изображения. Создание таких моделей возможно на основе принципов фрактальной геометрии. Эти принципы основаны на понятии самоподобия — определенный класс структур можно последовательно увеличивать бесконечное число раз, и они при этом остаются неизменными. Фракталы являются математичес-

кой абстракцией и могут лишь аппроксимировать изображения физических объектов. Таким образом, становится возможным количественно оценивать степень неоднородности наблюдаемых сюжетов и исследовать качество изображений.

В качестве примера можно указать, что плотности линейментов, выявляемых при дешифрировании МДЗ, коррелируют с элементами разломно-трещинных структур и структурно-тектоническими подразделениями [11]. При этом доказано, что линейментные системы обладают фрактальными свойствами, причем отдельные домены или соответствующие кластеры, различающиеся по фрактальным размерностям, соответствуют определенным тектоническим блокам или структурным комплексам. Однако фрактальные размерности характеризуют домены линейментных систем только усредненно, т.к. не отражают их неоднородности.

Подход, основанный на нейронных сетях, по сравнению с алгоритмическими методами отличается, по мнению их разработчиков [7], универсальной применимостью. Такая сеть легко приспосабливается к условиям решения задач путем тренировки. Нейронные сети представляют собой математические модели накопления простых элементов (нейронов), связанных друг с другом. Сила связи между нейронами характеризуется синаптическими весами. Существуют два вида моделей нейронной сети — необучаемые и обучаемые. Для последних сила связи между нейронами постоянная, устанавливаемая заранее. Для обучаемой сети синаптические веса не устанавливаются заранее, а могут определяться самостоятельно путем тренировки. Для обучения сети необходимо иметь некоторое число пар значений ввода — вывода, используемых в качестве эталонов (прототипов).

В целом, исходя из общей теории распознавания, задачу распознавания графических образов можно трактовать как создание системы решающих правил (решающих границ), позволяющих на основе априорного набора признаков (номинальных, метрических, вероятностных, структурно-топологических и др.) отнести данный графический образ к тому или иному классу (эталону), индицирующему некоторое явление или процесс [4].

В общем случае интерпретация МДЗ невозможна без привлечения ландшафтной, геолого-геофизической и другой тематической информации. Методы комплексной обработки разнородных данных для моделирования природных и, в частности, геологических объектов, на базе компьютерной техники и геоинформационных технологий постоянно совершенствуются. Однако во многих случаях очень трудно из всех возможностей, предоставляемых современным профессиональным программным обеспечением, выбрать оптимальный набор процедур. И, тем более, невозможно подобрать вычислительные процедуры, дающие результаты, сравнимые с таковыми, получаемыми специалистом-интерпретатором (геологом-интерпретатором) при визуальном дешифрировании. Причина этого заключается в том, что человек использует символическое представление данных, основанное на значениях, в то время как вычислительные алгоритмы базируются на статистических характеристиках.

По мнению специалистов в области искусственного интеллекта, и в частности по экспертным системам, использование символического подхода позволяет не только реализовывать многие процедуры дешифрирования, но и обеспечивает эффективный подход к решению сложных задач интерпретации и прогнозирования. Как уже указывалось, при интерпретации данных ДЗ большое значение имеет интеграция разнородных данных, для которых не применимы стандартные процедуры обработки. Единственно возможным выходом из создавшегося положения может быть использование экспертных систем (ЭС). Они представляют собой основу для решения задач, реализация которых требует привлечения знаний, а не просто информации. Общая цель применения ЭС может быть сформулирована как объ-

единение формализованных знаний, которыми пользуются специалисты дешифровщики, и возможностей процедур обработки данных ДЗ, содержащихся в пакетах профессиональных программ, для содержательного решения задач изучения природных ресурсов [14].

ЭС необходимо включать во все основные этапы разработки и использования моделей природной (геологической) среды. При этом они будут полезны для решения таких задач, как выбор наиболее значимых индикаторов при геоиндикационном моделировании, построение обоснованных связей между такими индикаторами и прогнозируемыми свойствами природных (геологических) объектов, проверка и обоснование построенных геоиндикационных моделей. Важное значение имеет разработка экспертных моделей решения типовых геоиндикационных задач, библиотека которых предоставит возможность рядовому специалисту применять обоснованный комплекс индикационных признаков и процедур решения задачи для получения надежного заключения при сравнительно малых затратах средств и времени.

Разработка ЭС во многих областях науки привела к принципиально иному использованию компьютерной техники — не для оперирования моделями действительности, а для воспроизведения моделей человеческого знания. Главное средство в ЭС — рассуждение, базирующееся на знаниях, полученных от высококвалифицированных специалистов (экспертов). Определенные правила, или эвристики, ограничивают поиск, привлекая внимание программы к наиболее вероятным путям решения. Характерные свойства ЭС — накапливать, обобщать знания, выдавать рекомендации, объяснять ход своих рассуждений по требованию пользователя понятным для него способом.

Анализируя тенденции развития подсистемы интерпретации данных ДЗ, можно сделать следующие выводы. Во-первых, поскольку решение обратной задачи ДЗ не является однозначным, то решение природоресурсных и, в частности геологических задач, ориентировано прежде всего на построение геоиндикационных моделей. Во-вторых, для более полного решения задач интерпретации необходимо привлечение разных видов данных ДЗ, а также ландшафтной, геолого-геофизической и другой тематической информации. В-третьих, для эффективного анализа большого числа разнородных данных требуется привлечение современного программного обеспечения, базирующегося на знаниях высококвалифицированных специалистов (экспертов) — экспертных систем.

Развитие системы ДЗ природных ресурсов обуславливает перманентное обновление методов и технологий космоаэрогеологических исследований. Это происходит, во-первых, потому, что меняется предмет системы ДЗ — аэрофотоснимки, космические фотоснимки, материалы радиолокационной и тепловой съемки, цифровые данные в разных диапазонах электромагнитного спектра и т.д. Во-вторых, развитие информационных технологий меняет инструментарий специалистов, особенно это быстро происходит в последние годы. В-третьих, меняются концепции, теории и модели строения, динамики и эволюции геосистемы.

Анализ состояния системы ДЗ природных ресурсов, особенностей и современных тенденций ее развития позволяет сформулировать следующий перечень актуальных задач и перспективных направлений.

В области сбора данных:

определение взаимосвязей между параметрами технических средств получения данных ДЗ и информационными показателями получаемых данных, применительно к соответствующим классам природоресурсных задач; оптимизация параметров аппаратуры ДЗ в соответствии с технико-экономическими критериями и задачами, решаемыми пользователями, на основе результатов компьютерного моделирования их решения; совершенствование программного обеспечения для предварительной обработки данных в бортовых комплексах; повышение пропускной способности линий передачи

данных с орбитальных комплексов на наземные пункты приема; создание распределенной сети наземных пунктов приема данных ДЗ для обеспечения пользователей разного уровня. Учитывая принципиальные особенности ДЗ в радиоволновом диапазоне, а также их существенные преимущества при решении большого числа природоресурсных задач, специальное внимание должно быть уделено созданию и введению в эксплуатацию радиолокационных станций. Актуальные задачи в областях обработки и тематической интерпретации МДЗ взаимосвязаны самым тесным образом. Особенно ярко это проявляется в геологическом применении методов ДЗ. Современные технологии использования МДЗ в геологоразведочном производстве основаны на том, что аэрокосмическая информация представляет собой составную часть ГИС и обрабатывается совместно с другими слоями геолого-геофизических и геохимических данных посредством соответствующего программного обеспечения. Учитывая состояние и современные тенденции в области обработки и интерпретации МДЗ при решении вопросов геологоразведочного производства можно сформулировать следующие актуальные задачи: построение по МДЗ типовых геоиндикационных моделей геологических объектов разного ранга применительно к различным геоструктурным и ландшафтным обстановкам на основе новых теоретических подходов, в т.ч. закономерностей энергоинформационного обмена в геосистеме; определение оптимального (необходимого и достаточного) состава тематических обработок (комплекта цифровых преобразований) МДЗ для интерпретационной части ДО Госгеолкарт-1000 и -200 применительно к различным геологическим и ландшафтным условиям; создание компьютерных технологий использования МДЗ при составлении сводных, мелко- и среднемасштабных геологических карт, в т.ч. дочетвертичных отложений, четвертичных отложений, полезных ископаемых и закономерностей их размещения, геолого-экологических; формирование образов естественных геологических структур как целостной системы в параметрах МДЗ, получаемых в различных диапазонах электромагнитного спектра и соответствующих УГ; создание компьютерной технологии обработки и интерпретации МДЗ при региональных прогнозно-минералогических исследованиях на основе создания прогнозно-поисковых моделей основных промышленных типов рудных объектов; разработка ЭС решения прогнозных геологических задач по МДЗ; разработка основ синергетического подхода к обработке и интерпретации МДЗ как упорядоченного использования аэрокосмической информации, получаемой различного вида аппаратурой, создание системной модели синерге-

тики; разработка компьютерной технологии обработки и интерпретации МДЗ при геолого-экологическом картографировании территорий с высокой техногенной нагрузкой и создание системы мониторинга изменения природной среды на основе оперативной космической информации; разработка компьютерных технологий обработки и геологической интерпретации МДЗ, получаемых в радиоволновом и тепловом диапазонах при изучении регионального геологического строения, в т.ч. глубинного, прогнозирования и поисках месторождений полезных ископаемых, в первую очередь нефти и газа, а также термальных вод и подземных источников водоснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астахов В.И. Использование материалов дистанционных съемок при геологическом картировании залесенных районов // Сов. геология. 1983. № 11. С. 26—32.
2. Аэрометоды геологических исследований. Методическое руководство. — Л.: Недра, 1971.
3. Берлянт А.М. Картографический метод исследования. — М.: Изд-во МГУ, 1978.
4. Берлянт А.М. Образ пространства: Карта и информация. — М.: Мысль, 1986.
5. Боровко Н.Н. Статистический анализ пространственных геологических закономерностей. — Л.: Недра, 1971.
6. Бурдэ А.И. Картографический метод исследования при региональных геологических работах. — Л.: Недра, 1990.
7. Галицкая Н.А. Картография и ГИС // Экспресс инф. ЦНИИ-ГАИК. 1995. № 4. С. 9—25.
8. Гальперов Г.В., Перцов А.В., Брусничкина Н.А. Аэрометоды геологического изучения районов двухъярусного строения. — Л.: Наука, 1979.
9. Геоиндикационное моделирование / Под ред. Б.Н. Можаяева, Н.Ф. Афанасьева. — Л.: Недра, 1984.
10. Горный В.И., Шилин Б.В., Ясинский Г.И. Тепловая аэрокосмическая съемка. — М.: Недра, 1993.
11. Качалин А.Б., Васильев В.Н., Моралев В.М. и др. Мультифрактальность плотности линеаментов (на примере Кольского полуострова) // Исследование Земли из космоса. 1996. № 2. С. 25—32.
12. Кондратьев К.Я. Глобальная безопасность и ее экологический компонент // Изв. ВГО. 1990. Т. 122. Вып. 3. С. 212—220.
13. Можаяев Б.Н. Аэро- и космогеологические исследования в геологоразведочном процессе // Сов. геология. 1980. № 4. С. 29—39.
14. Пономарев В.Г., Вострокнутов Е.П., Акимцев В.А. Экспертная система — инструмент прогнозирования стратиформного полиметаллического оруденения. — Новосибирск: Изд. ОИГТМ СО АН СССР, 1991.
15. Свистанов С.В. Обобщенные спектральные индексы природных образований // Исследования Земли из космоса. 1994. № 2. С. 41—50.
16. Финкельштейн М.И., Мендельсон В.Л., Кутев В.А. Радиолокация слоистых земных покровов. — М.: Советское радио, 1977.

УДК 528.8:553.3/9

© А.В.Перцов, В.С.Антипов, А.А.Кирсанов, 1999

Концепция развития аэрокосмических методов природоресурсных исследований

А.В. ПЕРЦОВ, В.С. АНТИПОВ, А.А. КИРСАНОВ

Одним из важнейших источников информации о природных ресурсах и окружающей среде являются данные аэро- и космических методов, представляющие собой материалы фотографических, сканерных, радарных съемок земной поверхности в видимой, инфракрасной и радиоволновой зонах спектра электромагнитных волн (материалы дистанционного зондирования — МДЗ). В сложившихся в настоящее время условиях дефицита финансовых средств в отраслях, занимающихся изучением природоресурсной сферы, расширение возможностей использования недорогой (относительно других источников) аэрокосмической информации особенно актуально. Приоритетное значение МДЗ имеют в странах, где эффективно действуют и динамично развиваются программы изучения природных ресурсов по ма-

териалам космических съемок — в США, Канаде, странах Европейского сообщества, Японии, Китае, Индии, Бразилии, Аргентине и др. Об этом свидетельствует, в частности, и рост числа международных конференций и симпозиумов по применению данных дистанционного зондирования в геологии, экологии и других природоресурсных сферах.

В России одни из основных потребителей аэрокосмической информации — геологическая отрасль и система водного хозяйства. Более чем 50-летняя история использования МДЗ в геологических исследованиях доказала их эффективность при изучении регионального геологического строения, геологическом картографировании, минералогической оценке территорий, прогнозировании и поисках месторождений рудных

полезных ископаемых, алмазов, углеводородного сырья, подземных вод, геоэкологических исследований и картографирования, изучения динамики изменений природной среды под воздействием природных и техногенных процессов, решении инженерно-геологических и гидрологических задач, при изучении состояния и динамики береговых зон водохранилищ и решении многих других задач.

Формирование приоритетных направлений развития аэрокосмических исследований должно опираться на концептуальные положения методологического характера, в соответствии с которыми должны формироваться приоритеты и планы практических действий. Концепция развития аэрокосмических методов природоресурсных исследований служит для определения стратегически приоритетов разработки и трансфера технологий использования аэрокосмической информации при выполнении программ федерального значения и формирования дистанционной основы тематических карт, создаваемых для обеспечения государственных нужд. Концепция также может являться базовым обоснованием проведения и постановки новых научно-исследовательских разработок и целевых проектов, обеспечивающих современный уровень использования аэрокосмической информации в исследованиях природоресурсного и природоохранного характера.

Общие положения. Развитие аэрокосмических методов природоресурсных исследований необходимо для обеспечения современного научно-технического и технологического уровней ведения работ по выполнению целевых федеральных программ Министерства природных ресурсов Российской Федерации (МПР РФ).

По геологической службе:

Федеральной программы развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации;

Программы регионального геологического изучения недр России, включая создание современных Государственных геологических карт масштабов 1:1 000 000 и 1:200 000;

Геоэкология России;

Шельф России;

Комплексные исследования природной среды Антарктики и др.

По службе водного хозяйства:

Обеспечение населения России питьевой водой;

Возрождение Волги;

Противопаводковые мероприятия и др.

При формировании и выполнении научно-исследовательских и целевых программ следует учитывать, что в настоящее время важнейшими приоритетными направлениями научно-технического прогресса являются разработки, ведущиеся в соответствии с перечнем «Критических технологий федерального уровня», в частности: технологии изучения недр, прогнозирования, поиска, разведки запасов горючих ископаемых, урана и других стратегических и дефицитных видов минерального сырья;

технологии мониторинга природно-техногенной сферы;

технологии прогнозирования развития климатических, экосистемных, горно-геологических и ресурсных изменений;

технологии реабилитации окружающей среды от техногенных воздействий.

Основными тенденциями технико-технологического и организационного совершенствования предметной сферы, которые направлены на повышение природоресурсной информативности данных дистанционного зондирования, являются:

переход к цифровой регистрации аэрокосмической информации;

улучшение пространственного разрешения и расширение динамического диапазона информативных сигналов;

увеличение числа каналов регистрации и сужение их диапазонов;

создание целевых технологий решения конкретных задач, в т.ч. на основе ГИС.

Процесс использования данных дистанционного зондирования при решении природоресурсных задач состоит из четырех стадий: сбор (получение), обработка, интерпретация, вывод (представление) результатов. Необходимо гармоничное совершенствование технико-технологических компонент на всех этих стадиях.

На стадии сбора МДЗ могут быть получены в виде фото- или цифровых изображений объектов земной поверхности, содержащие характеристики их спектральной отражательной способности (видимый и ближний инфракрасный диапазоны электромагнитного спектра), интегральной картины температурного поля земной поверхности (инфракрасный диапазон), интегральных характеристик рассеяния, поглощения и отражения радиоволн от земной поверхности и близлежащих горизонтов (микроволновой диапазон). При этом для каждого разрешаемого элемента исследуемой поверхности эти измерения могут регистрироваться в виде энергетических, спектральных и/или поляризационных данных. Чаще всего, дистанционное зондирование в одном из указанных диапазонов не позволяет получать требуемые для решения конкретной задачи изучения природных ресурсов характеристики объектов земной поверхности и земной коры, а дает лишь их косвенное описание в виде множества измерений отраженного или собственного излучения элементов изучаемых площадей. Поэтому, как правило, необходим большой объем разнородной аэрокосмической информации, который может быть освоен и использован только при хранении информации в современных банках данных. Формирование таких банков данных — стратегически важное направление развития работ аэрокосмического направления.

В процессе использования МДЗ при решении разнообразных задач изучения природных ресурсов и окружающей среды необходима обработка получаемой информации, в т.ч. устранение геометрических и радиометрических искажений, обусловленных как техническими причинами (аппаратурные факторы), так и природными условиями съемки. Виды геометрических и радиометрических коррекций обусловлены типом задач изучения природных ресурсов. Так, применительно к задачам изучения геологической среды, это приведение первичных данных к используемым в геологии картографическим проекциям и масштабам, а также устранение влияния атмосферы на передачу спектральных характеристик. Одна из задач совершенствования дистанционных исследований — оптимизация работ на этой стадии.

Интерпретация МДЗ в общем виде основана на знании физических закономерностей взаимодействия электромагнитного излучения с различными природными веществами и средами, а также техногенными объектами — отражении, поглощении, пропускании, вторичном тепловом излучении, излучательной способности, влиянии физических параметров среды и др. При этом большое значение имеют факторы, формирующие изображение земной поверхности, закономерности генерализации этого изображения, а также представления о строении ландшафтов, развитии и взаимодействии эндогенных и экзогенных процессов. Их исследование повышает качество конечных заключений. Основная задача интерпретации МДЗ — переход от множества первичных измерений к характеристикам исследуемых объектов. Такой переход возможен при комплексном анализе МДЗ с результатами геолого-геофизических и ландшафтно-геохимических исследований. В частности, при решении геологических задач большое значение имеют теоретические представления о строении и развитии земной коры, формировании месторождений полезных ископаемых, механизмах проявления элементов геологического строения различной глубинности в строении ландшафтов и т.д. Поэтому при интерпретации необходимо учитывать

Отечественные системы ДЗ из космоса и характеристики получаемых материалов

Система космосъемки	Разрешение на местности, м	Спектральные диапазоны, мкм	Размер сцены для фото, км; полоса обзора для сканеров, км
<i>Сканерная съемка</i>			
МСУ-М	1000	0,50—0,60 0,60—0,70 0,70—0,80 0,80—1,00	1930
МСУ-СК	170 в 1—4 каналах, 590 в 5 канале	0,50—0,60 0,60—0,70 0,70—0,80 0,80—1,00 10,3—11,8	600
МСУ-Э	32—45	0,50—0,60 0,60—0,70 0,80—0,90	45—80
<i>Фотосъемка</i>			
КАТЭ-200	15—40	0,50—0,60 0,60—0,70 0,70—0,80	250×250
МК-4	10—15	0,46—0,51 0,52—0,57 0,64—0,69 0,81—0,90 0,57—0,81 (спектрозональная)	160×160
ТК-350	10	0,57—0,81	300×200
КФА-1000	5—8	0,57—0,68 0,68—0,81	80×80
КФА-3000	2—4	0,57—0,81	20×40
КВР-1000	1—2	0,57—0,81	40×200

самые современные научные разработки в этих областях.

Результаты интерпретации МДЗ представляются в виде картографического материала в цифровой форме или на бумажных носителях. От качества этого вывода часто зависит не только эстетическое восприятие работ, но и степень доверия к ним. Поэтому высококачественное представление результатов работ — один из важных факторов.

Состояние и потенциальные возможности аэрокосмических методов изучения природных ресурсов. За последнее десятилетие в области дистанционного зондирования (ДЗ) окружающей среды произошли коренные изменения, связанные с созданием нового поколения технических средств получения аэрокосмической информации, разработкой компьютерных средств их обработки и компьютерных технологий комплексного анализа разнородных данных, в т.ч. интегрированных географических информационных систем. Технические средства ДЗ нового поколения позволяют получать с космических и авианосителей многоспектральную информацию малого, среднего и высокого пространственного разрешения с цифровой регистрацией, которая обеспечивает резкое расширение (в сравнении с фотографической) динамического диапазона регистрируемых энергетических величин. Использование при ДЗ различных участков электромагнитного спектра (видимый, ближний инфракрасный, тепловой, микроволновый) с регистрацией измерений в нескольких узких диапазонах позволяет получать качественно новую информацию об объектах земной поверхности, строении подповерхностных горизонтов и глубинном геологическом строении, о состоянии и динамике окружающей среды. Характеристики отечественных систем ДЗ

из космоса, функционирующих в настоящее время, приведены в таблице. В настоящее время в России в практической деятельности производственных и научных организаций в основном используются аналоговые космические изображения по материалам фотографических и сканерных съемок масштабов 1:1 000 000—1:200 000, полученные в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра с пространственным разрешением от 1—2 км до 5—10 м, а также аэрофотоснимки масштабов 1:100 000—1:10 000. Для решения отдельных задач используются радиолокационные аэро- и космические снимки и материалы тепловых съемок. Данные в цифровой форме, получаемые отечественными сканерными системами МСУ-СК и МСУ-Э, используются ограниченно из-за отсутствия соответствующих компьютерных технологий их обработки.

Компьютерные средства обработки МДЗ обеспечивают широкие возможности выполнения геометрических и радиометрических коррекций, а также интегрированного преобразования данных разных спектральных диапазонов для их представления в виде, наиболее пригодном для решения задач интерпретации. Компьютерные технологии комплексного анализа разнородных данных предоставили широкие возможности создания и ведения значительных по объему баз аэрокосмических, геолого-геофизических и ландшафтно-геохимических данных на значительные площади. Эти технологии дают возможность моделирования объектов и процессов, происходящих в окружающей среде, для решения широкого круга задач. Однако до настоящего времени дешифрирование и интегрированный анализ аэрокосмической информации осуществляются в основном визуально, иногда с использованием лишь отдельных элементов компьютерных технологий. Это приводит к низкому уровню использования информации, содержащейся на аэро- и космических снимках, и к крайне низкой производительности работ. На изменение этой ситуации направлены разрабатываемые во ВНИИКАМ нормативно-методические документы МПР, где обуславливается необходимость перехода на современный уровень применения цифровых аэрокосмических данных в едином комплексе методов при решении конкретных задач природоресурсного и природоохранного характера.

Интегрированный анализ МДЗ совместно с геологическими, геофизическими, геохимическими и ландшафтными данными, осуществляемый на базе технологий географических информационных систем (ГИС), позволяет получать количественные характеристики природных объектов (с точной географической привязкой) и параметры их пространственного распределения, необходимые для решения широкого круга природоресурсных задач.

В области геологии: построение интерпретационных моделей геологического строения и локализации месторождений полезных ископаемых на разных уровнях генерализации; геологическое картографирование (обзорное, мелко-, средне- и крупномасштабное); прогнозирование месторождений рудных полезных ископаемых, алмазов, нефти и газа, подземных вод, строительных материалов, камнесамоцветного сырья; поиски термальных вод; инженерно-геологическое картографирование; поиски и разведка солей в «сухих озерах».

В области водного хозяйства: картографирование водных ресурсов, контроль их качества; изучение и картографирование факторов, влияющих на состояние водных ресурсов; создание гидрологических моделей на конкретные регионы; изучение динамики водных ресурсов и прогноз нежелательных изменений.

В области лесного хозяйства: изучение состояния и степени деградации лесных массивов; картографирование типов лесов и их инвентаризация; изучение таксационных и лесоводческих характеристик; изучение динамики лесных площадей и лесовосстановительных работ; аэро- и космический мониторинг лесных пожаров.

В области сельского хозяйства: почвенное картографирование; почвенно-мелиоративное картографирование; изучение и картографирование состояния посевов и прогнозов урожайности; изучение и картографирование процессов эрозии почв, учет эродированных земель; планирование рекультивации; контроль за мелиорацией, обнаружение скрытых утечек из оросительных систем.

В области геоэкологических исследований и картографирования, а также мониторинга состояния природной среды: картографирование нарушенности природной среды в районах интенсивной антропогенной нагрузки; изучение, картографирование и зонирование различного типа охраняемых территорий: заповедников, заказников, памятников природы, национальных и природных парков; изучение и картографирование динамики состояния природной среды; мониторинг динамики береговой зоны морей и крупных озер, водохранилищ; мониторинг процессов опустынивания; аэрокосмический мониторинг зон геоэкологического риска, в т.ч. зон сейсмической активности на суше и в акваториях, зон активной вулканической деятельности, зон интенсивного развития опасных экзогенных геологических процессов — оползней, селей, обвалов, эрозии и карста, прибрежных и прибрежно-шельфовых зон морей и крупных водоемов в условиях их интенсивного хозяйственного освоения, зон освоения минеральных ресурсов (обнаружение скрытых пожаров в отвалах угольных шахт, мест складирования промышленных и бытовых отходов, контроль аварийных ситуаций на нефтяных и газовых скважинах, промышленных объектах); выявление природных и техногенных процессов, оказывающих отрицательное воздействие на почвы, растительность, пастбища, водоемы и условия проживания человека; контроль состояния рек, их водоохраных зон, а также озер и заливов, изучение динамики водных масс и гидротехнических процессов на акваториях; выявление, картографирование и контроль за источниками загрязнения водной среды и залповыми сбросами загрязняющих веществ, их инвентаризация; оценка ущерба при нарушениях природоохранного законодательства; контроль за использованием шахтного и карьерного хозяйства; определение загрязненности рек нефтепродуктами и засоренности продуктами молевого сплава; контроль состояния магистральных газо- и нефтепроводов, в т.ч. обнаружение предаварийных ситуаций и мест утечек.

Методологические и важнейшие методические аспекты использования МДЗ при проведении геологическо-съемочных и картосоставительских работ, завершающихся созданием Государственных геологических карт РФ масштабов 1:200 000 и 1:1 000 000, сформулированы в подготовленных во ВНИИКАМ «Концептуальных положениях...» и «Требованиях к дистанционной основе» этих карт*. В указанных документах приведены общие положения содержания дистанционной основы, раскрыты задачи, решаемые с применением МДЗ, определены требования к исходным материалам ДЗ, рассмотрена организация работы по формированию дистанционной основы (в т.ч. проектирование, подготовка фактографической части дистанционной основы и вопросы методики ее использования, форма представления результатов интерпретации).

Возможности аэрокосмических методов при региональных геологических исследованиях можно показать на примере перечня задач, решаемых с применением МДЗ при составлении основных документов Госгеолкарты-1000 (геологической карты дочетвертичных образований, геологической карты четвертичных образований, карты полезных ископаемых, эколого-геологической карты-схемы):

уточнение структурного каркаса и блокового строения;

уточнение контуров (границ) геологических тел с учетом естественной генерализации;

уточнение рисунка складчатых структур;

структурно-металлогеническое районирование;

выявление эколого-геологических условий и потенциально опасных для обитания и деятельности человека геологических процессов и явлений.

При составлении основных документов Госгеолкарты-200 (геологической карты, карты четвертичных образований, карты полезных ископаемых и закономерностей их размещения, эколого-геологической схемы) МДЗ используются при решении следующих задач:

выделение площадных стратифицированных и нестратифицированных объектов, прослеживание их границ, получение информации о вещественном составе тел;

выделение линейных объектов (прослеживание отдельных пластов и маркирующих горизонтов, даек, жил и жилообразных малых интрузий, разрывных нарушений и узлов их пересечения, зон сжатия и повышенной трещиноватости);

проведение структурно-тектонических исследований (выделение структурно-формационных зон, тектонических блоков, кольцевых и складчатых структур);

выявление скрытых на глубине геологических объектов, погребенных частей геологических тел, выходящих на поверхность, их геометризация;

установление закономерностей размещения полезных ископаемых;

минерогеническое районирование;

выявление и локализация потенциально рудоносных объектов, перспективных участков;

изучение эколого-геологических условий, выявление потенциально опасных для обитания и деятельности человека геологических процессов и явлений, прогноз их возможного развития.

Роль дистанционных методов в проектах целевых программ по рациональному использованию, восстановлению и охране водных объектов также возрастает в последние годы, особенно в решении следующих задач:

контроль за эксплуатацией водохранилищ и водохозяйственных систем комплексного назначения, защитных и гидротехнических сооружений, накопителей сточных вод и других жидких отходов;

регулирование паводкоопасных территорий;

установление водоохраных зон и соблюдение режима хозяйственной деятельности в пределах этих зон;

проведение государственного мониторинга водных объектов.

В целом, анализ потенциальных возможностей МДЗ позволяет сделать вывод, что их широкое использование на основе компьютерных технологий при региональных геологических исследованиях, составлении Госгеолкарт масштабов 1:1 000 000 и 1:200 000, прогнозировании и поисках месторождений полезных ископаемых, геоэкологическом картографировании, решении задач водного хозяйства и других природоресурсных сфер позволит повысить эффективность решения практических задач, представит возможность с новых позиций подойти к интерпретации и переинтерпретации имеющихся материалов других видов работ.

Анализ современного состояния **научно-методического обеспечения** использования аэрокосмической информации при изучении природных ресурсов в целом и в геологии в частности позволяет сформулировать следующие основные направления развития аэрокосмических методов.

1. Развитие методов геоиндикационного анализа МДЗ, получаемых техническими средствами нового поколения, и создание геоиндикационных моделей типовых объектов геологического картографирования применительно к различным ландшафтным условиям территории Российской Федерации.

2. Исследование физических основ ДЗ в радиоволновом диапазоне электромагнитных волн и создание на этой основе методов и компьютерных технологий ис-

* «Концептуальные положения содержания и формирования дистанционной основы Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200 000», «Требования к дистанционной основе Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:1 000 000», «Требования к дистанционной основе Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200 000». ВНИИКАМ, 1996—1998 гг.

пользования материалов многочастотной радиолокационной аэро- и космической съемки при геологических и геоэкологических работах, решении водохозяйственных и природоохранных задач.

3. Исследование физических основ ДЗ в тепловом диапазоне электромагнитных волн и создание методов использования материалов аэро- и космических тепловых съемок при изучении глубинного геологического строения, прогнозировании и поисках месторождений полезных ископаемых, геоэкологических исследованиях.

4. Создание компьютерных технологий подготовки дистанционной основы карт геологического содержания масштабов 1:2 500 000, 1:1 000 000, 1:200 000 и др.

5. Создание компьютерных технологий интегрированного анализа МДЗ различного вида при решении следующих задач:

изучение регионального геологического строения, создание обзорных геологических карт, Госгеолкарт масштаба 1:1 000 000 и 1:200 000;

составление прогнозно-минералогических карт мелкого и среднего масштабов;

проведение комплексных исследований и картографирование зон перехода суша — море;

проведение геоэкологических исследований;

мониторинг геологической среды;

проведение гидрогеологических и инженерно-геологических исследований;

проведение работ по изучению тектонического строения нефтегазоносных бассейнов и прогнозированию структур, перспективных на поиски месторождений нефти и газа.

6. Развитие методов анализа МДЗ при решении водоресурсных задач и определение элементов водного баланса различных регионов Российской Федерации.

7. Создание компьютерных экспертных систем интегрированного анализа МДЗ при решении природоресурсных задач и, в первую очередь, методики создания интерпретационной части дистанционной основы Госгеолкарт.

8. Создание и научно-методическое сопровождение технико-технологических комплексов, обеспечивающих мониторинг окружающей среды в связи с природопользованием на основе оперативной космической информации.

9. Формирование специализированного банка данных аэрокосмической информации в цифровой и аналоговой формах для обеспечения производственной деятельности предприятий Министерства природных ресурсов.

В организационном плане для расширения круга пользователей важная роль принадлежит детально проработанной системе **трансфера (передачи) компьютерных технологий** анализа аэрокосмической информации применительно к конкретным задачам изучения природных ресурсов и окружающей среды. Трансфер должен базироваться на существующем в производстве опыте работы с аэро- и космическими изображениями.

Первый этап трансфера технологий должен быть основан на обеспечении площадей проведения различного вида природоресурсных исследований дистанционной основой — оптимальным образом представленных в цифровом и аналоговом видах МДЗ и их целевых обработок. При этом различаются фактографическая и интерпретационная части дистанционной основы.

Компонентами фактографической части являются нормализованные материалы дистанционного зондирования в цифровой и аналоговой формах, а также результаты формализованных преобразований этих материалов в цифровой форме. При нормализации осуществляется приведение материалов съемки в требуемые картографическую проекцию и масштаб, коррекция фотометрических искажений, монтаж снимков в единое изображение, картографическая привязка. Формализованная обработка — это различные пространственно-частотные фильтрации, межканальные преобразования и т.п., имеющие целью выявление и подчеркивание тех элементов изображения, которые отражают объекты геологического строения и окружающей среды.

Интерпретационная часть дистанционной основы представляет собой результаты экспертного анализа изображения с использованием тематической и ландшафтной информации, представленные в виде целевых карт с соответствующей легендой.

На первом этапе трансфера последовательно должны решаться задачи технического и программного обеспечения соответствующих производственных организаций на базе стандартных для отрасли средств, которые будут функционировать при проведении работ.

Второй этап трансфера должен быть основан на непосредственной передаче в производственные организации компьютерных технологий анализа аэрокосмической информации, которые обеспечивают создание интерпретационной части дистанционной основы. Применительно к Госгеолкарте-1000 и Госгеолкарте-200 эти технологии призваны обеспечить получение информации для соответствующих компонентов Госгеолкарт — геологического, минералогического, тектонического и геоэкологического содержания.

Компьютерные технологии обработки и анализа аэрокосмической информации в настоящее время находятся в процессе разработки и по мере выхода из стадии научно-исследовательских работ будут передаваться в производственные геологические организации, освоившие методики и технологии в рамках первого этапа.

Важной частью стратегии второго этапа трансфера компьютерных технологий использования аэрокосмической информации должны являться разработка и передача экспертных систем. Последние представляют собой программные средства, содержащие базы знаний, аккумулирующие опыт экспертов — ведущих специалистов производственных и научно-исследовательских организаций, и позволяют геологам производственных организаций использовать накопленные в отрасли знания в повседневной практической работе, минуя длительный этап традиционного повышения квалификации. Составные части экспертных систем — пользовательский интерфейс, база данных, база знаний, набор инструментальных средств. Пользовательский интерфейс должен обеспечить просмотр изображения из базы данных и материалов пользователя, формирование описания изображений объектов для решения задач дешифрирования и получение экспертных заключений системы. Банк данных, содержащий аэро- и космические снимки, их описания в соответствии с решаемым кругом задач, технические данные, необходимые комментарии следует постоянно пополнять. База знаний должна содержать и поддерживать процедуры обращения к наборам дешифровочных признаков для различных геологических и ландшафтных условий, классификации объектов дешифрирования, процедуры логического вывода для получения соответствующих заключений и процедуры объяснения для обоснования сделанного заключения.

Из всего вышесказанного можно сделать следующие выводы.

Организационное обеспечение реализации основных положений Концепции заключается в перспективном и текущем планировании научно-исследовательских работ и мероприятий по трансферу технологий в организации МПР РФ.

Основные направления развития научно-методического обеспечения использования аэрокосмической информации при изучении природных ресурсов необходимо периодически корректировать с учетом новейших достижений в этой области в России и за рубежом.

Аэрокосмическая информация должна использоваться и в процессе выполнения Федеральной программы по изучению, охране и воспроизводству природных ресурсов, охватывающей кроме ресурсов недр, водных ресурсов и земельные, лесные, рыбные. При этом МДЗ могут являться не только оперативно используемой информацией при решении конкретных задач, но и средством независимой экспертизы результатов хозяйственной деятельности по землепользованию, состоянию лесных и других ресурсов.

Дистанционная основа Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200 000 второго издания

А.В. ПЕРЦОВ, В.И. ЗАХАРОВ (ВНИИКАМ), С.И. СТРЕЛЬНИКОВ (ВСЕГЕИ), В.С. АНТИПОВ, Г.В. ГАЛПЕРОВ (ВНИИКАМ)

Приоритетным направлением регионального геологического картирования России в настоящее время и на среднесрочную перспективу является создание Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200 000 второго издания (Госгеолкарта-200/2) с использованием компьютерных технологий и широким привлечением новой геологической, геофизической, геохимической и аэрокосмической информации. В процессе этих работ создается фундаментальная многоцелевая научная геологическая основа природопользования, ориентированная на удовлетворение потребностей экономического и социального развития регионов и территории страны в целом.

Один из информационных блоков, который необходим при создании Госгеолкарты-200/2, представлен материалами дистанционного зондирования (МДЗ). При этом под МДЗ понимаются материалы фотографических, сканерных и радиолокационных съемок земной поверхности с воздушных и космических носителей в видимой, инфракрасной и радиоволновой зонах спектра электромагнитных волн. Совокупность МДЗ, результатов их дешифрирования и интерпретации, необходимая для создания современной геологической карты, а также и других картографических компонентов комплекта Госгеолкарты-200/2, представляет собой дистанционную основу настоящей карты (ДО-200).

Целевое назначение дистанционной основы — повышение качества и информативности карт, входящих в комплект Госгеолкарты-200/2. Улучшается качество путем целенаправленной обработки и анализа МДЗ для выделения информации геологического содержания, позволяющей решать основные задачи среднemasштабного геологического картирования и картографирования:

уточнение существующих представлений о геологическом строении района съемки, выявление новых геологических объектов;

анализ закономерностей размещения и прогноз полезных ископаемых;

геоморфологические исследования;

оценка эколого-геологической обстановки и прогноз ее развития.

ДО-200 состоит из фактографической и интерпретационной частей. К основным компонентам фактографической части относятся: нормализованные МДЗ в цифровой и аналоговой формах; результаты формализованных преобразований МДЗ, как правило, только в цифровой форме.

Нормализация МДЗ предусматривает их трансформирование в картографическую проекцию и геодезическую систему топографической основы, принятой за базовую для Госгеолкарты-200/2; устранение фотометрических искажений, монтаж отдельных снимков в единое изображение, координатную привязку.

Формализованная обработка представляет собой преобразование исходного изображения компьютерными методами и направлена на подчеркивание тех его элементов, которые могут быть использованы при выявлении информации о геологическом строении и состоянии природной среды. Формализованная обработка включает различного рода пространственно-частотные фильтрации, межканальные преобразования, классификации, автоматизированный линеаментный анализ и др. Состав формализованных преобразований зависит от ландшафтно-геологических условий территории картирования и типа решаемой задачи.

Интерпретационная часть ДО-200 (схемы дешифрирования, схемы интерпретации результатов дешифрирования) создается по результатам экспертного визуального и компьютерного интерактивного анализа фак-

тографической части дистанционной основы с учетом имеющейся геологической, геофизической и другой информации.

Исходные материалы, используемые для формирования дистанционной основы, должны удовлетворять двум требованиям — детальности и обзорности, а также должны быть представлены в нескольких информативных спектральных диапазонах.

Детальность предусматривает выявление по МДЗ минимальных по размерам объектов, подлежащих картированию, а также внесмасштабных объектов, имеющих важное значение для понимания геологического строения картируемой территории, закономерностей размещения полезных ископаемых, решения эколого-геологических задач. При этом следует иметь в виду, что в большинстве случаев объекты картирования выявляются по МДЗ по совокупности природных индикаторов. Размеры каждого индикатора примерно на порядок меньше, чем сам объект. Способность эффективно отличать индикаторы при дешифрировании обеспечивается при пространственном разрешении изображения 8—10 лин/мм, что в пересчете для масштаба 1:200 000 дает разрешение на местности 20—30 м. Такая характеристика МДЗ и принята за обязательное требование к детальности исходных материалов. С учетом необходимости картирования важных внесмасштабных объектов данная характеристика уменьшается примерно вдвое. Таким образом, оптимальное пространственное разрешение исходных материалов ДО-200 должно составлять 10—15 м.

Обзорность обеспечивается снимками, которые охватывают такую территорию, где отображается положение картируемой площади в общей структуре региона.

Удовлетворить эти требования на практике можно, используя МДЗ различного масштабного уровня — обзорного, основного и детального (табл. 1).

При создании ДО-200 использование МДЗ основного и обзорного масштабных уровней обязательно. Основные должны покрывать всю площадь картирования, обзорные — территорию не менее 3° по долготы и 2° по широты, в центре которой находится соответствующий лист Госгеолкарты-200/2. При создании обзорного масштабного уровня ДО могут быть использованы материалы в 2,5—5 раз более мелкого масштаба, чем при основном с захватом площадей, смежных с картируемыми. Детальный масштабный уровень необязателен и используется для расшифровки участков, сложных по строению.

Характеристики материалов космосъемок, рекомен-

1. Материалы дистанционного зондирования, рекомендуемые при создании ДО-200

Системы съемки для получения МДЗ	Масштабный уровень		
	Основной (1:200 000)	Обзорный (1:1 000 000)	Детальный (1:50 000)
МК-4	XXX	XXX	X
МСУ-Э	X	—	—
КАТЭ-200	XX	XXX	—
ТК-350	X	XXX	—
КФА-1000	XX	—	X
МСУ-СК	—	X	—
Landsat TM	X	—	—
Аэросъемка (фотографическая, сканерная, радиолокационная)	X	—	X

Примечание: материалы: XXX — рекомендуемые в качестве базовых, XX — дополнительные, которые могут быть использованы в качестве базовых при отсутствии рекомендуемых, X — дополнительные

дующих к использованию при создании ДО-200, представлены в табл. 2.

Исходными (базовыми) материалами при формировании фактографической части ДО-200 служат материалы съемочной системы МК-4 в спектральных диапазонах 0,52—0,57; 0,64—0,69; 0,81—0,9 мкм. Эти материалы используются при формировании как основного, так и обзорного и детального масштабных уровней ДО-200. При создании дистанционной основы листов Госгеолкарты-200/2, территория которых не обеспечена материалами МК-4 удовлетворительного качества, следует использовать в качестве базовых материалы съемочных систем КАТЭ-200 и(или) КФА-1000. Данные материалы являются дополнительными при наличии съемок МК-4 хорошего качества. Дополнительные материалы являются исходными материалами для основного масштабного уровня служат результаты высотных аэросъемок, а также материалы космосъемок фотографической системы ТК-350 и сканерной съемочной системы МСУ-Э, а из зарубежных — материалы Landsat-TM (и других с характеристиками не хуже), которые в отдельных случаях могут дать информацию об особенностях вещественного состава геологических тел, о геологических процессах (в т. ч. современных).

Обзорный масштабный уровень фактографической части ДО-200 создается на базе съемочных материалов МК-4, КАТЭ-200 или ТК-350; при этом как дополни-

2. Технические характеристики некоторых космических съемочных систем

Системы космосъемок	Разрешение на местности, м	Спектральные диапазоны, мкм	Размер сцены для фотографической системы; полоса обзора для сканерной системы, км
<i>Фотосъемка</i>			
МК-4	10—15	0,46—0,51 0,52—0,57 0,64—0,69 0,81—0,90 0,57—0,81 (спектрозональная)	160×160
КФА-1000	5—8	0,57—0,81 (спектрозональная)	80×80
КАТЭ-200	30—40	0,50—0,60 0,60—0,70 0,70—0,84 0,57—0,81 (спектрозональная)	250×250
ТК-350	10	0,57—0,90	300×200
<i>Сканерная съемка</i>			
МСУ-Э	Размер пиксела 45×35	0,5—0,6 0,6—0,7 0,8—0,9	45
МСУ-СК	200 в 1—4-метровых каналах; 500 в 5-метровом канале	0,50—0,60 0,60—0,70 0,70—0,80 0,80—1 10,3—11,8	600
Landsat TM	28—120 в 7-метровом канале	0,45—0,52 0,52—0,60 0,63—0,69 0,76—0,90 1,55—1,75 2,08—2,35 10,4—12,6	185
NOAA AVHRR	1000	0,55—0,90 0,72—1,10 3,55—3,93 10,50—11,50 11,50—12,50	3000

тельные можно использовать снимки МСУ-СК и другие, близкие к ним по характеристикам. Детальный масштабный уровень ДО-200 формируется по материалам космосъемок системами МК-4, КФА-1000 и других съемок с разрешением на местности не менее 10—15 м, а также аэросъемочных работ.

Для выявления основных объектов геологического картирования наиболее информативны МДЗ длинноволновой части видимого оптического диапазона и ближней инфракрасной области. Для гидрогеологического и эколого-геологического картирования при проведении работ в районах, перспективных на нефть и газ, и, возможно, при выявлении по особенностям аномального теплового поля некоторых элементов глубинного строения, в т. ч. контролирующих размещение месторождений твердых полезных ископаемых, следует использовать данные теплового канала космических съемок и материалы специальных тепловых самолетных съемок.

Базовые материалы основного и обзорного уровней генерализации формируются как исходная фактографическая часть ДО-200 на этапе подготовительных работ, остальные составляющие готовятся в течение всего процесса создания Госгеолкарты-200/2.

Исполнители работ по созданию конкретных листов Госгеолкарты-200/2 используют аналоговую и цифровую формы фактографической части ДО-200. Материалы в цифровой форме должны быть в форматах .tif и .img. Аналоговые материалы применяются как в виде отдельных снимков, так и в виде космофотопланов. Все материалы сопровождаются картограммой использованных снимков с указанием их основных характеристик (паспорт ДО-200).

Однако, что касается формализованных преобразований, то проведенный на ряде тестовых участков (Карелия, Приполярный Урал) сравнительный анализ информативности преобразованных изображений позволяет предложить три группы преобразований.

Первую группу составляют различного рода пространственно-частотные фильтрации (по направлениям, секторная, низко- и высокочастотная). Преобразования подобного типа следует проводить обязательно. Однако конкретный вид преобразования, очевидно, не может быть определен априори — в зависимости от ландшафтно-геологической обстановки наиболее информативными могут быть разные виды фильтрации. Данная группа преобразований направлена в первую очередь на выявление тектонических структур. Особое место в практике использования ДО имеет технологически примыкающий к этой группе преобразований автоматизированный линейamentный анализ.

Вторая группа представлена классификацией по спектральным признакам, которая применяется обязательно преимущественно для ландшафтно-геоморфологического анализа территории и в меньшей степени для линейamentного анализа.

Преобразования указанных обязательных групп из-за необходимости использования сложных программ целесообразно проводить централизованно и передавать исполнителям Госгеолкарты как составной элемент фактографической части дистанционной основы.

К третьей группе относятся рекомендуемые преобразования — текстурный анализ, метод главных компонент, а также различные преобразования из меню общедоступных графических пакетов, которые как правило, дополняют преобразования первой и второй групп и могут проводиться непосредственно исполнителями в процессе подготовки интерпретационной части дистанционной основы. Интерпретационная часть формируется исполнителями работ самостоятельно или совместно со специалистами-дешифровщиками из специализированных организаций. Аналоговая форма (традиционные изображения на бумаге) обрабатываются вручную 2—3 экспертами с составлением различных схем (линеamentы, геолого-структурные, складчатые и кольцевые структуры и др.). При этом в процессе подготовки интерпретационной части ДО-200 для каждого

картографического компонента (карты, схемы) Госгеолкарты-200/2 должна готовиться самостоятельная интерпретационная схема, учитывающая специфику конечного продукта.

Применение материалов ДО разных масштабных уровней (МДО) обеспечивает последовательную детализацию дешифровочной информации, начиная с обзорных материалов. На каждом последующем уровне уменьшается глубинность получаемой информации, но увеличивается ее детальность. Информация более высокого уровня генерализации должна наноситься на схемы, создаваемые по материалам более низких уровней для выявления слабоконтрастных геологических границ и обеспечения целенаправленного поиска мелких объектов, которые могут проявиться или выявить геологическую сущность крупных структур, устанавливаемых при анализе материалов предшествующих уровней. Итоговая интерпретационная схема основного масштаба (1:200 000) должна являться результатом постепенного заполнения структурного каркаса, полученного по материалам наиболее высокого уровня, данными о строении мелких объектов, выделяемых на более детальных МДО.

В цифровой форме МДО обрабатываются и анализируются при поддержке ГИС-технологий. Как правило, обработка должна проводиться в интерактивном режиме. При этом алгоритм использования преобразованных изображений в процессе составления геологических карт предусматривает четыре этапа: 1) анализ исходных изображений и геолого-картографических материалов; 2) выявление геологических задач, решение которых требует дополнительной информации; 3) подбор оптимальных преобразований для выделения необходимой информации и дешифрирование преобразованных изображений; 4) интегрированный анализ исходных, преобразованных изображений и геолого-картографических материалов для выявления геологических элементов, которые необходимо отобразить на геологической карте.

Использование ГИС способствует интеграции разнородных данных: качественных, количественных, экспертных, результатов обработки на основе компьютерных процедур и др., представленных как в растровом, так и векторном виде. Комплексная (в совокупности с различными методами геофизики, геохимии, геологии) обработка вначале проводится по группам информации, а затем интегрируются групповые результаты, которые либо в комплексе, либо отдельно служат основой различных карт.

Материалы геофизических исследований, обладая трехмерностью получаемой информации, помогают в определении природы дешифрируемых объектов, дополняют вещественную и структурную информацию, полученную при дешифрировании.

Материалы геохимических исследований дают представление о специализации дешифрированных структурно-вещественных комплексов на разные полезные ископаемые, о геохимической характеристике объектов и процессов, в т.ч. геоэкологической.

Совместный анализ МДЗ и геологических данных — естественная практика работ при использовании дистанционной информации. В дополнение к общепринятым полезны неотектонический и структурно-магматический анализ геологической среды совместно с данными МДЗ. Неотектонический анализ помогает трактовке особенностей отражения разновозрастных структур на МДЗ, их эрозионного среза, степени новейшей активности. Структурно-магматический анализ совместно с данными МДЗ способствует выявлению палеоструктурных обстановок, особенно в инверсионную (поздняя геосинклинальная) и орогенную стадии, для которых типичны полноразвитые ряды интрузивных и вулканогенных формаций.

Вопросы применения материалов космических съемок при создании тематических карт геологического содержания изложены в методических и монографических работах, подготовленных во второй половине

80-х годов [1—4 и др.]. Данные работы актуальны и в настоящее время. Следует обратить внимание на то, что цифровая форма представления ДО позволяет более полно использовать возможности МДЗ в интерактивном режиме тогда, когда геологи могут самостоятельно перебирать на компьютерах всевозможные варианты преобразований, находя наиболее информативные.

При создании геологической карты ДО-200 определяются: 1) структурный каркас картографируемой территории; 2) контуры геологических тел (геологических границ) с учетом естественной генерализации [5]; 3) рисунок складчатых структур. Методика интегрированного анализа дистанционной и геолого-картографической информации при составлении геологической карты наиболее эффективно реализуется именно при такой последовательности работ. Очень существенна роль ДО-200 при создании схем (тектонического районирования, глубинного строения), сопровождающих геологическую карту.

Выявление структурного каркаса базируется на анализе сети разрывных нарушений по исходным геологическим данным и МДЗ с использованием компьютерного линейного анализа. Важное значение на этапе создания структурного каркаса имеет геологическая интерпретация выявляемых по МДЗ кольцевых структур.

Контуры геологических тел устанавливаются на основе анализа геологических материалов и уточнения рисунка геологических границ по материалам МДЗ, для чего применяются методы классификации по спектральным характеристикам, пространственно-частотные фильтры.

При определении внутренней структуры и вещественного состава геологических тел большое значение имеет анализ спектральных характеристик, а также анализ тонких различий структуры линейментов.

Роль дистанционных методов при составлении карт четвертичных отложений (КЧО) весьма велика. В закрытых районах даже при наличии значительного числа скважин границы четвертичных образований прослеживаются с помощью материалов дистанционных съемок. При создании КЧО базовые материалы ДО-200 служат для оконтуривания основных стратиграфо-генетических подразделений, а также являются основой при генерализации и сведении материалов геолого-съемочных и картосоставительских работ масштаба 1:50 000, при увязке листов Госгеолкарты-200/2. Однако таких материалов часто бывает недостаточно, чтобы уверенно идентифицировать генетические типы четвертичных отложений. Поэтому для решения ключевых стратиграфо-генетических проблем для фрагментов территории следует применять космические съемки детального уровня генерализации, материалы аэросъемочных работ.

При создании картографических компонентов Госгеолкарты-200/2 с применением МДЗ минерагенического содержания следует выявлять и изучать рудоконтролирующие факторы, определяющие закономерности размещения различных видов полезных ископаемых. В геологической литературе описаны многочисленные примеры закономерного расположения рудных объектов относительно дизъюнктивных и пликтивных структур, вещественных комплексов, картируемых по данным МДЗ с использованием традиционных методов линейментного и геоиндикационного анализа [1—4]. Дополнительные возможности представляют современные многоспектральные космические съемки, цифровая обработка их данных позволяет определить новые критерии минерагенической приуроченности.

При картировании и картографировании эколого-геологических ситуаций (эколого-геологических условий и опасностей) необходимо использование МДЗ. В процессе картирования природных экологически неблагоприятных и опасных объектов МДЗ могут быть основными или вспомогательными. При картировании антропогенной нарушенности геологической среды на земной поверхности МДЗ не имеют альтернатив.

Исходные (базовые) комплекты фактографической части ДО-200 должны готовиться по самостоятельным проектам на опережающем этапе работ по созданию Госгеолкарты-200/2. Непосредственно при составлении Госгеолкарты-200/2 базовый комплект пополняется дополнительными материалами и формируется интерпретационная часть ДО-200. Эти работы желательно выполнять силами единого коллектива, состоящего из представителей организаций-исполнителей ДО-200 и геологов-картосоставителей.

Создание дистанционной основы современной Государственной геологической карты России масштаба 1:200 000 — необходимый этап формирования геолого-картографических информационных систем XXI в. При этом, МДЗ должны рассматриваться вместе с используемыми геологическими, геофизическими и другими данными как необходимый исходный материал, кото-

рый позволяет получить принципиально новую информацию по сравнению с результатами геологических и геофизических съемок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Использование материалов космических съемок при региональных геологических исследованиях* (Методические рекомендации). — М., 1985.
2. *Космогеология СССР* / Под ред. В.Н.Брюханова, Н.В.Межеловского. — М.: Недра, 1987.
3. *Космическая информация в геологии*. — М.: Наука, 1983.
4. *Космическая фотосъемка и геологические исследования* / Под ред. Г.Б.Гонина, С.И.Стрельникова. — Л.: Недра, 1975.
5. *Strelnikov S.I. Usage of Natural object generalization phenomenon in satellite images in geologic cartography // Proceedings of the 18th Intern. Cartographic Conference (Stockholm, 1997). Vol.1. Gavle, 1997. P. 149—152.*

УДК 528.8:553.3/4

© Коллектив авторов, 1999

Космоструктурные критерии локализации рудных гигантов

А.В. ПЕРЦОВ, Г.В. ГАЛЬПЕРОВ, В.С. АНТИПОВ (ВНИИКАМ), С.И. ТУРЧЕНКО (ИГГД РАН)

В процессе многолетних исследований при анализе данных дистанционного зондирования рудных районов, расположенных в различных геологических и ландшафтных условиях, выявлены структурно-тектонические закономерности размещения ряда крупнейших рудных объектов [1, 4, 5, 8]. Эти работы способствовали определению общих космоструктурных критериев локализации площадей, содержащих рудные суперконцентрации. В статье рассмотрены критерии регионального уровня генерализации (УГ) рудных объектов, вмещающих крупнейшие месторождения золота, цветных и редких металлов. Закономерности размещения крупнейших золоторудных объектов ранее нами не публиковались, поэтому здесь они изложены более подробно по сравнению с другими полезными ископаемыми, материалы по которым имеются в публикациях [1, 4, 8].

Космоструктурные модели рудных объектов, рассмотренных в данной статье, получены при анализе космических снимков регионального уровня генерализации (масштаб $\approx 1:1\,000\,000$).

Золоторудные объекты. Один из существенных вопросов мировой экономики, и в т.ч. экономики России в современное время — потенциал золота и его добыча, в особенности добыча из месторождений, крупных по запасам и уникальных по содержанию. Важность данного вопроса подтверждается уже тем, что геологические службы большинства развитых и развивающихся стран приняли участие в организации Международного Проекта по Программе международной геологической корреляции «Промышленные суперконцентрации металлов в литосфере» (1995 г.). Предварительный анализ банка данных по крупнейшим месторождениям золота и редких металлов привел к выводу [7], что наиболее важные факторы, определяющие крупные концентрации металлов, — телескопирование и длительность формирования месторождений.

Телескопирование — устойчивое пространственное совмещение минерализации различных источников и различной природы (эндогенной и экзогенной). **Длительность и многоэтапность формирования** оруденения при изменении геодинамических обстановок во времени или неоднократном их повторении предполагают также выделение в истории формирования месторождений этапов подготовки, формирования и сохранения концентрированных руд при последующем геологическом развитии. Уникальные и крупные месторождения золота образуются при проявлении именно таких факторов, при использовании всего потенциала рудогене-

зирующей системы и вследствие почти полного совмещения в пространстве процессов концентрирования металла на всех этапах.

Анализ возрастного распределения 65 крупных и уникальных месторождений золота в различных регионах мира позволил выделить основные временные интервалы формирования кварцево-жильных золоторудных месторождений: 3500—3200, 2800—2600, 400—280, 130—60 и 40—5 млн. лет. По существу, такие интервалы рудообразования совпадают с периодами максимально активного рифтогенеза в истории Земли и в особенности для мезозойско-кайнозойских интервалов, с периодами интенсивной тектоно-магматической активизации ранее сформированной континентальной коры.

Крупнейшие в мире кварцево-жильные месторождения золота сосредоточены в архейских зеленокаменных поясах: Хоумстейк, Южная Дакота (США), месторождения субпровинции Абитиб в Канаде (Керр-Эдисон, Керк-Лэнд, Поркьюпайн и др.), пояса Вилуна-Норсман в Австралии (Камбалда, Калгурли, Виктория и др.), пояса Барбертон в Южной Африке (Шеба, Комати-Ривер и др.). Генетически такие месторождения представляют собой гидротермальные кварцево-жильные тела, сформированные в несколько этапов в течение длительного времени и залегающие в определенных стратиграфических горизонтах метавулканогенных или метаосадочных пород. Насыщение кварцево-жильными золотоносными телами приурочено к разрывным нарушениям, зонам рассланцевания на участках пересечения с разрывными нарушениями и сопровождается низкотемпературными метасоматитами безрезитового типа. Кроме того, часто наблюдается пространственная близость золоторудных месторождений со штоками, некками и пластовыми телами кварцевых порфиров, дайками лампрофиров и диоритовых порфиров.

Особую группу представляют позднеархейские осадочно-гидротермальные месторождения золота типа золотоносных конгломератов (Витватерсранд в ЮАР, Жакобина в Бразилии и Тарква в Гане), для которых, по данным А.Д.Щеглова [11], характерной особенностью является приуроченность их к рифтогенным впадинам, формирующимся при проявлении процессов тектоно-магматической активизации на древних кратонах.

Многие типичные черты архейских золото-кварцевых месторождений свойственны и верхнепротерозойско-фанерозойским месторождениям этой группы. Однако важная роль коллекторов жильных тел принадлежит черным углеродистым сланцам или аргиллитам, а также характерна ассоциация с альбит-серицит-карбо-

натными метасоматитами, связанными с зонами разрывных нарушений. Такие месторождения типичны для позднепротерозойских и фанерозойских складчатых поясов, обрамляющих древние кратоны. Им свойственна неоднократная мобилизация золота из первичных осадочно-гидротермальных концентраций или древних (архейских) коровых протолитов, устанавливаемая иногда современными изотопными методами. Например, месторождения на западе США (Голд Хилл, Хиллсборо), Вейшань и Луншань в Китае, Мурунтау в Узбекистане, Сухой Лог в Северном Прибайкалье.

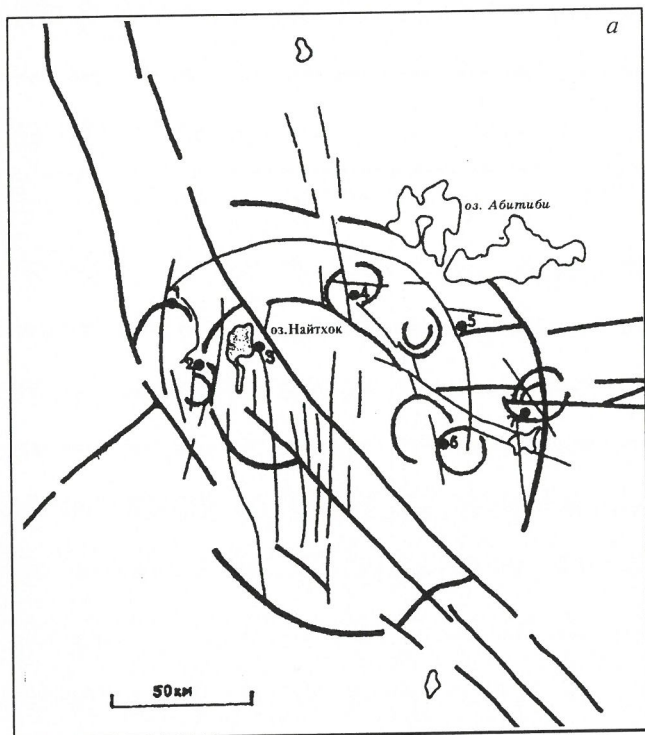
Независимо от возраста, все жильно-кварцевые мес-

торожения золота принадлежат к типу стратабаунд, в котором наложенное жильное оруденение приурочено к определенным стратиграфическим или литологическим горизонтам. Кроме того, такие месторождения контролируются преимущественно структурными факторами и локализованы в регионах активного длительного проявления мантийного магматизма, связанного с рифтогенезом.

Субпровинция Абитиби (Канада). Здесь сосредоточены наиболее крупные жильные кварц-золоторудные объекты, для некоторых из них приведены запасы золота (рисунок, а). Эти объекты приурочены к верхней части разреза зеленокаменных поясов, состоящих из мощных толщ мафит-ультрамафитовых эффузивов, бимодальных (базальт-риолитовых) вулканитов и в самой верхней части — метавулканогенно-осадочных пород и кальциево-щелочных вулканитов, возраст которых 2696—2732 млн. лет. Весь комплекс пород подвержен складчатому и интенсивно проявленным разрывным деформациям. Именно к участкам распространения позднеархейских разрывных деформаций и даек лампрофитов в верхней части разреза приурочены карцево-жильные золоторудные тела [12].

Космоструктурная модель (см. рисунок, а) позволяет сделать следующие выводы.

Все месторождения локализованы во внешнем поясе сложной кольцевой структуры, диаметром около 140 км. Эта кольцевая структура приурочена к области пересечения линейных зон разломов: северо-западной, главной и более ранней субширотной, которая совпадает с направлениями разрывных структур, разделяющих комплексы пород субпровинции Абитиби, являющихся главными



Космоструктурные модели золоторудных субпровинций Абитиби (а), бассейна Витватерсранд (б), района Мурунтау (в):

1 — рудные поля (1 — Тимминс, 2 — Поркьюпайн, 1650 т) и месторождения (3 — Айварис, 4 — Холтир, 5 — Мак-Дермот, 6 — Керк-Ленд, 700 т, 7 — Керр Эдисон, 400 т) (на а), золоторудные месторождения (на б), мелкие золотые и золото-серебряные месторождения (на в); 2 — рудное поле Мурунтау; зоны транзитных разломов: 3 — главные линейные, 4 — второстепенные; 5 — зоны локальных рудоконтролирующих разломов; 6 — кольцевые структуры; 7 — рудопроявления золота; 8 — границы ступенчатого грабена (рифта); 9 — выходы пород палеозойского фундамента на поверхность

производными островодужных и рифтогенных событий, происходивших здесь в позднем архее.

Есть и другие факторы структурного контроля месторождений — сравнительно мелкие (диаметр 15–22 км) кольцевые структуры простого строения, находящиеся в пределах развития локальных (по отношению к крупной кольцевой структуре) субмеридиональных зон разломов. Подобные зоны вне крупной кольцевой структуры отсутствуют.

Рифтогенный бассейн Витватерсранд (ЮАР) в генетическом понимании А.Д.Щеглова [11] представляет собой только золотоносную часть крупной рудоносной площади и не включает платинометалльные месторождения рифа Меренского в расслоенном ультрабазитовом массиве Бушвелд, сформированном на более позднем протерозойском этапе рифтогенеза. Золотоносная площадь Витватерсранд сформирована в течение двух главных стадий позднеархейского рифтогенеза, выраженных в образовании прогибов, наложенных на Капваальский кратон (группа Доминион 2,9–2,8 млрд. лет, прогиб Витватерсранд 2,7–2,6 млрд. лет).

Именно к отложениям прогиба Витватерсранд приурочены главные золоторудные поля (см. рисунок, б), которые дали более 45 000 т золота [10, 11]. Прогиб Витватерсранд вытянут в север-северо-восточном направлении на 300 км при ширине 100 км и выполнен мощной толщей (более 7 км) кварцитов, сланцев и «конгломератов», составляющих не более 0,2% мощности осадочных слоев. «Конгломераты» вмещают уникальное золотое и урановое оруденение. Верхняя часть разреза сложена мощной толщей эффузивов основного состава.

В раннем протерозое севернее впадины Витватерсранд формировалась внутрикратонная мульда, выполненная лополитом Бушвелд. Одновременно образовывались четко выраженные купольные структуры Вредефорд и Иоганнесбург (2050–1800 млн. лет).

Космоструктурная модель Витватерсранда представлена двумя кольцевыми структурами сложного строения, размещенными в узлах пересечения региональных зон разломов субширотного и север-северо-восточного простирания, последняя из которых рифтогенная и совпадает по направлению с Великой Дайкой Родезии, являясь ее непосредственным продолжением. Северная кольцевая структура отвечает куполу Иоганнесбург, южная — куполу Вредефорд. Размеры структур по длинной оси составляют соответственно 80 и 150 км. Южная структура представлена лишь фрагментом (см. рисунок, б).

Все рудные поля (ранды) расположены в пределах внешних поясов кольцевых структур. Кроме того, размещение рудных полей контролируется рассекающими их локальными (по отношению к кольцевым структурам) зонами разломов. Структурный контроль формирования золоторудных полей Витватерсранда в целом соответствует новым представлениям о полигенно-полихронном осадочно-гидротермальном образовании золоторудного гиганта, возникшего в условиях режима тектоно-магматической активизации в бортовых частях наложенных позднеархейских рифтовых впадин [11].

Месторождение Мурунтау (Узбекистан). Рудный район, расположенный в Центральных Кызылкумах, включает помимо гигантского месторождения золота Мурунтау еще ряд мелких золотых и золото-серебряных месторождений.

Здесь отчетливо выделяются два структурных комплекса — мезозойско-кайнозойский осадочный чехол и верхнепротерозойско-палеозойский складчатый фундамент, к которому и приурочено оруденение. Фундамент образован в результате двухэтапной складчатости — протерозойской и герцинской. В первый этап были деформированы породы раннего протерозоя, во второй дислоцированы позднепротерозойские и ордовикско-силурийские отложения (углеродистые сланцы, вулканы кислого и основного составов), образованные в рифтогенных прогибах.

Рудный район локализован внутри кольцевой струк-

туры сложного строения, размером по длинной (северо-восточной) оси около 150 км (см. рисунок, в). Структура приурочена к узлу пересечения двух зон разломов: субмеридиональной (главной) и северо-восточной и, как и другие кольцевые структуры Центральных Кызылкумов, возникла при подъеме базальтового слоя.

Месторождение Мурунтау находится во внешнем поясе кольцевой структуры в узле пересечения субмеридиональных и субширотных зон разломов, представляющих собой пологие дуги, выпуклые к северу и характеризующиеся, по данным ГСЗ, смещением слоев земной коры вплоть до подошвы базальтового слоя, определяющих границы ступенчатого грабена, или, вероятно, палеозойского рифта [1].

Кроме этих факторов, месторождение контролируется кольцевой структурой простого строения с диаметром 22 км и локальными (по отношению к рудному району) зонами разломов северо-восточного и северо-западного простираний.

Бодайбинский (Ленский) золоторудный район. Выделены два наиболее значительных золотоносных узла — Бодайбинский на юге (в основном россыпи — Ленские прииски, эксплуатирующиеся более 150 лет) и Кропоткинский на севере, в пределах которого находится уникальное золоторудное месторождение Сухой Лог и ряд более мелких. Сухой Лог относится к типичной черносланцевой формации, как и Мурунтау.

Для космоструктурной модели Кропоткинского узла характерны следующие структурные критерии [8].

Кольцевая структура с размером длинной оси 50 км, находящаяся в узле пересечения центральной части рифта (ширина 25 км, длина 140 км), северо-восточного простирания, с зоной трансформных разломов северо-северо-западного простирания; ширина зоны 50 км. Кроме того, отмечается зона разломов субмеридионального простирания. В узле пересечения данной и трансформной зон разломов находится месторождение Сухой Лог.

Гайское медноколчеданное месторождение (Южный Урал). Урал — уникальная колчеданная провинция мира. Наиболее интенсивное оруденение сосредоточено в ее южной части. Тагило-Магнитогорский прогиб содержит главные промышленные месторождения колчеданных руд. В нем широко распространены мощные толщи вулканитов и комагматичные интрузии. Наиболее распространен «уральский» тип оруденения — в островодужных вулканических поясах первичных геосинклиналей. Ведущая рудоносная формация — липарит-базальтовая натриевой серии (спилит-кератофировая), содержащая подавляющее большинство колчеданных месторождений. Ведущая рудная формация медно-цинковая. Возраст оруденения силур — девон [3, 6].

Уникальное Гайское месторождение меди, как и золоторудные гиганты, характеризуется следующим набором структур [5]: 1) субмеридиональная зона Главного Уральского разлома шириной до 60 км, соответствующая рифту; 2) трансформная зона разломов запад-северо-западного простирания шириной 60 и длиной более 1500 км; 3) система рудоконтролирующих локальных северо-восточных разломов; 4) кольцевые структуры, размер в поперечнике которых 15–28 км, входящие в более крупные овалы структуры, размерами до 40×65 км.

Следует отметить, что выявление структурно-тектонических критериев размещения крупнейших месторождений на Урале традиционными методами (без материалов дистанционного зондирования (МДЗ)) весьма сложная задача, т.к. в целом здесь более 100 месторождений и несколько сотен рудопроявлений. Критерии размещения крупнейших рудных объектов могут быть использованы при определении первоочередных объектов геологоразведочных работ.

Медно-никелевые месторождения Печенгского рудно-го района (северо-запад Кольского полуострова). Сульфидные медно-никелевые месторождения Печенгского района расположены в двух рудных узлах — на севере

района Печенгский рудный узел, вмещающий группу богатых промышленных месторождений, и на юге — Аллареченский узел со значительно менее интенсивным оруденением.

Космоструктурная модель Печенгского района характеризуется «стандартным» набором структур. Основной элемент — рифтовая структура северо-восточного простирания длиной около 200 км и шириной в северной части 55 км, а в южной — 85 км. Ранее считалось, что рифтовая структура Печенги является продолжением рифтовой структуры Имандра — Варзуга, имеет общее с ней северо-западное простирание и общее тектоническое развитие на протяжении около 650 млн. лет в период от 2,5 до 1,85 млрд. лет назад. По МДЗ и геологическим данным, общее северо-западное направление этих структур было в ранний период развития рифтогенеза (2,5—2,0 млрд. лет). В поздний этап 2,0—1,85 млрд. лет Печенгский рудный район был охвачен рифтогенезом, проявленным в северо-восточном направлении, при таком направлении рифта его трансформные разломы северо-западного направления — продолжение рифтовой структуры Имандра — Варзуга. Таким образом, Печенгский рудный район оказывается расположенным в области узла пересечения двух систем рифтов, что и определяет его существенное геотектоническое, а отсюда и металлогеническое отличие от рифта Имандра — Варзуга.

В северной части рифт пересечен двумя зонами трансформных разломов — субмеридиональной (130×30 км) и субширотной (90×30 км). В узле пересечения этих трех линейных структур находится неполозамкнутая кольцевая структура, размер длинной оси которой 50 км, ориентированная в северо-западном направлении.

Месторождения Печенгской группы приурочены к внешнему поясу данной кольцевой структуры, причем наиболее крупные из них контролируются также локальной зоной разломов северо-западного простирания шириной не более 10 км, находящейся практически полностью внутри рифта.

Аллареченский рудный узел имеет менее сложную структурную позицию. Он приурочен к узлу пересечения юго-восточного борта рифта с западной границей субмеридиональной зоны трансформных разломов. Само Аллареченское месторождение, кроме того, расположено во внешнем поясе кольцевой структуры, имеющей более простое строение, чем аналогичная структура Печенги. Соответственно положению на краях рифта и зоны трансформных разломов и в условиях менее напряженной структурной обстановки Аллареченский рудный узел обладает и значительно меньшими запасами медно-никелевых руд.

Пыркакайский оловорудный узел (Северная Чукотка). Узел, находящийся в пределах Чукотской геосинклинально-складчатой системы [9], объединяет три месторождения олова, одно из которых относится к категории крупных. Территория узла и его окрестностей сложена песчаниково-сланцевой толщей верхнего триаса. Породы собраны в изоклинальные складки северо-восточного простирания и метаморфизованы под действием нескрытых на дневной поверхности предполагаемых гранитоидных интрузий [9]. Руды представлены двумя основными типами: касситерит-сульфидным и касситерит-кварцевым. Продукты разрушения коренных месторождений состоят из промышленно разрабатываемых россыпей касситерита.

Оловорудный узел контролируется следующими структурами: 1) рифтогенное сводово-глыбовое сооружение [2] субмеридионального простирания, прослеженное на 150 км при ширине до 40 км; 2) две зоны трансформных разломов северо-западного и северо-восточного простираний; длина каждой превышает 200 км, ширина первой достигает 30 км, второй — не более 10 км; 3) кольцевая структура простого строения около 30 км в диаметре, находящаяся в узле пересече-

ния трех линейных структур; рудный узел примыкает к свостека.

Пыркакайский рудный узел не относится к гигантским объектам. Этот пример приведен нами, чтобы показать возможность оценки класса рудного объекта по данным МДЗ. Пыркакайский узел отличается от гигантских объектов следующим: он находится за пределами кольцевой структуры, а не во внешнем ее поясе, да и размер ее не превышает 30 км. Кроме того, отсутствует и локальная зона рудоконтролирующих разломов.

Можно отметить, что для крупнейших рудных объектов в ранге рудного района или узла (региональный уровень генерализации) независимо от вида полезного ископаемого (металла) существуют общие структурные критерии контроля («стандартный» набор), выявляемые на основе МДЗ.

Внешние пояса кольцевых структур сложного строения, имеющие в поперечнике 50—150 км.

Транзитные, по отношению к кольцевым структурам, пересекающиеся зоны разломов, из которых главная обычно соответствует рифтогенной структуре, а второстепенные (одна или две) являются трансформными. В узлах пересечения этих двух—трех зон и находятся сложные кольцевые структуры, причем очередность образования этих объектов соответствует порядку приведенного описания.

Зона или система локальных, по отношению к сложной кольцевой структуре или рифту разломов, не имеющих аналогов за границами рассматриваемых объектов в ближнем их окружении.

Обычно рудный контроль осуществляется и малыми кольцевыми структурами простого строения, поперечник которых составляет первые десятки километров; оруденение и в данном случае приурочено к их периферии.

Изложенное не означает, что построение космоструктурной модели какого-либо объекта представляет собой простой процесс. Во-первых, чтобы извлечь из МДЗ структурную информацию, необходимы разнообразные сведения, полученные в разных зонах спектра, разных масштабах (или с разным разрешением на местности), в разные сезоны и время суток.

В процессе их дешифрирования и интерпретации результатов требуется специализированная компьютерная обработка.

Для выделения из общей массы кольцевых структур и линейментов именно тех, которые контролируют крупнейшие рудные объекты, необходимо привлечь данные ряда геологических и геофизических методов, а также определенный опыт в проведении такого рода исследований.

В заключение отметим, что единообразие регионального структурного контроля крупнейших рудных объектов разной специализации предполагает единую причину рудообразования. В качестве наиболее подходящей можно предположить гипотезу горячих точек, порождаемых плюмтектоникой.

При этом надо понимать, что области горячих точек в пределах континентальной коры, в которой размещены рудные гиганты, закономерно связаны со структурными неоднородностями земной коры и верхней мантии. Эти неоднородности отражают проекции глубинных плюмов и представлены крупными кольцевыми структурами, приуроченными к областям пересечения глубокопроникающих рифтогенных структур и трансформных разломов. Зоны локальных разломов и кольцевых структур, размещенных преимущественно в краевых частях крупных кольцевых структур, контролируют проявление наиболее интенсивного рудного процесса, поскольку формирование рудных гигантов связано с длительно развивающимися полигенными рудогенерирующими системами. Соответственно, таким объектам отвечают сложнопостроенные геоструктуры, выявляемые дистанционным зондированием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гальперов Г.В., Богатырев В.Э., Перцов А.В. Использование космических снимков и геофизических данных при прогнозно-металлогенических исследованиях в Центральных Кызыл-кумах // Исследования Земли из космоса. 1986. № 4. С. 68—74.
2. Геологическое строение СССР и закономерности размещения полезных ископаемых. Т. 8. Восток СССР. — Л.: Недра, 1984.
3. Кривцов А.И. Прикладная металлогения. — М.: Недра, 1989.
4. Металлогенические и тектоно-магматические исследования на основе материалов аэро- и космических съемок. — Л.: Недра, 1988.
5. Перцов А.В., Гальперов Г.В., Смирнова Т.Н., Антипов В.С. Прогнозно-поисковые модели крупнейших рудных объектов на основе материалов дистанционного зондирования // Исследования Земли из космоса. 1994. № 6. С. 96—107.
6. Прокин В.А., Буслаев Ф.П., Исмагилов М.И. Медноколчеданные месторождения Урала. Геологическое строение. — Свердловск: УрО АН СССР, 1983.
7. Рундквист Д.В. Международный проект «Промышленные суперконцентрации металлов в литосфере» // Тез. докл. первого международного симпозиума «Крупные и уникальные месторождения редких и благородных металлов (проблемы генезиса и освоения)». С.-Пб., 1996. С. 11—12.
8. Рундквист И.К. Анализ фотопортретов рудных районов // Фотопортреты структурных ансамблей и их анализ для моделирования крупных месторождений. М., 1995. С. 55—100.
9. Чайковский В.К. Геология оловоносных месторождений северо-востока СССР. — М.: Госгеолтехиздат, 1960.
10. Шер С.Д. Металлогения золота. — М.: Недра, 1974.
11. Щеглов А.Д. О металлогении Южно-Африканской республики, генезисе золоторудных месторождений Витватерсранда и проблеме открытия их аналогов в России. — С.-Пб.: ВСЕГЕИ, 1994.
12. Franklin J.M., Thorpe R.I. Comparative Metallogeny of the Superior, Slave and Churchill Provinces // Geol. Assoc. of Canada, Special Paper 25. 1982. P. 3—90.

УДК 528.87:553.078

© А.А. Рукояткин, 1999

Глубинное линейamentное зондирование при металлогенических исследованиях

А.А. РУКОЯТКИН

При выявлении неоднородностей линейamentного поля для геологических целей традиционно измеряются такие его параметры, как плотность, ориентировка (азимутальное распределение), анизотропия и т.п. Эти и другие характеристики линейamentного поля относятся к линейаментам какой-либо длины, а точнее — диапазону длин, зависимого в первую очередь от масштаба используемых материалов дистанционных съемок (МДС) и топографических карт.

Во ВНИИКАМ разработан метод глубинного линейamentного зондирования, основанный на статистическом соответствии длин линейamentов глубинам заложения (проникновения) индицируемых ими разрывных нарушений [8]. Метод показал достаточно высокую эффективность при изучении территорий, различающихся геологическим строением, при решении структурных вопросов широкого круга геологических задач [1, 2, 7—10].

Распределение линейamentов по интервалам длин в сравнении с другими традиционными характеристиками линейamentных полей наиболее тесно связано с горизонтальной расслоенностью литосферных блоков, глубинной раздробленностью их разрывными нарушениями, структурными особенностями залегания и вещественным составом слагающих их комплексов, т.е. с теми элементами геологического строения, которые потенциально являются рудоконтролирующими при благоприятном их сочетании.

Горизонтальная делимость литосферы проявляется как в скачках скоростей сейсмических волн, что лежит в основе геофизического метода глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), так и в скачках плотности линейamentов в разных интервалах длин, что определяет не только суть, но и название метода — ГЛЗ [10].

При ГЛЗ анализ длин линейamentов носит статистический характер и осуществляется с привлечением компьютерной техники. Основная задача — выделение из поля линейamentов таких подмножеств, которые несут информацию о геологическом строении. Полезная информация извлекается в основном путем построения и анализа гистограмм и кумулятивных графиков длин линейamentов и глубинных линейamentных профилей. Метод ГЛЗ позволяет определить плотность, ориентировку, анизотропию и т.д. как для всего диапазона длин линейamentного поля, выявленного на МДС и топографических картах конкретного масштаба, так и для выборочных интервалов длин и их сочетаний.

Схема линейamentов для статистической обработки длин линейamentов по своему содержанию отличается от типовых геологических схем разрывных нарушений, на

которых прямолинейные линейamentы отражают субвертикальные разрывные нарушения, а наклонные разрывы (при пересечении с расчлененной дневной поверхностью) образуют извилистые линии. На схеме линейamentов для статистической обработки при ГЛЗ фиксируются только прямолинейные или слабо изогнутые линейamentы, извилистые или дугообразные не принимаются во внимание. Кольцевые структуры — важные самостоятельные элементы схем и нередко выявляются при их обработке. Линейamentы, выявленные на МДС и топографических картах, чаще всего являются следами не столько разрывных нарушений или литологических неоднородностей, сколько субвертикальных зон повышенной трещиноватости или проницаемости, обычно не фиксируемых прямыми геологическими наблюдениями [2].

Отправной момент при составлении схем — точная фиксация длин линейamentов и их топографическая привязка. Поэтому составление схем следует начинать с выделения линейamentов на топокартах, затем наносить на схему линейamentы с МДС. Масштабы снимков и топокарт должны быть близкими. Обычно длина элементарного (минимального) линейамента равна 1 см в масштабе снимка или топокарты, при хорошей же выраженности линейamentов — 0,5 см.

Визуальная оценка схемы линейamentов — первоочередная операция после ее составления. Она предусматривает выбор местоположения и направления глубинных профилей и особенно выявление кольцевых структур, подчеркиваемых плановым расположением линейamentов.

При построении глубинных профилей на вертикальном разрезе изображаются проекции линейamentов на глубинах, соответствующих длинам линейamentов. В разрезе по различиям в плотностях линейamentов фиксируются субгоризонтальные границы раздела, что дает, помимо представления о расслоенности земной коры, и дополнительную информацию, например, опredеление глубин заложения кольцевых структур, блоков, а также выявление характера разрывных нарушений в этих структурах.

Кроме перечисленного выявлено весьма ценное для прогноза, поисков и оценки крупных концентраций оруденения поведение поверхностных разделов слоев земной коры с контрастными различиями плотностей линейamentов. Эти поверхности, названные нами индикаторными (по отношению к рудным объектам), под крупными рудными объектами имеют тенденцию к поднятию на 1—2 км, редко более, что впервые было выявлено для Бамского золоторудного месторождения

в Становой складчатой системе и нашло подтверждение для Печенгского и Аллареченского медно-никелевых и других месторождений Кольского полуострова. Совместный анализ профилей, гистограмм и графиков длин линеаментов повышает надежность выделения границ раздела земной коры, фиксирования выступов основных индикационных поверхностей и выводов о рудоконтролирующей роли этих и других структурных элементов.

Места заложения профилей и их ширина выбираются в соответствии с местоположением и размерами изучаемого объекта, с обязательным выходом на фон в каждую сторону от объекта (рудный узел, кольцевая структура, интрузивные тела основных и ультраосновных пород, аномалии гравитационного и магнитного полей и т.д.).

Линеаментный анализ глубинной структуры Бамского золоторудного узла. Во ВНИИКАМ были выполнены методические исследования по составлению прогнозно-металлогенических карт в областях развития докембрийских образований. В качестве примера составлена компьютерная карта прогнозных участков Бамского золоторудного узла. В комплексе работ на локальном уровне генерализации (масштаб 1:200 000) анализировалось линеаментное поле Бамского золоторудного узла [7].

На схеме линеаментов при ее визуальной оценке выявлена крупная сложнокольцевая структура 50×65 км (названная Бамской), состоящая из трех овальных колец (точнее двух колец и внутреннего круга). В подобных структурах кольца, как правило, ограничивают в плане линеаменты разной длины. В целом, этой кольцевой структуре присущее радиальное (внутри колец) и перпендикулярное ему (по окружности колец) простираение линеаментов (рис.1).

Линеаментный профиль был задан по азимуту 130° (рис. 2) с тем расчетом, чтобы он пересек сложную кольцевую структуру и Бамский рудный узел. Ширина

полосы профиля равна диаметру центрального кольца (круга), т.е. около 15 км.

Анализ профиля позволяет сделать ряд заключений. Разные кольца кольцевой структуры контролируют простираение линеаментов разной длины, что позволяет оценить и глубину заложения собственно кольцевых разломов. Глубины заложения внутреннего кольца 5–6 км, среднего и внешнего 7–8 км. Линеаменты на профиле упираются в кольцевые разломы (по вертикали), но редко пересекают их.

В верхней части разреза по плотности линеаментов фиксируются две субгоризонтальные границы раздела. Ближняя к дневной поверхности залегает на глубине 2–2,5 км за пределами колец, а в контуре центрального кольца (круга) погружается до 4 км и более. Следующая граница раздела фиксируется линеаментами в северо-западной части профиля на глубине около 3 км, затем погружается в сторону центрального круга до 5 км, где ее корреляция затруднительна. За пределами сложной кольцевой структуры (к юго-востоку по линии профиля) эта поверхность находится на уровне около 4 км.

На глубине 7–8 км по резкому, скачкообразному изменению плотности линеаментов фиксируется субгоризонтальная граница раздела земной коры. Ниже этого уровня заметно уменьшается количество линеаментов. Выше этой поверхности плотность линеаментов ощутимо возрастает и изменяется по простираению. Эта поверхность ограничивает глубину заложения среднего и внешнего кольцевых разломов (7–8 км).

Глубже 8 км по редким линеаментам намечаются еще два уровня. Один из них с глубины 12 км в северо-западной части профиля поднимается до 9 км в районе центра сложной кольцевой структуры и находится на этом уровне далее по профилю до внешнего кольца, где круто погружается вновь до 11–12 км. Эту границу раздела мы отождествляем с первой поверхностью Конрада.

Еще одна граница профиля фиксируется предположительно по весьма редким линеаментам. В северо-западной части профиля она расположена на глубине 14–15 км, в центральном кольце воздымается до 12 км. Далее в юго-восточном направлении по профилю ее положение менее определено. Границу раздела в основании разреза мы условно отождествляем со второй поверхностью Конрада.

На профиле выделяется еще один структурный элемент — наклонная зона повышенной концентрации линеаментов. Она прослеживается от выступа нижней индикационной поверхности на глубине около 12 км, совпадающего на профиле с положением центра кольцевой структуры (40–50 км профиля), до кольцевого разлома (64 км профиля), сужаясь по ширине от 10 км внизу до 1 км близ дневной поверхности, на которую выходит в месте расположения Бамского золоторудного месторождения (см. рис. 2). Все линеаменты, входящие в эту наклонную зону, находятся между центральным и средним кольцевыми разломами, к юго-востоку от центрального круга. При этом лишь отдельные линеаменты заходят в центральный круг, а контур их распространения имеет подковообразную форму.

Изложенные факты позволяют отметить следующее. Исключив из рассмотрения линеаменты этой наклонной зоны, можно считать, что центральному кругу сложной кольцевой структуры на глубине 5–8 км соответствует (с некоторым смещением к юго-востоку) выступ ос-

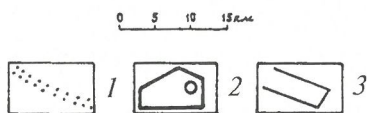


Рис. 1. Схема линеаментов района Бамского Au-рудного узла, составленная по космическим снимкам м-ба 1:200 000:

1 — контур кольцевой структуры, выявленной по схеме линеаментов; 2 — Бамский Au-рудный узел и одноименное месторождение; 3 — полоса линеаментов, по которой построен профиль

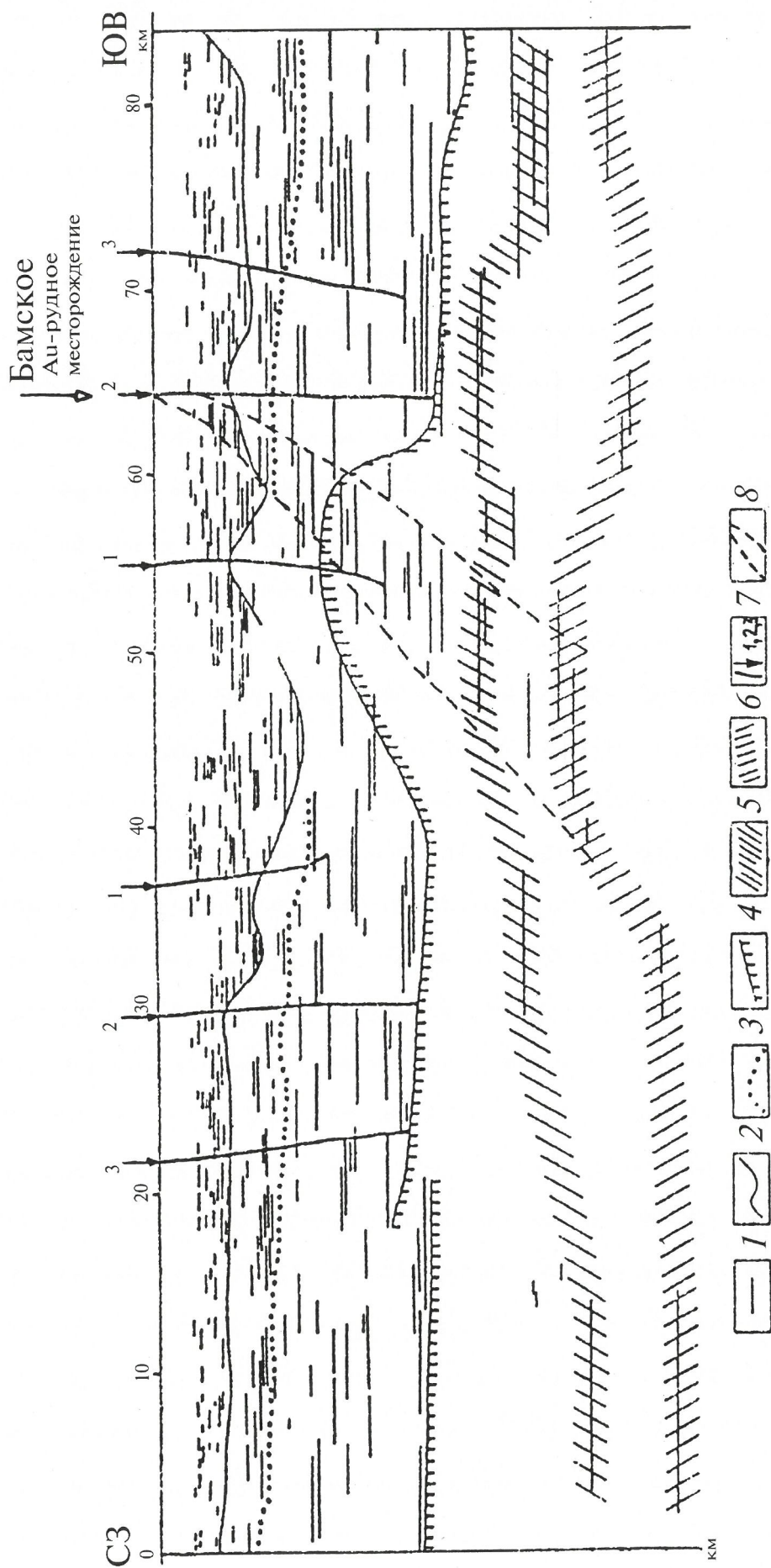


Рис. 2. Линементный профиль через Бамскую кольцевую структуру:

1 — проекция линементов; 2-6 — границы раздела земной коры; 4 — основная индикационная граница; 7 — разломы кольцевой структуры (1 — внутренний, 2 — средний, 3 — внешний); 8 — зона повышенной плотности линементов

новой индикационной поверхности. Амплитуда выступа поверхности составляет 3 км по отношению к соседним участкам, где она фиксируется на глубине 8 км. Центральному кругу кольцевой структуры соответствуют также выступы двух нижележащих поверхностей, отождествляемых с границами Конрада. Собственно от них и берет начало наклонная зона повышенной концентрации линеаментов (см. рис. 2).

Схема плотности линеаментов по числу (или по длине) дает информацию о раздробленности верхних слоев и расположении предполагаемых зон разломов. Так, для района работ методом скользящего окна определено число линеаментов на 50 элементарных участках. Число их, соотношенное к центру такого участка, колеблется от 52 до 191. Зоны с относительно повышенным числом линеаментов (140—190) имеют северо-западное, северо-восточное и субширотное простирания. Зоны с относительно небольшим их числом (86—130) вытянуты в субмеридиональном направлении. Примечательно, что три выявленных таким путем зоны с повышенной плотностью линеаментов сочленяются в районе подковообразного контура линеаментов, индицирующей ослабленную зону (см. рис. 2).

Геологические результаты глубинного линеаментного зондирования Бамского золоторудного района следующие.

1. Выявлена крупная сложная трехкольцевая структура. Определены глубины залегания кольцевых разломов (5—8 км).

2. По плотности проекций линеаментов на плоскости профилей выделены пять границ раздела земной коры. Отчетливо фиксируются три верхних границы. Самый резкий скачок плотностей имеет место на основной индикационной поверхности, где он близок к обрыву информации на данном уровне и ниже. Можно полагать, что эта поверхность разделяет верхнюю, наиболее дифференцированную по плотности часть коры,

от нижележащей, более плотной и однородной по составу. Глубина залегания границы 5—8 км. Именно такие характеристики на основе расчета гравиметрических данных дают Э.Н.Лишневецкий и другие [4] для выделенных ими верхнего и нижнего горизонтов гранитного слоя в пределах Становой складчатой системы. Граница раздела этих горизонтов, по их расчетам, залегает на глубине 3—7 км. Близость данных, полученных разными методами, указывает на реальное существование основной индикационной поверхности и ее выступа в районе центрального круга кольцевой структуры.

Две поверхности Конрада выделяются по единичным линеаментам, их поднятия тяготеют к центральному кругу кольцевой структуры. Наличие двух разделов Конрада лежит в основе трехслойной сейсмологической модели «консолидированной земной коры», по Н.И.Павленковой [6].

3. Выявлен важный структурный элемент — наклонная зона повышенной концентрации линеаментов (или ослабленная зона), идущая от выступа основной индикационной поверхности раздела в земной коре к дневной поверхности и выраженная в поле линеаментов в виде подковообразного контура между центральным и средним кольцевыми разломами сложной кольцевой структуры. Определены азимут (северо-запад 310—320°) и угол падения (30—45°) ослабленной зоны.

В месте выхода зоны на дневную поверхность расположено Бамское золоторудное месторождение. Можно предполагать, что ослабленная разрывами зона могла служить проводником гидротермальных растворов, обусловивших формирование месторождения и генетически связанных с кислым интрузивом, очаг которого находится на глубине выступа основной индикационной поверхности или на уровне выступа нижней поверхности Конрада (см. рис. 2), т.е. на глубине 12—15 км, что соответствует положению верхней части катазоны — самой глубокой зоны формирования гранитных plutonov, по А.Баддингтону [3].

4. Оптимизация количества поисковых критериев по данным линеаментного анализа возможна путем составления на компьютере схемы плотности линеаментов длиной 4—12 км (рис. 3). На участках выступа основной индикационной поверхности 4—8 км плотность линеаментов соответствующей длины относительно мала, она стремится к нулевой, образуя «окна» на схеме плотности. Участки с повышенной плотностью линеаментов, расположенные близко к контуру «окон», можно интерпретировать как выходы на дневную поверхность наклонных трещинных зон, идущих от таких выступов.

Выявлено 16 участков, где сочетаются нулевые и близлежащие повышенные плотности линеаментов (см. рис. 3). Один из них объединяет юго-кольцевую часть центрального круга кольцевой структуры (нулевые значения) и северо-восточную часть контура Бамского золоторудного узла (150 условных единиц). Этот участок индицирует наклонную зону повышенной плотности линеаментов, зафиксированную на профиле (см. рис. 2). В других случаях разность плотностей составляет 75—175 единиц. Поисковая значимость вновь выявленных 15

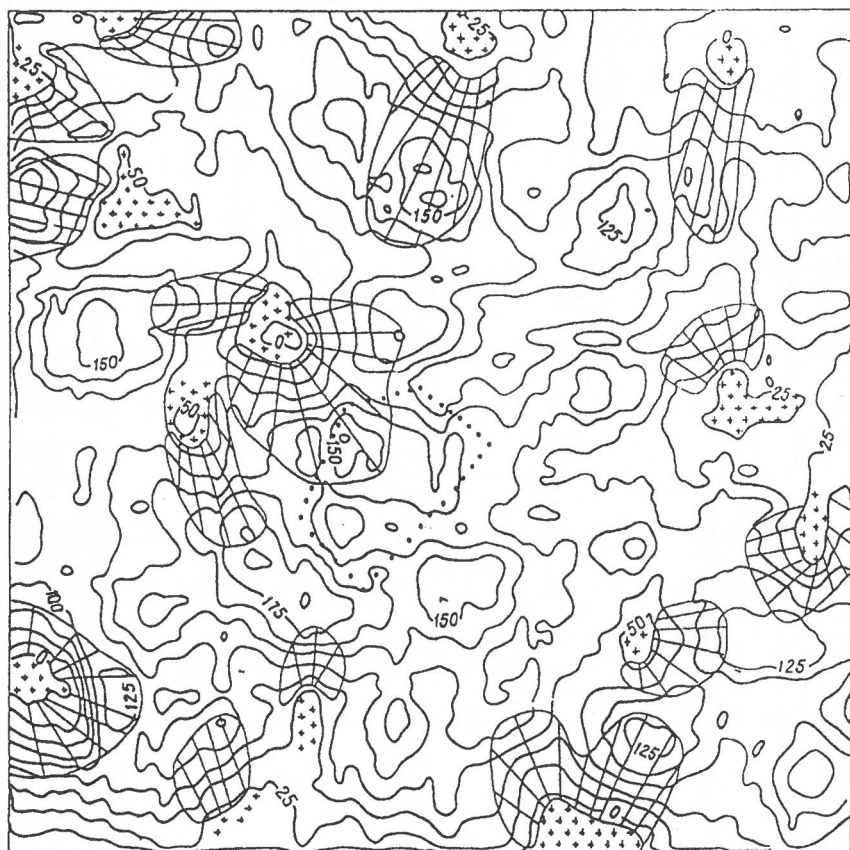


Рис. 3. Схема плотностей линеаментов интервала длин 4—12 км:

1 — участки предполагаемых поднятий основной индикационной поверхности, или интрузивные тела; 2 — зоны разрывных нарушений (преимущественно наклонные); 3 — золоторудный Бамский узел; изолинии проведены через 25 условных единиц

участков, перспективных для разведки золотоносных рудопроявлений, различна и в настоящей статье не обсуждается.

Структурными факторами контроля Бамского золоторудного узла по данным линеаментного анализа являются следующие:

- кольцевые разломы с глубиной заложения 5—8 км;
- узлы пересечения зон повышенной плотности линеаментов;

- выступ (подъем) основной индикационной поверхности (одной из пяти границ раздела, зафиксированных в верхней части земной коры);

- наклонная (30—45°) ослабленная зона трещиноватости, идущая с глубины 12—15 км к юго-восточному склону выступа основной индикационной поверхности, от которого подходит к дневной поверхности в месте Бамского золоторудного месторождения (проводник гидротермальных растворов).

Линеаментный анализ глубинной структуры Печенгского и Аллареченского медно-никелевых рудных узлов. Геолого-геофизические предпосылки информативности линеаментного поля о расслоенности земной коры на Кольском полуострове до проведения анализа не представлялись однозначными. Так, первая наиболее отчетливая пологая граница раздела земной коры, фиксируемая сейсморазведкой (ГСЗ) в районе Печенгской структуры на глубине 7—8 км и отождествляемая с опорной сейсмической поверхностью Конрада (кровлей "базальтового слоя"), не подтвердилась данными бурения Кольской сверхглубокой скважины СГ-3. Бурение показало, что субгоризонтальные отражающие площадки и зоны их сгущения, выделяемые методами сейсморазведки в районе скважины, не контролируются вещественными характеристиками коры, такими как валовой или минеральный состав горных пород, степень их метаморфизма, текстурно-структурные особенности и т.д. Обследование скважины показало, что они согласуются с особенностями современного напряженного состояния горных пород, поэтому их следует увязывать не с границами разных пород, а с реально существующими поверхностями в массиве однородных толщ [5].

В северо-западной части Кольского полуострова по схемам линеаментов, выявленных на космических снимках масштабов 1:200 000 и 1:500 000, построены три профиля. Все они параллельны, простираются от берега Баренцева моря в меридиональном направлении на 110 км.

Западный профиль 1 (рис. 4) пересекает Печенгский рудный узел и Восток-Аллареченское рудное поле с медно-никелевыми месторождениями. На профиль до глубины 10 км спроецированы линеаменты со схемы линеаментов масштаба 1:200 000, а для больших глубин — 1:500 000. Ширина полосы линеаментов, вынесенных на профиль, составляет 30 км, что соответствует размеру Печенгской структуры. На профиль спроецировано и местоположение Кольской сверхглубокой скважины СГ-3 (см. рис. 4).

Профили 2 и 3 не пересекают известные рудные объекты. Профиль 2 расположен восточнее профиля 1, построен по схеме линеаментов масштаба 1:200 000. Ширина полосы линеаментов 15 км. Профиль 3 построен по схеме линеаментов масштаба 1:500 000 в полосовой выборке шириной 30 км.

На профиле 1 верхняя из трех индикационных границ раздела земной коры четко фиксируется по резкому скачку плотности линеаментов, почти до полного их отсутствия на глубинах 6,5—9,5 км. Колебания глубины ее залегания составляют 3 км. Положение этой границы на участке подъема в районе Печенгской структуры в разрезе Кольской сверхглубокой скважины по глубине совпадает с контактом протерозойских пород Печенгской серии с архейскими, представленными гнейсо-амфиболит-мигматитами.

Примечательно, что как для Печенгского, так и для Аллареченского рудных таксонов свойственно воздымание верхней индикационной границы раздела с оди-

наковой амплитудой 2,5 км (9,5—7 км). Эти выступы можно рассматривать как рудоконтролирующие глубинные структурные формы. Верхнюю же границу можно считать основной индикационной (в отношении рудоносности) границей раздела земной коры. Усредненная амплитуда подъема этой границы в районе 35—68 км профиля над прогибом ее между 68—78 км оценивалась путем сопоставления кумулятивных графиков длин линеаментов для этих участков; она составляет по крайней мере 1 км (7,5—6,5 км). Этому выступу границы раздела в целом соответствует положительная аномалия гравитационного поля. Выступ и аномалия шире Печенгской структуры.

На профиле 2 на широте Печенгского и Аллареченского рудных узлов (45—90 км профиля) верхняя граница раздела земной коры залегает субгоризонтально, без резких перепадов, на глубине 7—8 км. Резкий подъем (скачок) этой границы раздела в районе 38—40 км профиля 2 с пологим погружением на север позволяет рассматривать данный участок профиля как перспективный для поиска оруденения.

На профиле 3 на широте Печенгской структуры имеет место прогиб верхней границы раздела. При этом к северу и югу от прогиба фиксируются выступы этой поверхности. Северный подъем границы раздела от 7,5 до 5,5 км выявлен на 28—36 км профиля. Эта поверхность затем полого, как на профиле 1, погружается на север. Свод южного выступа верхней границы раздела находится на 80—100 км профиля 3. Амплитуда выступа около 3 км (8—5 км). Ниже поверхности раздела здесь фиксируются также наклонные зоны повышенной плотности линеаментов с глубины 15 до 5 км.

Вторая индикационная граница раздела на профилях 1, 2 и 3 залегает субгоризонтально, соответственно на глубинах 11—12, 13—15 и 15—17 км, т.е. полого погружается с запада на восток. На профиле 1 ниже второй границы раздела линеаменты совсем отсутствуют в интервале от 11 до 15 км. Субгоризонтальное положение и четкая выраженность в скачке плотности линеаментов указывают на то, что именно эту поверхность можно отождествлять с поверхностью Конрада, в нескольких десятках метров от которой остановился забой Кольской сверхглубокой скважины (см. рис. 4).

Третья индикационная граница раздела земной коры на профиле 1 зафиксирована в основном на глубине 16—17 км. В районе Печенгской структуры наблюдается ее прогиб до 21 км. Рудоконтролирующая роль этого прогиба при субгоризонтальном положении второй границы раздела неясна.

Итак, анализ профилей на Кольском полуострове позволил выявить данные о расслоенности земной коры, интенсивности ее раздробленности на глубинах от 2 до 20 км, определить рудоконтролирующие структурные элементы и выявить ряд участков, перспективных для поиска оруденений.

На Кольском полуострове, по данным ГЛЗ, основными рудоконтролирующими структурными формами являются выступы основной индикационной поверхности раздела земной коры с амплитудой от 1,5 до 3 км и наклонные зоны повышенной плотности проекций линеаментов на профилях, которые можно рассматривать как подводящие каналы рудных флюидов. Индикационная поверхность четко фиксируется на линеаментных профилях по резкому перепаду (скачку) плотностей проекций линеаментов (до полного их исчезновения) независимо от колебаний глубины ее залегания — от 9,5 до 5 км.

Как видно, амплитуды выступов основной индикационной границы раздела как на Бамском золоторудном узле, так и на Печенгском и Аллареченском медно-никелевых объектах близки между собой, их глубинное положение различается незначительно. Глубины залегания наклонных зон повышенной плотности линеаментов на Бамском золоторудном узле и южной части профиля 3 на Кольском полуострове также близки. Поэтому сделан вывод, что подобные выступы границ раздела неглубокого заложения и ослабленные зоны

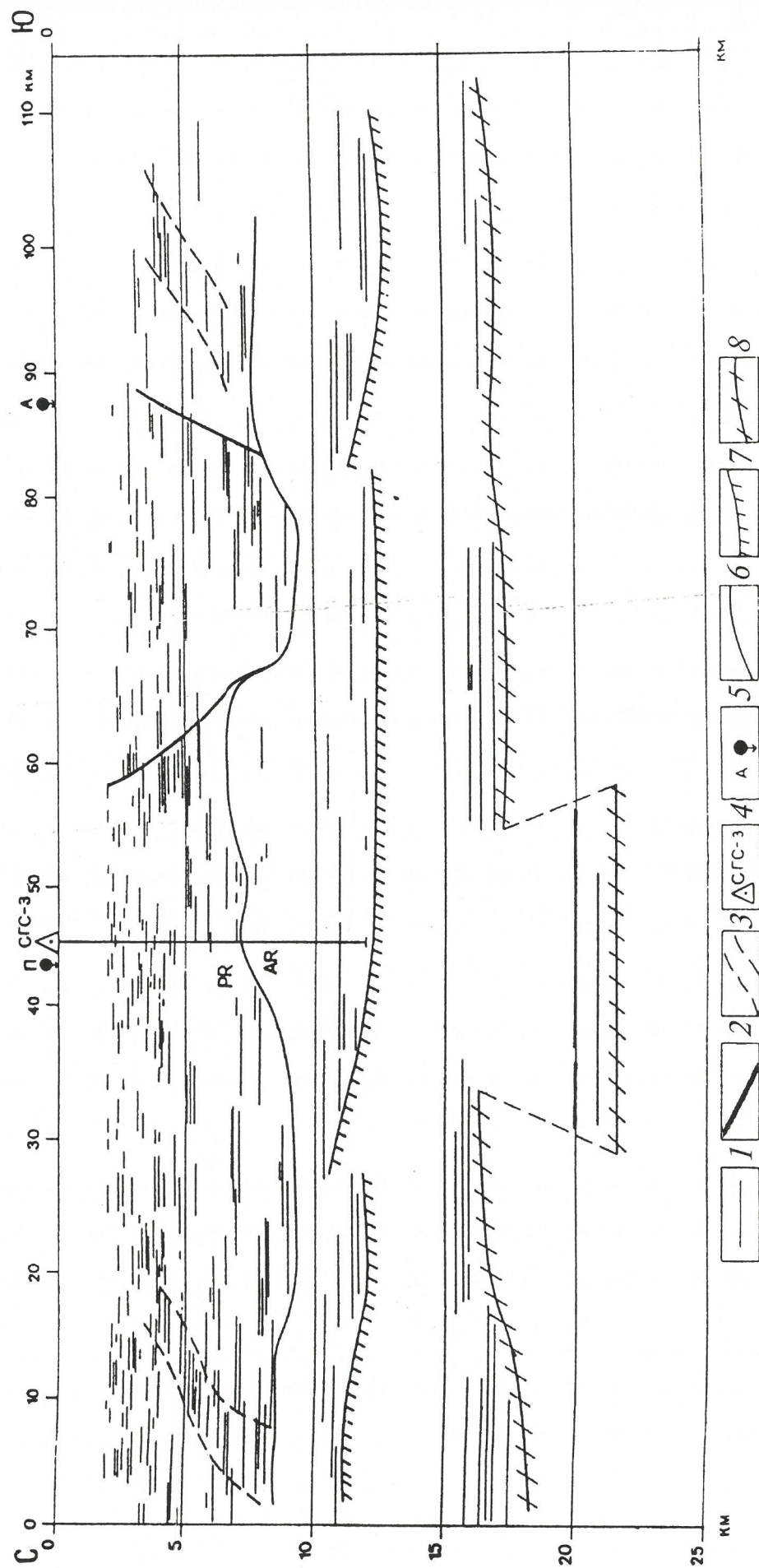


Рис. 4. Линементный профиль через Печенгскую структуру:

1 — проекции линементов; 2 — разломы; 3 — зоны повышенной плотности линементов; 4 — Кольская сверхглубокая скважина; 5 — местоположение медно-никелевых месторождений (П — Печенгской группы, А — Аллареченского); 6—8 — границы раздела земной коры (6 — основная индикционная граница)

земной коры более глубокого проникновения, фиксируемые по повышенной плотности проекций линейментов в вертикальном разрезе, проявляют себя как рудоконтролирующие структуры и могут служить поисковыми признаками рудных объектов. С учетом их в рассмотренных рудных районах методом ГЛЗ за пределами рудных узлов выявлены участки, перспективные для поиска оруденений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астахов В.И., Бахарева С.А., Рукояткин А.А. и др. Исследование тектонической информативности космических снимков Западной Сибири с использованием фотопреобразований // Методы обработки аэро- и космической информации при геологических поисковых работах. Л., 1987. С.56—72.
2. Астахов В.И., Рукояткин А.А. Опыт глубинного космофотогеологического зондирования на Русском Севере // Геологическое изучение и использование недр: научно-технический информационный сборник. М., 1997. Вып. 6. С. 8—13.
3. Баддингтон А. Формирование гранитных тел. — М.: ИЛ, 1963.
4. Лишевский Э.Н., Елисеева И.С., Богомолова Г.А. Строение земной коры районов Верхнего Приамурья и Алданского щита по геофизическим данным // Сов.геология. 1968. № 7. С. 75—85.
5. Минц М.В., Колпаков Н.И. Ланев В.С. и др. О природе субгоризонтальных сейсмических границ в верхней части земной коры (по данным Кольской сверхглубокой скважины) // Геотектоника. 1987. № 5. С. 62—72.
6. Павленкова Н.И. Структура и динамика земной коры и верхней мантии континентов // Проблемы движений и структурообразования в коре и верхней мантии. М., 1985. С. 58—72.
7. Перцов А.В., Гальперов Г.В., Вострокнутов Е.П. и др. Составление прогнозно-металлогенических карт на основе компьютерного комплексного анализа цифровых космических и геолого-геофизических данных // Геологическое изучение и использование недр: Научно-технический информационный сборник. М., 1965. Вып. 3. С. 50—61.
8. Рукояткин А.А. Линейменты-индикаторы строения земной коры // Методическое руководство по изучению планетарной трещиноватости и линейментов. Л., 1977. С. 60—68.
9. Рукояткин А.А. Прогнозирование глубинной расслоенности литосферы по линейментам в районе заложения Уральской сверхглубокой скважины // Аэрокосмические съемки при изучении глубинного строения регионов СССР. Л., 1990. С. 54—68.
10. Рукояткин А.А. Глубинная информативность линейментного поля // Современные проблемы новейшей тектоники и геоморфологии (к 100-летию со дня рождения проф. С.С.Шульца). С.-Пб., 1997. С. 76—77.

УДК [528.8 + 519.7] :55

© Е.П. Вострокнутов, 1999

«Генезис» — экспертная система для прогнозно-геологических исследований

Е.П. ВОСТРОКНУТОВ

Экспертные системы при решении прогнозных задач. Сегодня вопросы повышения эффективности геолого-геофизических работ и снижения их стоимости стоят особенно остро. Стало очевидным, что поток геологической информации, собираемой на четырех уровнях космос — воздух — земля — скважина, не может быть эффективно переработан традиционными способами. Выход здесь виден в использовании эффективных методов, позволяющих осуществлять только действительно необходимые прогнозно-поисковые работы [10, 11]. Другой источник повышения эффективности — снижение затрат на обработку данных путем внедрения компьютерных прогнозирующих систем. Исследования в этом направлении ведутся с 70-х годов, а на настоящем времени создан ряд производственных прогнозирующих систем [8], которые базируются не на традиционных методах решения прогнозных задач, имеющих, как правило, качественный характер, а на количественных моделях, применяемых в математической статистике и теории распознавания образов [18].

Применение количественных методов компьютерного прогноза имеет несомненные преимущества, однако этим методам свойственны и принципиальные недостатки. Являясь по своему существу формальными, они не могут учесть содержательные представления геолога. Кроме того, имеются ограничения привлекаемых математических моделей, например, по типам распределений, классам объектов в пространстве признаков и т.д.

С начала 80-х годов в различных областях науки и техники отмечено активное внедрение методов искусственного интеллекта (ИИ), представляющих собой математическую основу для реализации на ЭВМ задач, для решения которых требуется обработка «знаний», а не просто «информации» [9]. Такой подход был развит в так называемых экспертных системах (ЭС), которые успешно внедрены в те области, где раньше компьютеры либо не применялись, либо их использование было связано с существенными трудностями: постановка медицинского диагноза, управление сложными техническими системами, обработка естественного языка [16]. Главное различие между традиционными программами и ЭС заключается в их структуре. В экспертных системах не используется фиксированная логика, а включается база знаний, которая содержит все правила, необходимые для выполнения задач геопрогноза. Качество

ЭС зависит от качества правил базы знаний и эффективности работы модуля вывода.

Общая цель применения ЭС в геолого-прогнозных исследованиях состоит в том, чтобы представить в виде компьютерных программ неоднозначные, нечеткие, неструктурированные знания, которыми оперирует опытный геолог, решая прогнозны задачи [2, 3]. Методы ИИ формировались как методы решения интеллектуальных проблем, основанных на знаниях, они моделируют процесс решения задач человеком.

Экспертная прогнозирующая система «Генезис» была разработана для решения проблемы геопрогноза [6]. Она позволяет пользователю создавать свою базу знаний по различным типам полезных ископаемых (медно-порфировым, свинцово-цинковым, колчеданно-полиметаллическим и т.д.), при этом общая структура системы остается без изменения. Качество и точность работы ЭС «Генезис» зависят в итоге от качества и точности знаний, представленных экспертами. Система ведет работу с пользователем в интерактивном режиме и вполне доступна неподготовленному пользователю. В 1985—1992 гг. система «Генезис» была реализована с использованием различных технических и программных средств. На ее основе экспертами ЦНИГРИ, ИГГ СО АН СССР, КазИМС и других организаций разработаны экспертные модели, предназначенные для геологического прогнозирования [1, 5, 7, 15, 17, 19]:

прогноз и поиски медно-порфировых месторождений;

прогноз и поиски месторождений алмазов кимберлитового типа;

прогноз и поиски золотого и золото-серебряного оруденения в углеродисто-терригенных формациях западного Узбекистана;

прогноз и поиски медно-колчеданных месторождений уральского типа в вулканогенных формациях;

прогнозирование стратиформного полиметаллического оруденения на Енисейском кряже;

прогноз и поиски колчеданно-полиметаллического оруденения в вулканогенных формациях;

детальный прогноз и оценка месторождений золота Акбакайского типа.

В настоящее время во ВНИИКАМ ЭС «Генезис» переработана для использования информации, типич-

ной для МДЗ и ГИС-приложений. Стало возможным, представив набор признаков в виде пространственно привязанных «слоев» и построив соответствующую базу знаний, получить экспертное заключение также в виде пространственно привязанного слоя. Построены прогнозные модели [14] золотого оруденения для Бамского золоторудного района (Становая складчатая система) и платинометалльного оруденения Федорово-Панского рудного района (Кольский полуостров).

Кроме того, во ВНИИКАМ на основе ЭС «Генезис» была разработана ЭС дешифрирования вещественного состава горных пород по материалам дистанционного зондирования [13].

Организация экспертной прогнозирующей системы «Генезис». ЭС «Генезис» предназначена для представления знаний экспертов в геологическом прогнозировании [2, 3] и разработана как «пустая» экспертная система, не содержащая априори каких-либо знаний. Знания представляются в виде отдельных моделей, которые используются для решения содержательных задач. Совокупность всех экспертных моделей, включенных в данный момент в ЭС, составляет базу знаний системы. Эксперт в своей предметной области строит отдельную модель или группу моделей знаний. После того как эта модель с помощью имеющихся в ЭС «Генезис» средств помещена в базу знаний, пользователь, работая с ЭС, может получать квалифицированные экспертные заключения в пределах предметной области, описываемой моделью, т.е. решать интересующие его прогнозные задачи.

Модель описывается на специальном языке описания знаний при непосредственном участии эксперта или группы экспертов. Процесс введения модели в ЭС называется загрузкой базы знаний. После того как база знаний загружена, ЭС готова к работе с геологом-пользователем. В процессе диалога пользователь сообщает системе необходимую информацию, а ЭС при помощи процедур логического вывода дает экспертные заключения. Затем, с помощью системы объяснения пользователь может шаг за шагом просмотреть последовательность логических заключений, получая в процессе диалога необходимые пояснения.

В систему «Генезис» входят следующие основные компоненты: базы знаний и данных, подсистемы загрузки баз знаний, тестирования, логического вывода и объяснений. Для формирования базы знаний в ЭС применяются графическая форма языка описания знаний и редактор базы знаний, позволяющий в диалоговом режиме перевести графическое описание моделей знаний во внутреннее представление системы.

Первый вариант модели обычно требует корректировки после опробования на эталонных объектах. В случае, если поведение модели не совпадает с предполагаемым, эксперт вносит в описание модели соответствующие изменения. Для этой цели служит подсистема тестирования базы знаний. Подсистемы логического вывода и объяснения работают с внутренним представлением модели. Программа логического вывода в режиме диалога запрашивает у пользователя необходимую информацию и затем выдает экспертное заключение. При работе программы факты, вводимые пользователем, могут быть сохранены в базе данных для последующего использования. Программа объяснения позволяет пользователю получить пояснения по конкретным заключениям, сделанным программой логического вывода. В процессе диалога с ЭС пользователь может подробно рассмотреть процесс вывода интересующего его логического заключения.

Язык описания знаний ЭС «Генезис». Элементы языка описания знаний (ЯОЗ) [6] — гипотезы, правила и факты. Формируя свои знания на ЯОЗ и вводя их в ЭС, эксперт дает возможность компьютеру делать определенные логические заключения, которые представляются в ЯОЗ в виде гипотез. По сути дела, модель — это набор гипотез разных уровней, истинность которых будет установлена ЭС в ходе логического вывода. Следуя этому тезису, общей гипотезой, сформулированной

в модели, может быть заключение о перспективности исследуемой территории на определенный тип промышленного оруденения. Промежуточные гипотезы более низкого уровня представляют собой заключения о благоприятных факторах, объединяющих группы геологических признаков (например, формационных или литологических).

Оценка гипотез проводится при помощи правил, формулируемых экспертом и представляющих собой его знания о закономерностях рассматриваемой предметной области. Каждое правило имеет посылку и заключение. Связь между ними удобно интерпретировать как правила вида: «ЕСЛИ ..., ТО ..., ИНАЧЕ ...», каждое из которых является определенной закономерностью, используемой ЭС для получения логических заключений. Так, если истинность гипотезы о благоприятном формационном и литологическом прогнозах факторах уже установлена, то в модели знаний должны быть правила, связывающие эти гипотезы с таковой о перспективности исследуемой территории. Это дает ЭС возможность установить истинность гипотезы о перспективности исследуемой территории из истинности гипотез о благоприятных формационном и литологическом прогнозах факторах.

Заключениями правил всегда являются гипотезы, посылкой правила могут служить как гипотезы, так и факты. Факты — это заключения, их истинность ЭС не стремится доказать. Вместо этого она задает вопросы пользователю, устанавливая с его помощью ложность или истинность фактов. Факты — это те данные, на основании которых ЭС делает прогнозное заключение, используя в результате промежуточных выводов сформулированные экспертом гипотезы и правила, а также и элементарными, неделимыми для ЭС утверждениями. Для того, чтобы установить истинность очередного факта, ЭС может задать пользователю, например, следующий вопрос: «Характерно ли присутствие интрузивных образований для вашего района?».

Язык описания знаний, используемый в ЭС «Генезис», — графическое изображение гипотез, фактов и связывающих их правил. Гипотезы и факты изображаются в виде прямоугольников (факты отличаются от гипотез), содержащих их названия. Правила изображаются стрелками, соединяющими посылку правила и его заключение. Если заключение расположено выше посылки, то стрелки могут быть заменены линиями, при этом несколько правил могут быть объединены. В качестве примера модели знаний приведем фрагмент базы знаний для прогнозирования медно-порфировых месторождений [4] (рис. 1).

Модель знаний и логический вывод в ЭС «Генезис» связаны с нечетким представлением как знаний, так и данных. Для установления истинности заключений каждому факту и каждой гипотезе присваивается целое число от -100 до +100. Вариации этих чисел могут рассматриваться как степень принадлежности конкретной реализации факта или гипотезы к нечеткому множеству, их характеризующему, или как степень уверенности пользователя в их истинности.

Правила вывода определяют ациклический граф, вершины в котором — гипотезы и факты. Гипотезы нижнего уровня связаны только с фактами. Геолог, отвечая на вопросы ЭС, задает степень истинности или ложности фактов, вводя характеризующие их степени уверенности. Затем механизм логического вывода, применяя соответствующие правила, последовательно определяет степень уверенности для каждой гипотезы. Это происходит следующим образом. Пользователь указывает целевую гипотезу. Пытаясь доказать или опровергнуть ее, механизм логического вывода использует правила, для которых целевая гипотеза является заключением. Если посылками этих правил служат другие гипотезы, они устанавливаются в ЭС как подцели. Таким образом, намечается иерархия целей, которые должны быть достигнуты в процессе логического вывода. Если в качестве посылок правил встречаются факты или уже доказанные утверждения, то соответствующие

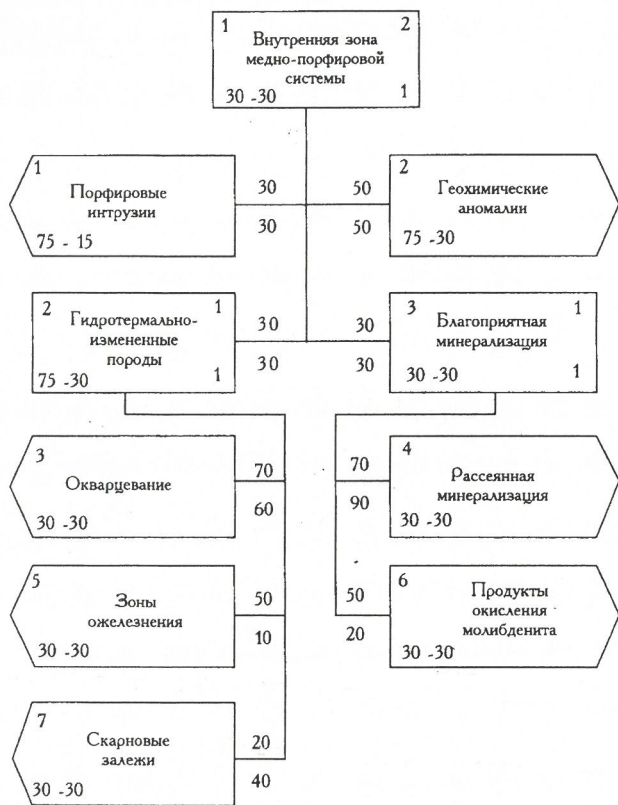


Рис. 1. Фрагмент модели базы знаний применительно к прогнозированию медно-порфировых месторождений

правила срабатывают, вычисляя значение истинности соответствующего заключения. Последовательно раскрывая все постоянные подцели, механизм логического вывода достигает намеченной целевой гипотезы.

Каждой гипотезе и факту в модели знаний приписаны два числа P_+ и P_- , называемые их пороговыми значениями. Числа P_+ и P_- разбивают интервал степени уверенности на три области: утвердительную a_+ , неопределенную a_0 и отрицательную a_- . Поэтому на логический вывод влияет то, в какой из интервалов попадает значение степени уверенности гипотезы.

Соответственно, каждому правилу приписаны два целых числа C_+ и C_- также в интервале от -100 до $+100$, характеризующие степень надежности правила в процедуре логического вывода. Для каждого правила в процессе логического заключения определяется частичная степень уверенности заключения на основании степени уверенности посылки. Когда для гипотезы сработали все правила, тогда на основании частных степеней уверенности, полученных по каждому из них, определяется общая степень уверенности гипотезы. Способ ее определения различается в зависимости от типа, указанного в ЯОЗ.

Имея общие представления об элементах языка описания знаний, охарактеризуем более подробно каждый из них. Гипотезы, факты и правила для того, чтобы их можно было отличить друг от друга, снабжаются номерами. Нумерация каждого из элементов ЯОЗ проводится независимо. Гипотезы и факты получают номера (начиная с единицы), которые не обязательно должны следовать подряд. Модель включает и комментарий — описание модели, который тоже может рассматриваться как один из элементов языка. В комментарии могут быть отражены такие сведения, как область применения модели, общее описание, источники, на основании которых разрабатывалась модель и т.д.

Гипотеза — заключение, которое выводится на основе знаний, имеющихся в ЭС. Связанная правилами со своими посылками, гипотеза в процессе логического вывода получает значение степени уверенности, рас-

считанное на основании степени уверенности ее посылки. Для того, чтобы пользователь мог получить заключение, каждая гипотеза включает три альтернативных текста, выражающих ее смысл. Какой из текстов заключения пользователь получит в процессе логического вывода, зависит от того, в какой из интервалов a_+ , a_0 или a_- попадает степень уверенности гипотезы. Интервалы, в свою очередь, определяются порогами P_+ и P_- , задаваемыми пользователем при определении гипотезы. Они должны соответствовать соотношению $-100 \leq P_+ \leq +100$. При этом предполагается, что точки P_+ и P_- входят соответственно в интервалы a_- и a_+ , и если $P_+ = P_- = P$, то точка P входит в интервал a_+ . Значения порогов P_+ и P_- используются также в процессе вывода степени уверенности для правила, в зависимости от того, в какой из интервалов попадает степень уверенности посылки, степень уверенности правила будет получать разные значения.

Степень уверенности гипотезы в зависимости от степени уверенности правил вычисляется на основании определенного для нее типа. Тип гипотезы соотносится с одной из основных логических операций — «и/или» и соответствует определенной операции алгебры нечетких множеств. Определены 1–5 типы гипотезы.

Типы 1 и 2 установлены для операции со степенями уверенности правил, которые независимы друг от друга. Тип 1 соответствует нечеткому «или», а тип 2 — нечеткому «и» для независимых посылок. Типы 3 и 4 определены для степеней уверенности, считающихся зависимыми. Тип 3 соответствует нечеткому «или», а тип 4 — нечеткому «и» для зависимых посылок. Тип 5 гипотезы введен для упрощения задания часто встречающегося случая — выбора из нескольких альтернативных вариантов. Набор нечетких операций, реализованных в системе, включает также операцию отрицания «не». Поскольку она применяется к единственному аргументу, то реализуется для каждого правила. Графически гипотеза представлена прямоугольником с кратким названием и числовыми характеристиками (рис. 2, а).

Типом гипотезы определяется способ агрегирования степеней уверенности правил. Например, гипотеза «Медно-порфировая система» (МПС) зависит от двух других гипотез: «Центральная зона МПС» и «Внешняя зона МПС», степени уверенности которых вычисляются по совокупности фактов, но мы не будем здесь принимать во внимание уровни, лежащие ниже гипотез о внешней и центральной зонах. Предположим, что степени надежности для правил, соединяющих гипотезы-посылки с гипотезой-следствием заданы. Тогда можно выбрать тип для гипотезы-заключения «Медно-порфировая система» (рис. 3). Обозначим через X и Y степени уверенности посылки, тогда $T(X, Y)$ — степень уверенности гипотезы-следствия. Посылки считаются независимыми, если появление (или отсутствие) одной из них никак не влияет на появление (или отсутствие) другой. Если же появление или отсутствие одной из посылок влияет на появление другой, то такие посылки являются зависимыми. В нашем случае будем считать, что внешняя и центральная зоны могут появиться независимо друг от друга. Если есть внешняя зона, то совсем не обязательно должна быть и центральная. Такая ситуация может иметь место, например, при неопределенном уровне эрозионного среза. Рассмотрим несколько примеров.

1. Эксперт, строящий модель знаний, считает, что для подтверждения гипотезы «Медно-порфировая система» достаточно иметь положительной хотя бы одну из посылок, при этом посылки независимы. В этом примере рекомендуется для гипотезы «Медно-порфировая система» выбрать тип 1:

$$T(X, Y) = \begin{cases} |X+Y-XY|/100, & \text{если } X>0, Y>0 \\ |X+Y+XY|/100, & \text{если } X<0, Y<0 \\ |X+Y|, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

2. Эксперт предполагает, что для подтверждения ги-

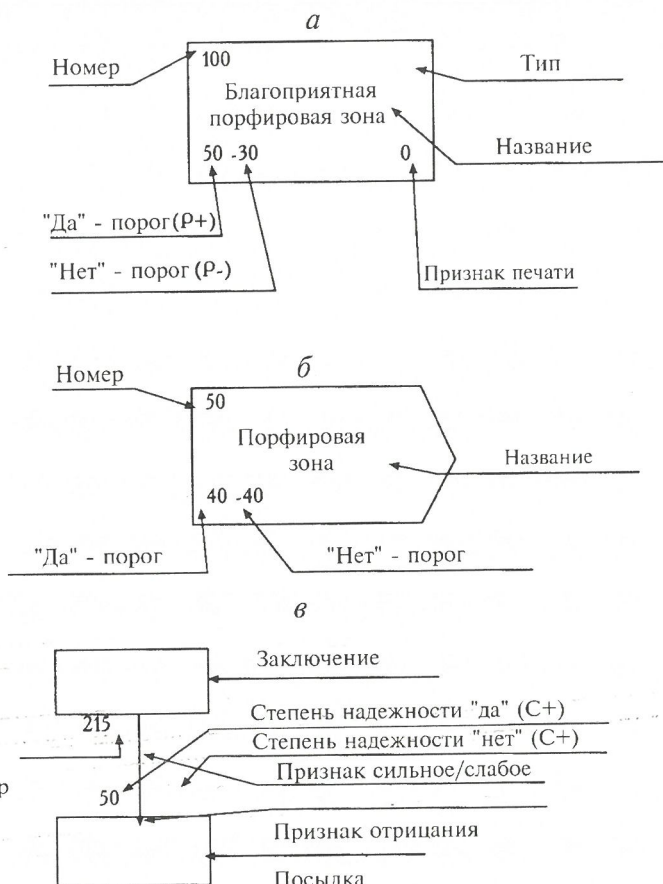
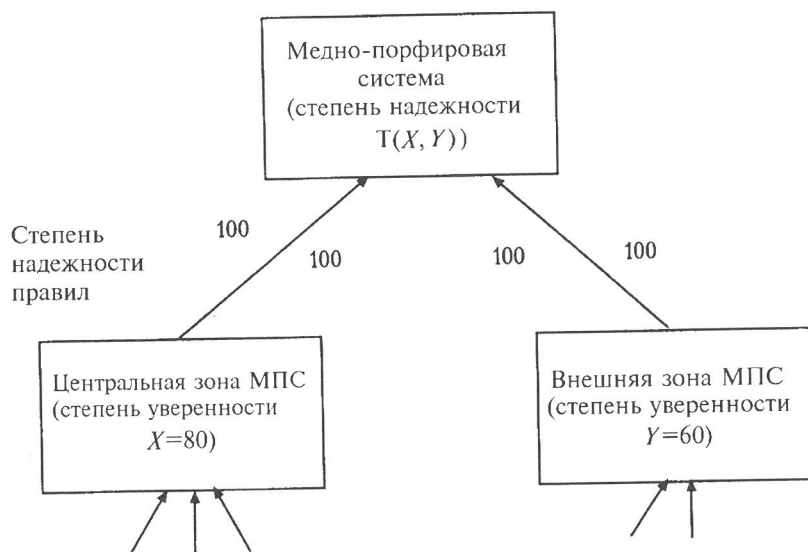


Рис. 2. Основные элементы языка описания знаний применительно к прогнозированию медно-порфировых месторождений:

а — гипотеза; б — факт; в — правило



Тип гипотезы	Степень уверенности		
	X	Y	T(X, Y)
1	80	60	92
2	80	60	48
3	80	60	80
4	80	60	60
5	80	60	80

Рис. 3. Пример использования в языке описания знаний гипотез различных типов, модель медно-порфировых месторождений

потезы-следствия при независимых посылах необходимо, чтобы положительными были обе посылки, тогда нужно выбрать тип 2:

$$T(X, Y) = \begin{cases} XY/100, & \text{если } X > 0, Y > 0 \\ -XY/100, & \text{если } X < 0, Y < 0 \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

3. Эксперт предполагает зависимость посылок. Это может быть положительная зависимость, т.е. если имеет место центральная зона, то должна быть и внешняя. Такой случай можно наблюдать, например, при достаточно низком эрозионном срезе. Если эксперт считает, что при зависимых посылах для подтверждения гипотезы «Медно-порфировая система» достаточно, чтобы положительной была хотя бы одна посылка, то для гипотезы-следствия нужно выбрать тип 3:

$$T(X, Y) = \begin{cases} \max(X, Y), & \text{если } X > 0, Y > 0 \\ \min(X, Y), & \text{если } X < 0, Y < 0 \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

4. Если при зависимых посылах эксперт полагает, что для подтверждения гипотезы-следствия необходимо, чтобы положительными были обе посылки, то для гипотезы-следствия нужно выбрать тип 4:

$$T(X, Y) = \begin{cases} \min(X, Y), & \text{если } X > 0, Y > 0 \\ \max(X, Y), & \text{если } X < 0, Y < 0 \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Кроме упомянутых типов гипотез введен еще тип 5. С его помощью моделируется часто встречающаяся ситуация выбора из нескольких альтернативных возможностей. Например, пусть гипотеза-следствие есть «Благоприятные магматические признаки краевых вулканоплутонических поясов» и «Магматические признаки барьерных зон». Факты-посылки: «Магматические признаки краевых вулканоплутонических поясов» и «Магматические признаки барьерных зон». Гипотеза-следствие имеет тип 5. Это означает, что если уже обнаружены магматические признаки краевых вулканоплутонических поясов, то не имеет смысла поиск магматических признаков барьерных зон. Если гипотеза имеет тип 5, ЭС, обнаружив первое правило, имеющее утвердительную степень уверенности, присваивает его значение степени уверенности гипотезы и не рассматривает следующие правила.

Факт в ЭС — это элементарный квант знания, неделимый для любой из системных процедур. В процессе логического вывода ЭС пытается получить значение степени уверенности необходимых ей фактов. Если при вводе используется база данных, то она просматривается в поисках значения факта для указанного объекта. Если значение факта отсутствует, то ЭС организует запрос на терминал пользователя, после чего значение факта фиксируется в базе данных и сохраняется для дальнейшего использования. При загрузке базы знаний описание факта должно включать формулировку вопроса к пользователю. Кроме того, в описании факта определяются значения порогов P+ и P-, которые участвуют в процессе логического вывода аналогично порогам гипотез: они используются для расчета степени уверенности правил, для которых описываемый факт является посылкой.

Графически факт в ЯОЗ изображается в

виде прямоугольника, который включает его название и числовые значения $P+$ и $P-$ (см. рис. 2, б).

Правило — это выражение определенной причинно-следственной связи, включающее условия. В ЭС правило является указателем, направляющим логический вывод. Каждое правило имеет посылку, в качестве которой может выступать гипотеза, факт и заключение. Последнее может быть только гипотезой. В ЭС правила «передают» значение от степени уверенности посылки к заключению. Если посылка правила получила значение степени уверенности X , то Y — степень уверенности правила определяется на основании следующего условного выражения:

$$Y = \begin{cases} XC+, & \text{если } X \geq P+ \\ 0, & \text{если } P- < X < P+ \\ XC-, & \text{если } X \leq P-. \end{cases}$$

Таким образом, степень уверенности правила Y вычисляется на основании того, в какой из интервалов — $a+$, $a0$ или $a-$ попадает степень уверенности посылки. Каждое правило ЭС определяет две закономерности: при условиях истинности посылки и ее ложности. При неопределенности значения посылки (X принадлежит $a0$) значение степени уверенности правила также не определено.

Поскольку правила в ЭС — это, по существу, нечеткие отношения, связывающие функции принадлежности посылок и соответствующих заключений, то они определяются на основе степени надежности правила $C+$ и $C-$ (т.е. насколько сильна связь между посылкой и следствием, определяемая правилом). Значения степени надежности правила находятся в интервале $[-100, +100]$: 1) если степень надежности положительна — истинность причины влечет истинность следствия; 2) степень надежности отрицательна — истинность причины влечет ложность следствия; 3) степень надежности равна нулю — причинной связи не существует.

Для того, чтобы ЭС могла продемонстрировать пользователю порядок получения заключения, каждое правило может иметь его краткую содержательную формулировку. Для этого при определении правила в него необходимо ввести тексты, поясняющие его смысл как для истинного, так и для ложного значения посылки.

Кроме того, для каждого правила могут быть заданы дополнительные возможности: признак отрицания и признак «сильное/слабое». Если задан признак отрицания, вместо значения посылки X используется ее отрицание $\neg X$, вычисляемое как $X = -X$. Признак «сильное/слабое» — выражение характера причинно-следственной связи, описываемой правилом. Этот признак учитывается в процессе вычисления общей степени уверенности гипотезы по степени уверенности правил, для которых она является заключением. Так например, если в базе знаний для гипотезы определены сильные правила, то это предполагает, что в случае, если посылка любого из сильных правил становится ложной, то и гипотеза также принимает ложное значение, несмотря на значения остальных посылок. При этом в качестве общей степени уверенности гипотезы принимается степень уверенности сильного правила, для которого посылка ложна.

Графически правило изображается стрелкой, направленной от посылки к заключению. Правило может обозначаться и линией, тогда предполагается, что изображение заключения на схеме находится выше изображения посылки. Рядом со стрелкой проставляются числовые характеристики правила. Если правило имеет отрицание, стрелка помечается точкой у основания. Если правило определено как сильное, стрелка подчеркивается. Сильное правило с признаком отрицания приведено на рис. 2, в.

Рассмотрим теперь, каким образом устанавливать пороги значимости степеней уверенности гипотез и фактов. Предположим, что степень уверенности в истинности некоторого факта равна $+20$. Например, в

наличии площадной пропилитизации пользователь уверен на 20%. Возникает естественный вопрос: это мало или много? Разумно предположить, что для некоторых фактов и гипотез эта степень уверенности недостаточна, чтобы считать ее подтвержденной, а для других достаточна, чтобы принять по ним определенное заключение. Таким образом, задавая пороги $P+$ и $P-$, которые делят интервал $[-100, +100]$ на три области: отрицательную — $a-$, неопределенную — $a0$ и положительную — $a+$, мы устанавливаем значимость степеней уверенности. При этом нужно помнить о том, что, чем больше $P+$ или меньше $P-$, тем более жесткие требования к определенности факта или гипотезы предъявляются.

Разработка баз знаний для ЭС «Генезис». Разработка базы знаний — это процесс передачи и преобразования опыта решения прогнозных задач от эксперта к ЭС [16]. Эксперт является источником геологических знаний, но он обычно малосведущ в технических вопросах проектирования баз знаний и работы с ЭС. Поэтому для разработки базы знаний кроме эксперта необходим еще и инженер по знаниям (аналитик). Последний выступает как посредник, помогающий эксперту структурировать его знания и формализовать их. В ЭС «Генезис» база знаний отделена от собственно ЭС. Кроме того, специальное программное средство — редактор базы знаний позволяет загружать и изменять базу знаний в диалоговом режиме. Это дает возможность эксперту даже с небольшими опытом работы на ЭВМ непосредственно взаимодействовать с ЭС, выполняя тем самым функции инженера по знаниям.

Первый шаг инженера по знаниям заключается в изучении проблемы по общей литературе и специальными публикациями. Он должен определять обобщенные задачи, которые будет решать разрабатываемая ЭС. Затем инженер проводит с экспертом серию встреч для постановки проблемы и неформального ее описания. Эксперт и инженер начинают с того, что определяют объем решаемых в ЭС задач, стремясь к тому, чтобы сложность разрабатываемых моделей знаний не была слишком большой. Более правильно в случае большого числа решаемых задач установить очередность их разработки, начав с ограниченных по объему, но имеющих ключевое значение.

На следующем этапе инженер пытается подобрать наиболее подходящие конструкции языка описания знаний и выясняет, взаимодействуя с экспертом, отражают ли эти конструкции знания последнего. При этом инженер должен получить от эксперта информацию о том, какие факты несут основную смысловую нагрузку, в каком порядке ЭС должна запрашивать информацию у пользователя, какие выводы о надежности заключений могут быть получены в зависимости от представляемой пользователем информации, в каком порядке должны решаться рассматриваемые задачи, виды необходимых объяснений и т.д.

Далее, после решения основных вопросов, следует стадия детальной разработки экспертной модели. Определяется полный список гипотез, проверяемых в процессе работы ЭС, фактов, информация о которых необходима для их оценки, и наборы правил, связывающих факты и гипотезы. Вся эта информация фиксируется в виде схем на языке описания знаний.

Результатом этой стадии являются: зафиксированные понятия, логика и рассуждения эксперта; знания эксперта, представленные в виде некоторой структуры, что делает их обозримыми, а следовательно, доступными для дальнейшего изучения и уточнения; общая стратегия решения прогнозных задач экспертом; правила, отражающие связи, используемые экспертом для решения прогнозных задач.

Инженер после тщательной проверки прогнозных модели мысленно «проигрывает» правила, чтобы получить результаты для ряда стандартных случаев и некоторых экстремальных условий. Оценка полученных результатов экспертом — основа для изменения и «довод-

ки» разрабатываемой модели. Нередко в ходе такой работы эксперт уточняет и классифицирует свои знания о проблеме, т.к. информация, получаемая от инженера, позволяет ему увидеть проблему с новой, часто неожиданной для него стороны. Изменения в базе знаний осуществляются инженером по мере уточнения правил в первоначальной версии, введения указанных экспертом дополнительных правил. И лишь после этих операций база знаний загружается в ЭС. Взаимодействуя с экспертом, используя контрольные прогоны модели на ЭВМ, инженер формирует базу знаний, имеющую обычно несколько сотен правил и фактов. Часто первая версия базы знаний оказывается слишком громоздкой. В этом случае инженер должен отказаться от нее, построив новую, логически более стройную и более понятную для пользователя.

Большое значение имеет тестирование разработанной модели на реальных прогнозных объектах. Часто теоретически полная модель не выделяет или неправильно идентифицирует определенные классы прогнозных объектов. В этом случае продолжается коррективировка модели, иногда с пересмотром круга решаемых задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ажигрей Д.Г., Вострокнутов Е.П., Вострокнутова А.И. и др. Экспертная система «Генезис». Вып. IV. Автоматизированный прогнозно-поисковый комплекс золотого и золотосеребряного оруденения в углеродисто-терригенных формациях Западного Узбекистана. — Алма-Ата: ЦНИГРИ, КазИМС, 1991.
2. Бугаец А.Н., Вострокнутов Е.П., Вострокнутова А.И. Геологическое прогнозирование и методология искусственного интеллекта // История геологии. Геологическое образование. Математическая геология: Доклады советских геологов на XXVIII сессии международного Геологического конгресса (Вашингтон, июль 1989). М., 1989. С. 124—131.
3. Бугаец А.Н., Вострокнутов Е.П., Вострокнутова А.И. Применение экспертных систем в геологическом прогнозировании. — М.: ВИАМС, 1986.
4. Вострокнутов Е.П., Вострокнутова А.И. Методические рекомендации по проектированию баз знаний для автоматизированных прогнозно-поисковых комплексов на основе экспертной системы «Генезис». — Алма-Ата, 1989.
5. Вострокнутов Е.П., Вострокнутова А.И., Францессон Е.В. и др. Экспертная система «Генезис». База знаний для прогноза и поисков месторождений алмазов кимберлитового типа. Методические рекомендации. — Алма-Ата: ЦНИГРИ, КазИМС, 1990.

6. Вострокнутов Е.П., Вострокнутова А.И., Ильясов В.М. и др. Экспертная система «Генезис». — Алма-Ата: КазИМС, 1987.
7. Вострокнутов Е.П., Звездов В.С., Ильясов В.М. и др. Автоматизированный прогнозно-поисковый комплекс на базе экспертной системы для прогноза и поисков медно-порфировых месторождений. — Алма-Ата: ЦНИГРИ, КазИМС, 1987.
8. Добрынин В.Н., Черемисина Б.Н. Математические методы и средства вычислительной техники в геолого-прогнозных исследованиях. — М.: Недра, 1988.
9. Искусственный интеллект: Справочник в 3-х кн. — М.: Радио и связь, 1990.
10. Кривцов А.И. Прикладная металлогения. — М.: Недра, 1989.
11. Кривцов А.И., Нарсеев В.А. Геологоразведочный процесс и прогнозно-поисковые комплексы // Сов. геология. 1987. № 1. С. 17—27.
12. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. — М.: Наука, 1986.
13. Перцов А.В., Гальперов Г.В., Вострокнутов Е.П. и др. Создание экспертной системы дешифрирования вещественного состава горных пород по материалам дистанционного зондирования // Геологическое изучение и использование недр: Научно-техн. информ. сб. «Геоинформмарк». Вып. 3. М., 1995. С. 61—71.
14. Перцов А.В., Гальперов Г.В., Вострокнутов Е.П. и др. Составление прогнозно-металлогенических карт на основе компьютерного комплексного анализа цифровых космических и геолого-геофизических данных // Геологическое изучение и использование недр: Научно-техн. информ. сб. «Геоинформмарк». Вып. 3. М., 1995. С. 50—61.
15. Пономарев В.Г., Вострокнутов Е.П., Акимцев В.А. Экспертная система — инструмент прогнозирования стратиформного полиметаллического оруденения. — Новосибирск: ОИГТМ, СО АН СССР, 1991.
16. Построение экспертных систем / Под ред. Ф. Хейеса-Рота, Д. Уотермана, Д. Лената. — М.: Мир, 1987.
17. Рафаилович М.С., Вострокнутова А.И. Комплексирование геологических и компьютерных моделей золотосульфидно-кварцевой формации для целей детального прогноза и оценки. — Алма-Ата: КазИМС, 1994.
18. Справочник по прикладной статистике / Под ред. Э. Ллойда, У. Лидермана, Ю.Н. Тюрина. Т. 1—2. — М.: Финансы и статистика, 1989—1990.
19. Требухин В.С., Ширай Е.П., Вострокнутов Е.П. и др. Экспертная система «Генезис». Вып. V. База знаний для прогноза и поисков медно-колчеданных месторождений уральского типа в вулканогенных формациях. — Алма-Ата: ЦНИГРИ, КазИМС, 1991.

УДК [519.68:91]:55:553.98 (470.11)

© И.О. Смирнова, А.А. Русанова, 1999

ГИС-технология обработки и интерпретации материалов дистанционного зондирования для изучения тектонических критериев размещения месторождений углеводородов

И.О. СМЕРНОВА, А.А. РУСАНОВА

Специфика использования материалов дистанционного зондирования (МДЗ) в нефтегазовой геологии определяется геологическими особенностями нефтегазовых территорий, представляющих собой осадочные бассейны со слабодислоцированным чехлом большой мощности. Ловушки углеводородов (УВ), как правило, приурочены к глубоким горизонтам осадочного чехла и могут отражаться на поверхности через элементы и компоненты ландшафта.

В этих условиях МДЗ позволяют эффективно решать вопросы, связанные с изучением регионального строения территорий, выделением основных разрывов и блоков, контролирующих распределение нефтегазоносных структур, а также проводить картирование элементов и компонентов ландшафта, являющихся геоиндикаторами этих структур. Для установления взаимосвязей между глубинным строением и его поверхностным отражением необходим одновременный анализ большого объема информации. Такой анализ может быть успешно осуществлен при использовании технологий ГИС, позволяющих систематизировать и формализовать имеющиеся знания, проводить обработку и ком-

плексный анализ данных и создавать модели прогнозных объектов.

В разработанной во ВНИИКАМ технологии большое внимание уделяется обработке и анализу космических снимков (КС), в т.ч. данных новых многозональных и радиолокационных (РЛ) спутниковых систем с высоким пространственным и спектральным разрешением (таких как японская система JERS-1*), выделению и обработке геоиндикаторов и их комплексированию с геолого-геофизическими данными** [1—3, 5, 6].

Технология предусматривает создание баз знаний (БЗ) и баз данных (БД).

БЗ включает знания специалистов-экспертов об области исследований, методике использования и обра-

*Право на данные со спутника JERS-1 (Япония) принадлежат MITI/NASDA. Сотрудники NASDA любезно представили нам данные в рамках выполнения программы проверки эффективности JERS-1 (регистрационный номер J-0504).

**Геолого-геофизические данные представлены сотрудниками ВНИГРИ Ю.Н. Гололобовым, О.М. Прищепой, В.Г. Коцем, которым мы признательны за помощь в работе.

ботки материалов, моделях объектов и причинно-следственных связях их образования и функционирования в виде систем правил, в результате выполнения которых могут быть решены поставленные задачи. БЗ для прогноза месторождений нефти и газа содержит информацию об общих закономерностях формирования вещественно-структурных форм земной коры, контролирующих распределение месторождений нефти и газа, характере геологического разреза (составе, мощности, трещиноватости пород, наличии экранирующих покровов), истории тектонического развития, в особенности на новейшем этапе. Последнее важно в связи с изучением морфологических характеристик нефтегазоносных структур по различным горизонтам осадочного чехла и фундамента с выяснением их выраженности в рельефе и ландшафте.

БД — совокупность данных, отражающих состояние объектов и их отношений, необходимых для решения поставленных задач. Она формируется в зависимости от содержания задач прогноза, а также от иерархического уровня прогнозируемых объектов и должна соответствовать БЗ. База данных включает аэрокосмические, геолого-геофизические, геохимические, геомор-

фологические, гидрогеологические и другие данные, главным образом в виде картографических материалов.

Основные этапы, методы и последовательность операций при проведении *тематической обработки МДЗ* в комплексе с геолого-геофизическими данными представлены на рис. 1. Технология имеет модульный характер, в зависимости от уровня задач прогноза (региональный, зональный и локальный) и имеющихся материалов могут быть использованы отдельные модули.

Анализ региональных и зональных тектонических критериев проводился на территории тестового участка 1 (рис. 2), расположенного в тундровой и лесотундровой зонах, включающего следующие тектонические подразделения: Печоро-Колвинский авлакоген, Хорейверскую впадину и Варандей-Адзвинскую зону. Месторождения нефти и газа приурочены к силурийско-нижнедевонским, среднедевонско-нижнефранским, верхнедевонским, нижнекаменноугольным, верхневизейско-нижнепермским, верхнепермским и триасовым отложениям.

При анализе использованы КС, полученные камерой КАТЭ-200 со спутника РЕСУРС-Ф, топографические карты масштабов 1:1 000 000, 1:500 000 и 1:200 000, данные о глубине залегания подошвы многолетнемерзлых пород, геолого-геофизические данные (о гравитационном и магнитном полях, структурные карты поверхностей фундамента и осадочного чехла, сейсморазведочные данные по профилям, схемы распределения месторождений и т.д.), составлены схемы основных геоморфологических элементов, распределения озер по высотным уровням, линейам. Проведено сопоставление всех данных в интерактивном режиме.

В результате анализа сделаны следующие выводы, которые позволили составить схему тектонического районирования осадочного чехла и выделить перспективные на обнаружение залежей УВ участки (рис. 3).

1. Важную роль в распределении месторождений УВ играют разрывные нарушения различного возраста.

2. Большая часть месторождений расположена цепочками вдоль разломов фундамента рифейского возраста в пределах валообразных поднятий осадочного чехла, имеющих северо-западное простирание.

3. По результатам дешифрирования МДЗ выделены линейные элементы северо-западного простирания, которые, как правило, соответствуют разрывным нарушениям фундамента и разграничивают структуры осадочного чехла I и II порядков (см. рис. 3): 1 — граница Ижма-Печорской впадины и Печоро-Кожвинского мегавала, 2 разграничивает Печоро-Кожвинский мегавал и Малоземельско-Колгуевскую моноклинали, 3 отделяет Денисовский прогиб, 4 и 5 разграничивают валы и депрессии в пределах Денисовского прогиба, 6 и 7 — границы Колвинского мегавала, 9 отделяет Хорейверскую впадину от

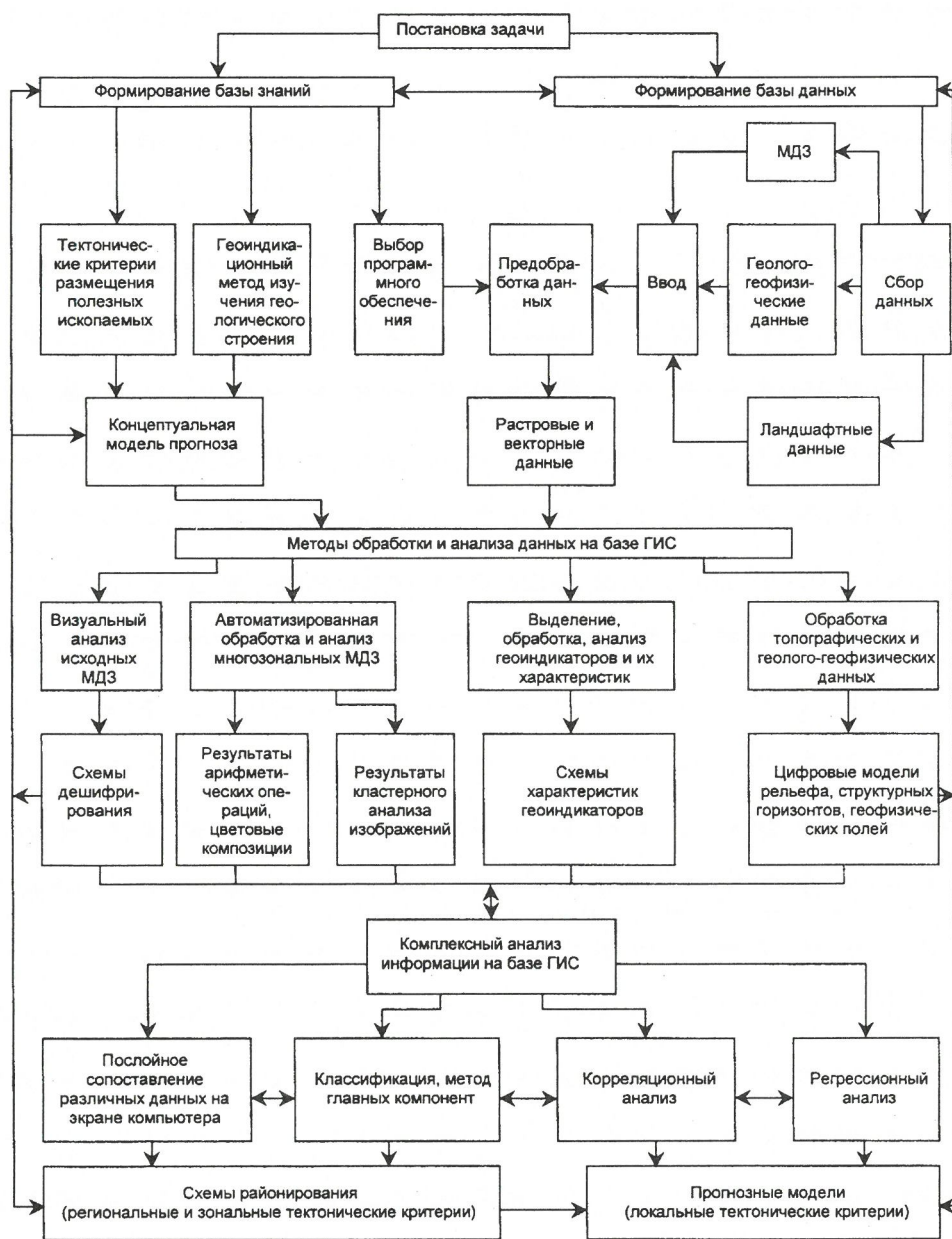


Рис. 1. Обобщенная технологическая схема обработки и интерпретации МДЗ на базе ГИС для изучения тектонических критериев размещения углеводородов

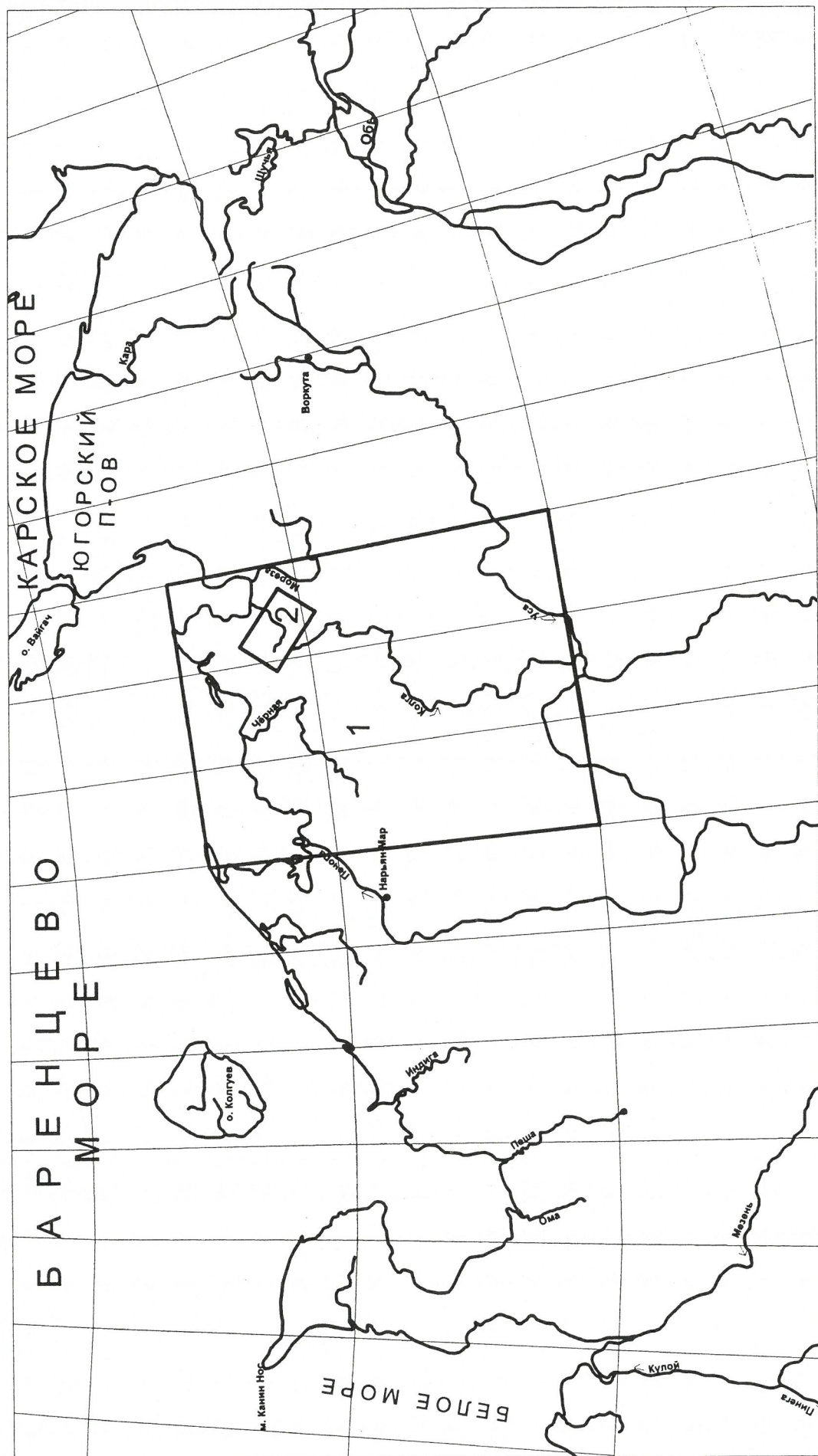


Рис. 2. Схема расположения участков работ:

1 — тестовый участок масштаба 1:1 000 000; 2 — тестовый участок Олений масштаба 1:200 000

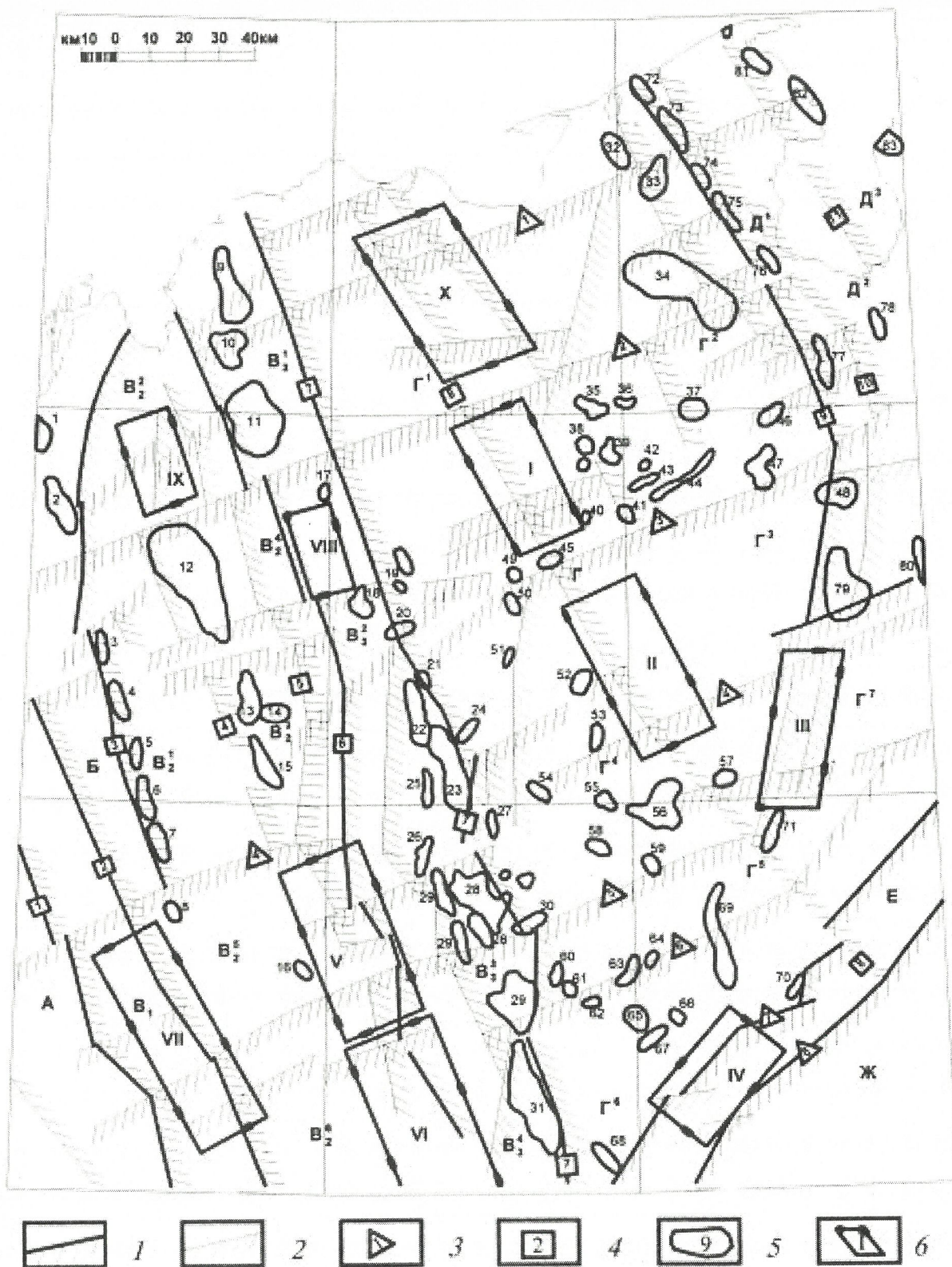


Рис. 3. Схема тектонического районирования осадочного чехла по результатам анализа КС РЕСУРС-Ф (камера КАТЭ-200), северная часть Тимано-Печорской провинции:

основные линеаменты, разграничивающие тектонические структуры: 1 — границы структур I порядка, 2 — границы структур II порядка; 3 — номера линеаментов северо-восточного простирания; 4 — то же, северо-западного и субмеридионального простираний; 5 — месторождения углеводородов и их номера; 6 — участки, перспективные на обнаружение месторождений углеводородов; тектонические элементы осадочного чехла: А — Ижма-Печорская синеклиза (Янгытская ступень), Б — Малоземельско-Колгуевская моноклинал, В — Печоро-Колвинский мегавал, В₁ — Печоро-Кожвинский мегавал, В₂ — Денисовский прогиб, В₂¹ — Шапкино-Юряхинский вал, В₂² — Усть-Печорская депрессия, В₂³ — Лайский вал, В₂⁴ — Верхнелайская депрессия, В₂⁵ — Тибейвйская депрессия, В₂⁶ — Лодминская перемычка, В₃ — Колвинский магавал, В₃¹ — Ярейюский вал, В₃² — Харьягинский вал, В₃³ — Возейский вал, В₃⁴ — Усинский вал, Г — Хорейверская впадина, Г¹ — Чернореченская депрессия, Г² — Садаягинская ступень, Г³ — Коллависовская ступень, Г⁴ — Сандивейское поднятие, Г⁵ — Макариха-Салюкинская антиклинальная зона, Г⁶ — Сынянырдская котловина, Г⁷ — Цильегорская депрессия, Д — Варандей-Адьвинская структурная зона, Д¹ — вал Сорокина, Д² — Мореюская депрессия, Д³ — Сарембой-Лекейягинский вал, Е — гряда Чернышева, Ж — Косью-Роговская впадина

Варандей-Адзвинской зоны, 10 — граница вала Сорочкина и Морейской депрессии. Линементная зона 8 частично соответствует границам структур II порядка в пределах Хорейверской впадины: в северной части — Чернореченской депрессии и Садаягинской ступени, в южной — Колвинской ступени и Сандивейского поднятия.

4. По результатам дешифрирования МДЗ на фоне отчетливо выраженных в геолого-геофизических данных северо-западных разрывов отмечаются северо-восточные зоны линеаментов (см. рис. 3). В геофизических данных северо-восточные зоны выделяются по резким изгибам и сгущениям изолиний глубины залегания поверхностей фундамента и осадочного чехла, а также разграничивают максимумы и минимумы гравитационного и магнитного полей. Северо-восточная зональность отмечается при анализе распределения озер различных высотных уровней. В северо-восточном направлении вытянуты зоны, где отмечается резкое уменьшение глубины залегания подошвы многолетнемерзлых пород.

5. Месторождения УВ находятся, как правило, на пересечении северо-западных и северо-восточных зон линеаментов. К северо-восточной зоне линеаментов 3 (см. рис. 3) приурочена зона позднедевонских рифов, характеризующая повышенной концентрацией наиболее крупных озер и приблизительно совпадающая с границей валдайского оледенения, по данным В.И.Астахова [4]. Наиболее крупные месторождения Василковское (1), Ванейвисское (2), Хыльчужское (9), Южно-Хыльчужское (10), Ярейское (11), им. Титова (31) (см. рис. 3) расположены к северу от этой зоны, в т.ч. и месторождения на шельфе Баренцева и Печорского морей, т.е. в области, подвергавшейся оледенению. Эти месторождения преимущественно газовые и представлены в основном каменноугольными — триасовыми отложениями, что может быть связано с перераспределением залежей в связи с поднятием территории после снятия ледниковой нагрузки или с большей интенсивностью неотектонических движений в северной части территории.

6. Отмечена пространственная приуроченность крупного месторождения на севере Хорейверской впадины (месторождение им. Титова) к одной из платообразных возвышенностей, испытывавшей неотектоническое поднятие, возможно, гляциоизостатической природы.

7. Залежи, приуроченные к нижним горизонтам чехла (S—D₁), расположены в южной части территории по периферии свода Большеземельского поднятия, которому на поверхности соответствует равнина с повышенной плотностью озер и болот, окаймленная грядами полукруглой формы (внутренняя часть Лайско-Адзвинской гряды). Западная граница этой равнины соответствует разрыву в фундаменте. Месторождения Колвинского мегавала Хорьгинское (22), Южно-Хорьгинское (23), Восточно-Хорьгинское (24), Восточно-Возейское (27), Верхневозейское (28) находятся между заозеренной равниной и грядой, а Возейское (29) и Усинское (31) — между грядами, вдоль границ заозеренной равнины (см. рис. 3).

8. Наиболее перспективен на обнаружение залежей УВ участок 1 (см. рис. 3), расположенный в пределах плато, в краевой зоне валдайского оледенения на пересечении северо-западной линементной зоны 8 и северо-восточной зоны 3, контролирующей зону позднедевонских рифов. Здесь возможно обнаружение залежей типа месторождения им. Титова с продуктивностью в нижне- и верхнедевонских отложениях.

Локальные тектонические критерии нефтегазоносности изучались на территории тестового участка Олений (см. рис. 2), расположенного на северо-востоке Хорейверской впадины в тундровой зоне и включающего одно из крупнейших (площадью более 200 км²) недавно открытых месторождений нефти — месторождение им. Титова.

Оно расположено на восточном склоне северной перегибной Большеземельской структуры. Глубина

залегания байкальского фундамента составляет здесь 5—5,5 км. Месторождение охватывает несколько малоамплитудных антиклинальных складок по отложениям силура и нижнего девона общей площадью 12×26 км. Максимальная продуктивность связывается с нижнедевонскими отложениями, которые выклиниваются в юго-западной части участка. В верхнем девоне, по данным бурения и сейсморазведки, выделяются рифы, их нефтеносность отмечена в нескольких скважинах.

В базу данных по участку Олений включены:

КС, полученные со спутника РЕСУРС-Ф 26.06.84 г. камерой КАТЭ-200 в спектральных диапазонах 0,5—0,6; 0,6—0,7; 0,7—0,85 мкм с разрешением 20—30 м;

КС, полученные со спутника РЕСУРС-Ф 15.06.93 г. камерой МК-4 в спектральных диапазонах 0,52—0,57; 0,64—0,69; 0,81—0,9 мкм с разрешением 10—15 м;

КС, полученные 15.06.92 г. с японского спутника JERS-1 OPS в спектральных диапазонах 0,52—0,6 (1 канал); 0,63—0,69 (2); 0,76—0,86 (3); 1,6—1,71 (5); 2,01—2,12 (6); 2,13—2,25 (7); 2,27—2,4 мкм (8 канал), цифровая регистрация, разрешение 18 м;

РЛКС с японского спутника JERS-1 SAR, полученный 15.05.93 г., цифровая регистрация (длина волны 23,5 см, ГГ поляризация, разрешение 24 м);

РЛКС АЛМАЗ, полученный 30.07.92 г., цифровая регистрация (длина волны 9,6 см, ГГ поляризация, разрешение 10—15 м);

топографические карты масштабов 1:200 000 и 1:100 000; структурные карты по различным горизонтам осадочного чехла и фундамента;

карты гравитационного и магнитного полей.

На этапе *предварительной обработки данных* все МДЗ и структурные карты трансформировались в топографическую карту масштаба 1:200 000.

На этапе *визуального анализа* проводилась сравнительная оценка информативности используемых КС для выделения геоиндикаторов разрывных нарушений и структур, содержащих месторождения нефти и газа.

Наиболее удобны для использования в ГИС, благодаря цифровой записи, и информативны КС JERS-1 с разрешением 18 м, в особенности в коротковолновом инфракрасном диапазоне (2,01—2,4 мкм, 6—8 каналы), на которых выделялась информация, не обнаруженная в видимом и ближнем инфракрасном (0,76—0,86 мкм) диапазонах и на КС, полученных другими съемочными системами, например, зона северо-западного простирания, имеющая светлый тон на КС, предположительно связываемая с разломом, а также цепь моренных гряд, сложенных суглинистыми отложениями.

Для выделения основных ландшафтных элементов информативны КС, полученные камерой МК-4, с разрешением 10—15 м в спектральном диапазоне 0,81—0,9 мкм, для выделения озер — РЛКС АЛМАЗ.

КС, полученные камерой КАТЭ-200 с разрешением 20—30 м, вследствие значительной генерализации позволили обобщить мелкие детали и выделить наиболее протяженные линеаменты и крупные ландшафтные аномалии.

Для выяснения природы аномалий, выделенных на КС, проводилось детальное дешифрирование АФС масштаба 1:50 000, по результатам которого составлена ландшафтно-геоморфологическая схема. Сопоставление этой схемы с различными структурными картами и контурами нефтегазоносности месторождения им. Титова показало, что в пределах месторождения отмечен бугристый моренный рельеф с большим числом гляциокарстовых [4] озер, участки с увеличенным размером моренных холмов, а также камы и лимнокамы. За пределами месторождения наблюдаются ровные поверхности, заросшие кустарником, с полигональными грунтами, расположенные на более низких абсолютных отметках, число озер на этих поверхностях резко уменьшается. На северо-востоке граница между этими различающимися типами рельефа проходит по уступу северо-западного простирания, на юго-западе подчеркивается цепочкой удлиненных моренных гряд и зоной распространения более крупных озер. Эта граница

может являться границей одной из ледниковых стадий, но, с другой стороны, отмечается ее пространственная приуроченность к таковой выклинивания нижнедевонских отложений. Отмечено также изменение направления русел рек, увеличение глубины вреза вблизи границ месторождения.

Исходя из вышеизложенного, основными ландшафтными элементами для дальнейшей обработки выбраны озера, эрозионная сеть и линейные элементы ландшафта.

Обработка топографических и геолого-геофизических данных включала получение цифровых моделей рельефа по топографической карте масштаба 1:200 000, структурных поверхностей осадочного чехла, гравитационного и магнитного полей.

Обеспеченность тестового участка многочисленными МДЗ, в т.ч. нового поколения (JERS-1, МК-4), позволила провести *обработку и анализ многозональных изображений* с использованием различных методов.

Метод цветовых композиций основан на синтезе в псевдоцветах пространственно совмещенных изображений, полученных в отдельных узких зонах спектра и передающих яркие характеристики природных объектов в этих зонах. Причем, для синтеза выбираются такие зоны, в которых наилучшим образом отражаются интересные исследователя объекты. Изображениям отдельных зон спектра может присваиваться любой из трех основных цветов (красный, зеленый, синий — преобразование RGB) или другие характеристики (интенсивность, оттенок, насыщенность — преобразование IHS). Последнее преобразование обычно используется при синтезировании РЛ снимков и изображений в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах.

Наибольший интерес из цветовых композиций, полученных на участке Олений, представляют: 1) RGB из трех каналов КС МК-4, где в результате цветовых различий объектов при высоком пространственном разрешении увеличивается выраженность основных ландшафтных элементов, а также границ ландшафтных комплексов, 2) IHS из РЛКС АЛМАЗ и двух каналов КС КАТЭ-200, которая может служить основой для составления ландшафтно-геоморфологической схемы, т.к. на ней в генерализованном виде отражаются все основные элементы, выделяемые по АФС: бугристый моренный рельеф, камы, лимнокамы, моренные гряды, поверхности, заросшие кустарником.

Методы, использующие арифметические операции применительно к изображениям в различных зонах спектра, позволяют улавливать более тонкие различия в отражении природных объектов на изображениях различных зон спектра.

Наиболее информативен при поиске нефтегазоперспективных структур *метод отношений между каналами*. Это обусловлено различиями в проявлении в разных спектральных зонах минеральных и растительных ассоциаций, формирующихся под воздействием мигрирующих флюидов. Известно, что присутствие оксидов железа уменьшает отражательные свойства почв в видимой части спектра и увеличивает в ближней инфракрасной зоне [5]. Деление этих каналов позволяет усилить эти различия и в то же время уменьшить эффекты, связанные с условиями освещения и топографией. Так, на изображении отношения 3 канала к 1 КС JERS-1 (рис. 4) отмечена кольцевая аномалия, имеющая светлый тон, совпадающая в плане с контурами структуры Оленья по отложениям силура и с контуром нефтегазонасыщенности по отложениям нижнего девона. Ее происхождение может быть объяснено присутствием оксидов железа, которое обусловлено просачиванием УВ.

Выделение и обработка геоиндикаторов — одна из важнейших составляющих технологического процесса. Как уже отмечалось на этапе визуального анализа, результаты неотектонических движений проявляются в изменении распределения озер и эрозионной сети, а также линейных элементов ландшафта.

Линеаментный анализ — один из наиболее эффективных методов изучения глубинного строения территорий. Основная его задача — определение зон разрывов

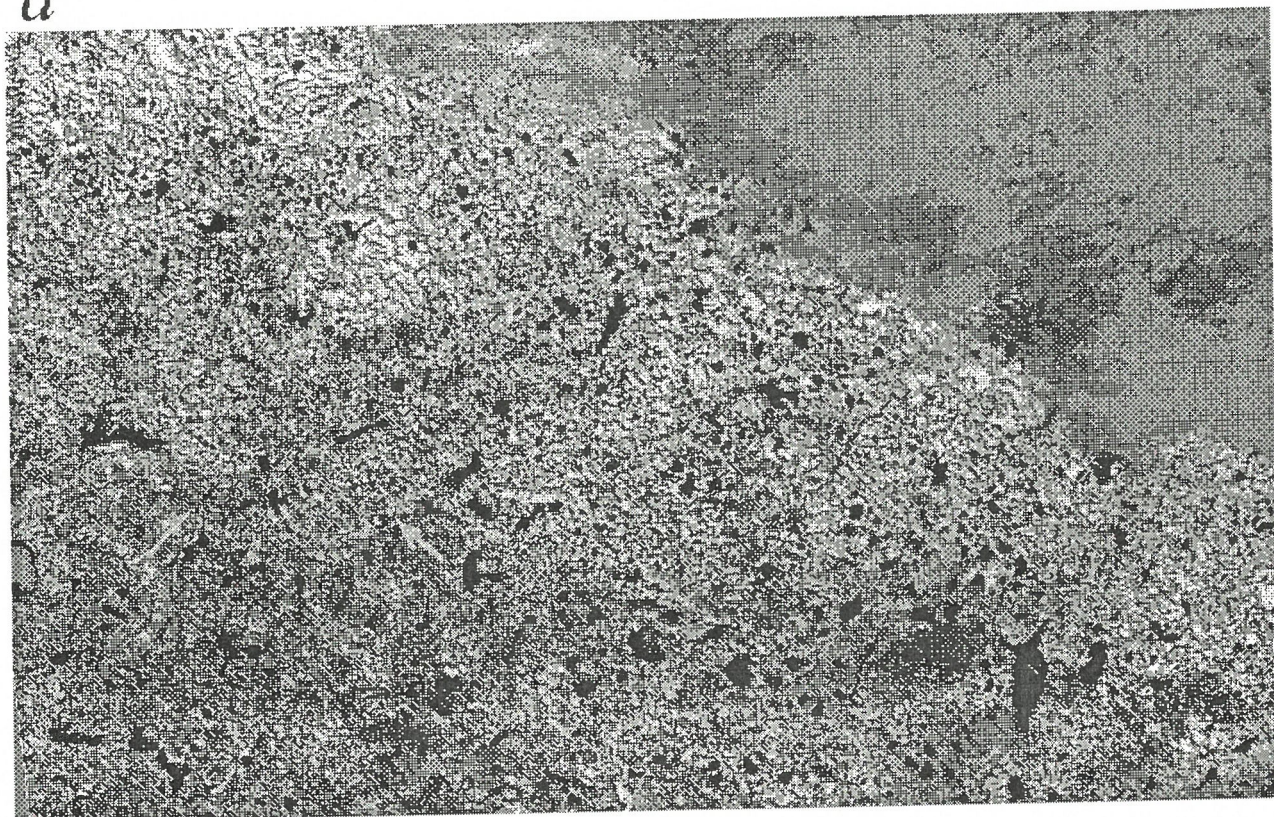
и блоков, характеризующихся различной пространственной организацией поля линеаментов, которым на глубине могут соответствовать участки с различной степенью трещиноватости. Для этого вычисляются и анализируются характеристики суммарного поля линеаментов: плотность, энтропия, анизотропия, а также характеристики систем линеаментов определенных направлений или длин.

Для объективизации процесса выделения линейных элементов изображения и более обоснованного определения информативности изображений различных зон спектра в отражении систем линеаментов проводится автоматическое выделение линеаментов, при котором осуществляются следующие операции: вычисление градиентов, с использованием различных операторов дифференцирования (Собела, Лапласа, Превитт и др.); определение пороговых значений и получение бинарной схемы; скелетизация; прослеживание линеаментов.

На участке Олений проведен линеаментный анализ всех имеющихся в БД КС. Установлено, что наиболее информативны для выделения линеаментов КС в ближнем и коротковолновом инфракрасных диапазонах, а также РЛКС в микроволновом диапазоне, т.к. в этих диапазонах лучше всего фиксируются линеаменты, связанные с гидрографией, изменениями в увлажненности почв и в видовом составе растительности. На основании анализа плотности линеаментов построена результирующая схема, сопоставление которой со структурными картами по различным горизонтам осадочного чехла показало, что выделенные зоны повышенной плотности в целом согласуются с границами блоков осадочного чехла, намечаемым по резким изгибам изолиний, градиентным зонам структурного плана и т.д. Особенно четко на всех изображениях по повышенной плотности линеаментов выделяется лентовидная извилистая зона, совпадающая с границей выклинивания продуктивных нижнедевонских отложений. Четко выделяется область пониженной плотности линеаментов кольцевой формы, соответствующая впадине аналогичной формы по всем горизонтам осадочного чехла, где предполагается отсутствие нефтеносности. Поверхности этой области соответствует склон лимнокама, сложенного песками, отчетливо дешифрируемый по светлому тону на исходных КС.

Выделение озер проводилось как по топокартам масштаба 1:200 000, так и по РЛКС АЛМАЗ, где они получили лучшее отражение, чем на КС в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Анализ распределения озер по гипсометрическим уровням осуществлялся в автоматическом режиме при использовании схемы озер и цифровой модели рельефа масштаба 1:200 000. Для каждого из уровней строились частные схемы плотности озер. Сопоставление этих схем с геокриологическими и геолого-геофизическими данными показало, что наибольший интерес представляет схема озер, расположенных на отметках 140—160 м. На этой схеме четко прослеживается зона северо-восточного простирания, в которой преобладают узкие удлиненные озера с аналогичным простиранием. Глубина залегания подошвы многочисленных пород под этой зоной уменьшается до 200 м по сравнению с окружающим фоном, где она составляет 400—500 м. Отмечена градиентная зона в отложениях верхнего девона вдоль южной границы распространения озер этого уровня. Ориентировка позднедевонских структур на этом участке также северо-восточная. Все это свидетельствует о наличии разрывного нарушения северо-восточного простирания. Зоны концентрации озер гипсометрического уровня 140—160 м расположены также в краевых частях месторождения им. Титова и оконтуривают его, причем наибольшие плотность и размер озер отмечены вдоль южной границы месторождения. На РЛКС АЛМАЗ и JERS-1 эти зоны отчетливо выделяются по более темному тону изображения, что, вероятно, связано с повышенной влажностью и трещиноватостью. Сопоставление распределения плотности озер этого уровня с геологической информацией, выполненное по линиям сейсморазведочных профилей,

a



б

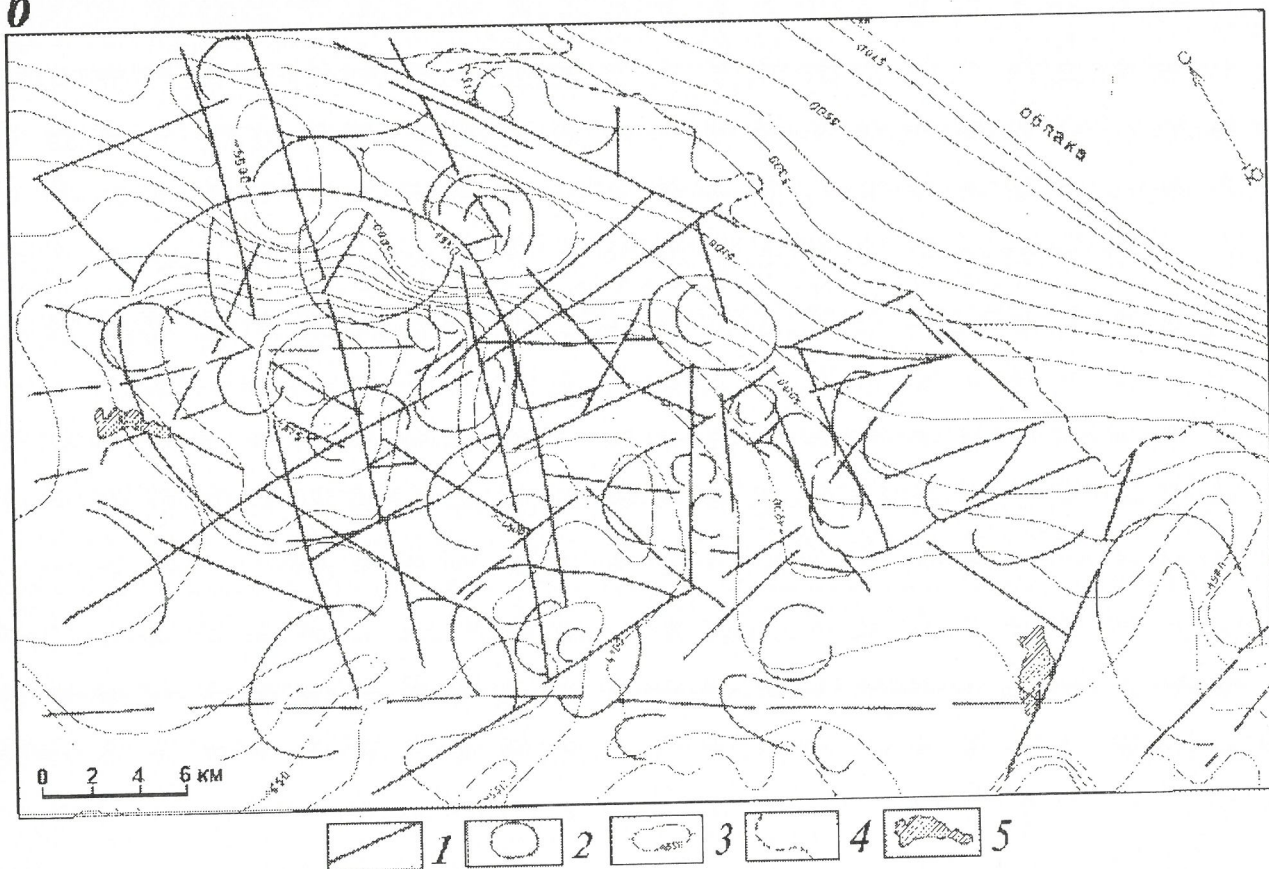


Рис. 4. Анализ отношения каналов космического снимка JERS-1, участок Олений:

a — результат деления 3 канала на 1 канал; *б* — выделенные элементы: 1 — линейные, 2 — дуговые; 3 — изогипсы поверхности силурийских отложений, м; 4 — граница облаков; 5 — озера

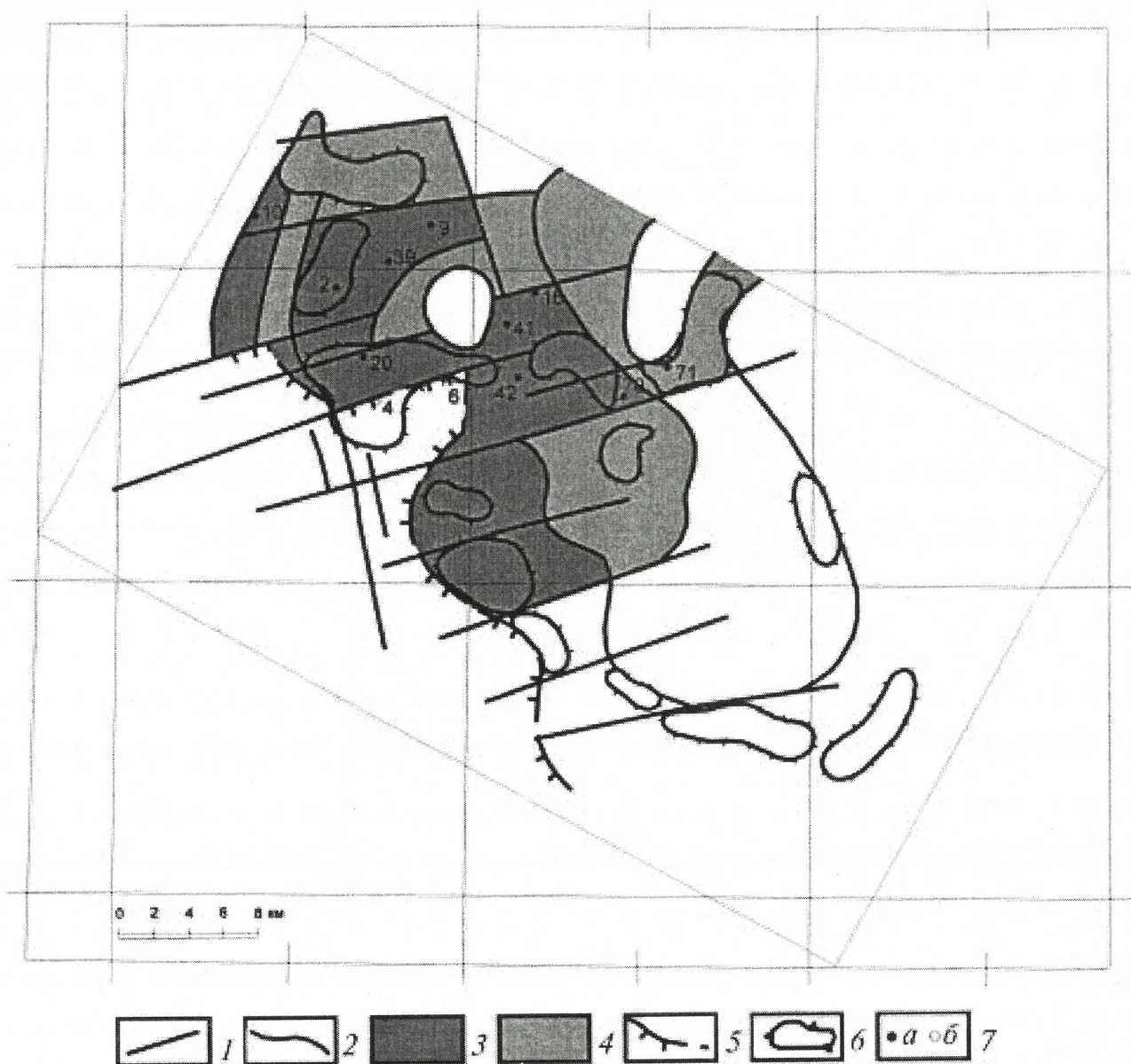


Рис. 5. Прогноз нефтеносности, выполненный на основании комплексного анализа МДЗ и геолого-геофизических данных, участок Олений:

1 — основные линеаменты-разрывы; 2 — дуговые структурные линии; участки с перспективами нефтеносности по нижнедевонским отложениям: 3 — максимальными, 4 — средними; 5 — зона выклинивания нижнедевонских отложений, по результатам анализа МДЗ; 6 — предполагаемые рифовые массивы в верхнедевонских отложениях; 7 — скважины (а — нефтяные, б — пустые)

показало, что участки наибольшей концентрации озер соответствуют рифовым массивам на глубине 3,5 км в отложениях верхнего девона по данным сейморазведки и бурения, на основании которых осуществлен прогноз рифов в верхнедевонских отложениях.

Комплексный анализ материалов разделен на два этапа. На первом на основе концептуальной модели анализируются отдельные признаки: исходные КС, результаты их обработки, схемы геоиндикаторов и их характеристики. На втором анализируются частные схемы и модели, построенные по нескольким признакам.

Визуальное сопоставление данных на экране компьютера — наиболее быстрый и простой способ комплексного анализа и выполняется с помощью любой векторной ГИС. Последовательное наложение векторных слоев позволяет выявить наиболее общие закономерности размещения полезных ископаемых, проследить выраженность прогнозируемых объектов во всех анализируемых слоях. Выявленные новые характеристики объектов, отличающиеся от концептуальных или уточняющие их, включаются в базы данных и знаний.

Чтобы оценить структуру и взаимосвязимость используемых данных, их роль в отражении разноранговых геологических объектов, а также определить признаки для формирования прогнозных моделей используются методы анализа многомерных данных (корреляционный, факторный, классификация, регрессионный).

По результатам комплексного анализа МДЗ и геолого-геофизических данных на участке Олений построена итоговая схема прогноза нефтегазоносности (рис. 5). На ней показаны участки с максимальными и средними перспективами нефтегазоносности по отложениям нижнего девона, граница выклинивания отложений нижнего девона на основании обработки геоиндикаторов, основные линеаменты-разрывы, а также местоположение предполагаемых позднедевонских рифов. Следует отметить, что все скважины, которые дали притоки нефти, попали в контур, ограниченный дуговыми структурными линиями, выделяемыми на основании линеamentного анализа. Пустые скв. 4 и 6 расположены в зоне разрывного нарушения северо-восточного простирания, на участках его пересечения с северо-западными разрывами.

Разработанная технология может быть использована для изучения нефтегазоносных бассейнов, характеризующихся аналогичными ландшафтными и геологическими условиями, при составлении Государственной геологической карты масштабов 1:1 000 000 и 1:200 000 и других видах геологических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гололобов Ю.Н., Прищепа О.М., Смирнова И.О., Русанова А.А. Вещественно-структурные неоднородности приповерхностных и глубинных горизонтов Хорейверской впадины ТПП на основе материалов космических съемок // Докл. 2-й международной конференции: Поиски, разведка и добыча нефти и газа в Тимано-Печорском бассейне и Баренцевом море, 24-28 июня 1996 г. С.-Пб., 1996. Т. 2. С. 64—67.
2. Гололобов Ю.Н., Смирнова И.О., Русанова А.А. Обработка и анализ материалов дистанционных съемок на базе ГИС при прогнозе нефтегазоносности субарктических районов Рос-

сии // Общ. и регион. геол., геол. морей и океанов, геол. карт.: Экспресс-информация. М., 1994. Вып. 10. С. 1—12.

3. Гололобов Ю.Н., Смирнова И.О. Материалы космических съемок в ГИС-технологии изучения тектонических критериев нефтегазоносности субарктических районов России // Исследование Земли из космоса. 1995. № 2. С. 80—87.
4. Astakhov V., Svendsen J., Matiouchkov A. et al. Marginal formation of the last Kara and Barents ice sheets in northern European Russia // Boreas. 1999. Vol. 28. № 1. P. 23—46.
5. Smirnova I., Gololobov Y. Evaluation of JERS-1 data for the study of landscape changes related to the influence of gaseous hydrocarbon migrating upwards from pools as a results of tectonic and anthropogenic processes. Part 1 — Amudariya syncline, part 2 — Timan-Pechora // Final report of JERS-1/ ERS-1 System verification program. MITI-NASDA. 1995. Vol. 1. P. 283—306.
6. Smirnova I., Rusanova A. Application of Remotely Sensed Data for Petroleum Exploration at Subarctic Areas of Russia // Proceeding of the 11th Thematic Conference: Geologic Remote Sensing, Practical Solution for Real World Problems. Las Vegas, Nevada, USA. 1996. Vol. 1. P. 585—599.

УДК 528.8 (210.5)

© Коллектив авторов, 1999

Синергетический подход к использованию аэрокосмической информации для изучения прибрежных зон

И.А. БЫЧКОВА, С.В. ВИКТОРОВ, Е.И. КИЛЬДЮШЕВСКИЙ, Л.Л. СУХАЧЕВА

В дистанционном зондировании под синергизмом подразумевается эффект нелинейного увеличения количества извлекаемой полезной информации при совместной обработке различных данных, когда совокупная информация оказывается значительнее, чем простая сумма знаний, содержащихся в отдельных блоках собранной информации.

В лаборатории изучения береговых зон (ЛИБЗ) ВНИИКАМ синергетический подход используется для решения задач, связанных с комплексным изучением и картированием береговых зон морей России.

Анализ спутниковой информации показывает, что существует несколько возможных направлений применения принципа синергизма в изучении береговых зон. Отметим некоторые из них.

Синергизм при использовании синхронных спутниковых изображений морской поверхности в видимом и ИК-диапазонах спектра в целях идентификации природных процессов.

Так, на рис. 1, а дано изображение восточного побережья Балтийского моря в ИК-диапазоне спектра. Анализ гидрометеорологической обстановки подтверждает факт выхода в этот период холодных глубинных вод (явление апвеллинга) у побережья близ Ристны, Вентспилса, Дирхамы, зарегистрированный по ИК-снимку. Апвеллинговые воды характеризуются более высокой прозрачностью по сравнению с водами поверхностного слоя моря, что позволяет на синхронном снимке видимого диапазона (см. рис. 1, б) также выделить зоны апвеллинга (окрашены в светлые тона). Совместное использование синхронных данных в видимом и ИК-диапазонах спектра позволяет однозначно идентифицировать апвеллинговые зоны даже в отсутствие гидрометеорологической информации и избежать возможных ошибок при дешифрировании (например, ложной гипотезы о разгрузке термальных вод и пр.).

Синергизм при использовании квазисинхронных спутниковых изображений морской поверхности, полученных с различных ИСЗ с аппаратуры с существенно различным пространственным разрешением в видимом и ИК-диапазонах спектра в целях идентификации природных процессов.

Так, например, анализ многоспектрального изображения восточного побережья Ладоги, полученного с ИСЗ «Ресурс-01», МСУ-Э 8 августа 1997 г., позволяет идентифицировать к западу от Свирской губы выход к поверхности прозрачных вод, обычно не регистрируе-

мых в этом регионе. Сопоставление этой информации с данными ИК-канала ИСЗ НОАА показывает, что в этот период (в течение декады) в указанном районе отмечалась ярко выраженная аномалия в поле температуры поверхности воды, связанная с апвеллингом, что обусловило аномалию и в поле яркости воды. Таким образом, спутниковая информация высокого разрешения (40 м, МСУ-Э) существенно дополняется информацией с аппаратуры более низкого разрешения (1 км, AVHRR) и позволяет более надежно идентифицировать названное природное явление.

Результаты использования аналогичного подхода для идентификации по спутниковым данным оптического диапазона апвеллинговых ситуаций в восточной части Финского залива и случаев проникновения в Невскую губу солоноватых вод залива представлены также в работе [5].

Синергизм при использовании изображений, полученных в одинаковых или близких спектральных каналах с различным пространственным разрешением.

Используя только изображение южной части Ладожского озера, полученное летом 1997 г. с ИСЗ «Ресурс-01», МСУ-СК (разрешение 170 м), достаточно сложно определить, чем обусловлена зона повышенной яркости в районе устья р. Назия (эта зона равномерно охватывает всю западную часть бухты); нельзя также сделать однозначное заключение о длине и конфигурации косы Кареджи. На синхронном снимке МСУ-Э (тот же спутник) хорошо видны р. Назия и шлейф мутных вод, исходящий от ее устья. Коса Кареджи может быть картирована с достаточной степенью точности. МСУ-СК, обладая более низким пространственным разрешением, имеет однако большую полосу захвата, что обеспечивает возможность исследования большей площади озера и более частое получение информации по интересующему объекту. Поэтому, комбинируя два вида информации, можно корректировать данные МСУ-СК с помощью данных МСУ-Э.

Синергизм при использовании разновременных изображений, полученных в одинаковых или близких спектральных каналах с различным пространственным разрешением в разные сезоны года.

Геоэкологическая информация по району южной части Лемболовского озера и оз. Ройка (аппаратура ИСЗ SPOT, разрешение 20 м, ближний ИК-диапазон), полученная в конце августа 1996 г. [1], может быть существенно дополнена при использовании снимка

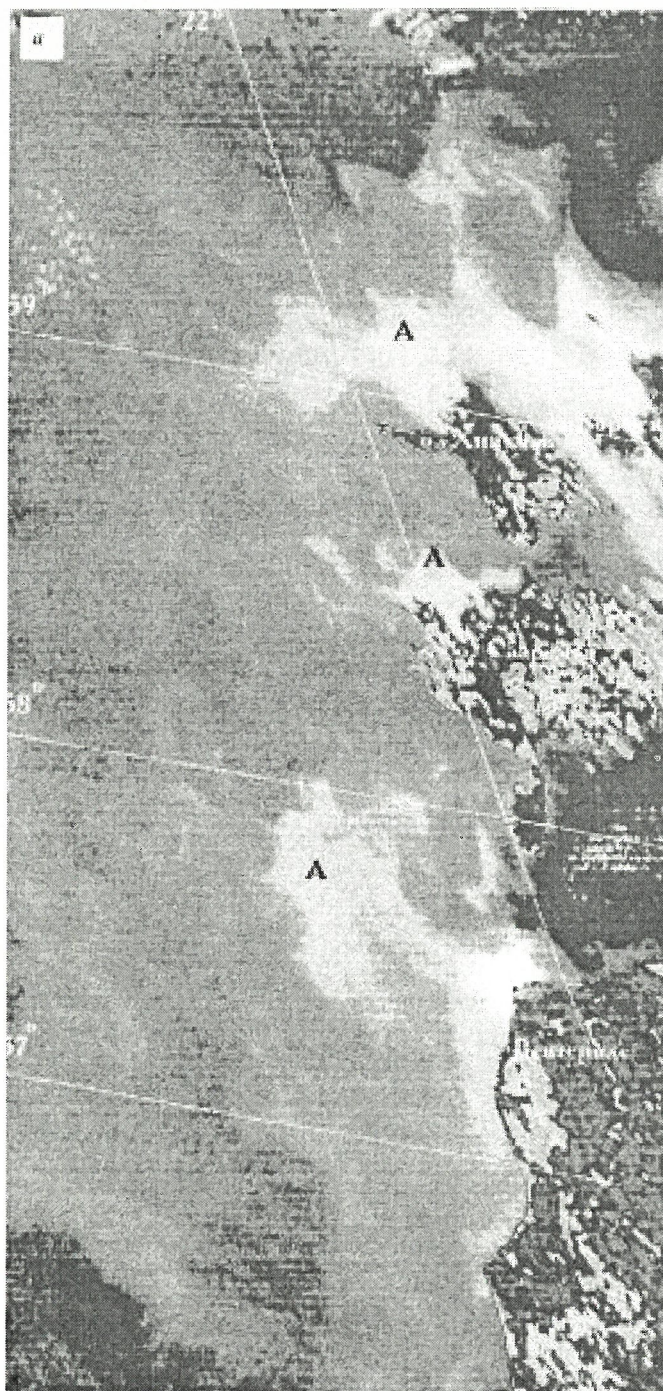


Рис. 1. Выход арвеллинговых вод А у восточного побережья Балтийского моря, по данным ИСЗ «Ресурс-01»:

а — изображение в ИК-диапазоне; б — изображение в видимом диапазоне спектра

того же района с ИСЗ ADEOS (аппаратура AVNIR, разрешение 16 м, ближний ИК-диапазон), сделанному в начале мая 1997 г. В весенний период, когда выполнялась съемка с ADEOS, леса еще не полностью покрыты листвой, а травяной покров уже сформировался; при этом границы отдельных элементов ландшафта, таких как болота, луга, обрисовываются более четко, чем в осенний период. Так, на изображении с AVNIR границы болота Большое близ урочища Рогоссары обрисовываются очень четко, в то время как на изображении с ИСЗ SPOT часть этого болота, покрытая редколесьем, близка по яркости к элементам садоводческих массивов.

Синергетический подход позволяет решать конкретные задачи исследования береговых зон. Среди таких задач можно, например, выделить: изменение береговой линии; динамические явления на поверхности и в

толще прибрежных вод; простирающие ландшафтные элементы суши в область, занятую водным объектом; геолого-ландшафтное изучение прибрежных зон; изменение антропогенного ландшафта прибрежных зон.

В настоящей статье будут рассмотрены две из выше-названных задач: изменение антропогенного ландшафта прибрежных зон на примере Приморского района Санкт-Петербурга; изменение береговой линии на примере юго-восточного побережья Балтийского моря.

1. Изменчивость антропогенного ландшафта Приморского района Санкт-Петербурга по данным многозональных спутниковых изображений высокого разрешения. Рассмотрим использование синергетического подхода для анализа изменчивости береговой зоны Невской губы в Приморском районе Санкт-Петербурга. В качестве приоритетной задачи в оценке изменчивости береговой зоны будем считать исследование изменчивости ан-

тропогенного ландшафта в регионе. Временные рамки работы (1981—1998 гг.) были ограничены первым спутниковым снимком удовлетворительного качества, имеющимся для этого района в архиве ЛИБЗ. В итоге просмотра архивных материалов оказалось возможным использовать для работы многозональные спутниковые изображения высокого пространственного разрешения 20—40 м за 1981—1998 гг., а именно: данные с ИСЗ Ресурс-Ф (КАТЭ-200), Космос-1939, Ресурс-О (МСУ-Э и МСУ-СК) и с ИСЗ SPOT. Космические изображения обрабатывались на ПЭВМ с использованием современного математического обеспечения, в т.ч. ГИС-технологий. Дешифрирование и интерпретация данных дистанционного зондирования проводились с использованием различных картографических материалов, гидрометеорологических данных и материалов натурных экспедиционных исследований. Карта-схема современного антропогенного ландшафта Приморского района Санкт-Петербурга, полученная на основе спутникового зондирования, представлена на рис. 2.

Антропогенная нагрузка региона формируется под влиянием различных факторов. Для минимизации их отрицательного воздействия на окружающую природную среду и обеспечения устойчивого развития исследуемого региона необходимы соответствующие региональные базы данных и знаний, постоянно пополняющиеся и обновляющиеся в результате всестороннего анализа материалов комплексного мониторинга. Рассмотрим наиболее важные антропогенные факторы.

Деятельность промышленных предприятий, осуществляющих выбросы в водную, воздушную среду, либо непосредственно загрязняющих прилегающую территорию. Спутниковые наблюдения позволяют следить за крупными изменениями производственных площадей (расширение производства, строительство новых предприятий), развитием инфраструктуры (строительство подъездных путей и пр.). За изучаемый период в береговой зоне в Приморском районе из крупных промышленных объектов появились портовые сооружения у ст. Горская, введены в строй Северная Станция Аэрации (ССА) и отстойники иловых вод, строится Северо-Западная ТЭЦ в нескольких километрах от западной границы Юнтоловского заказника. С 1992 г. на спутниковых изображениях прибрежной акватории в районе Лисьего Носа идентифицируются насыпные дамбы (длиной 1,5—2 км), появившиеся в результате несанкционированного строительства подходного канала. Вблизи этих дамб постоянно регистрируются повышенные концентрации взвешенных осадков, загрязняющие прибрежную территорию. Зимой по структуре аномалий ледового покрова (наличие полыньи, более тонкий лед) можно контролировать тепловые выбросы промпредприятий в акваторию Невской губы; например, регистрировать полынью у о. Белый, где расположены очистные сооружения и завод по переработке мусора.

Появление ТЭЦ вблизи заповедной природной зоны вызывает особое беспокойство в связи с тем, что, как известно, негативное влияние пылегазовых эмиссий ГЭС прослеживается на расстоянии 30—50 км, а иногда и до 100 км от источника загрязнения (как это наблюдается по отношению к эстонским ГРЭС, являющимся основным источником загрязнения лесов в Кингисеппском районе Ленинградской области). Спутниковый мониторинг лесов позволяет оценивать вегетационный индекс и контролировать тем самым состояние лесных массивов; в том же Кингисеппском районе, например, для площади лесов 1050 км² вегетационный индекс уже ниже нормы [2]. Для Юнтоловского заказника географическое положение ТЭЦ особо невыгодно, т.к. при доминирующих в Санкт-Петербурге ветрах западных направлений соответственно увеличивается и процент дней с неблагоприятным для заказника направлением эмиссии.

Интенсивное жилищное строительство, в ходе которого ландшафт преобразуется коренным образом, уничтожаются леса, болота, а появляются жилые массивы с сетью дорог, коммуникаций, разбиваются

парки. Спутниковая съемка позволяет оценить, какой процент площади района занят зелеными насаждениями, какие прослеживаются тенденции в озеленении. За рассматриваемый период появился новый жилой массив на намывных территориях в районе Приморского шоссе и западнее оз. Долгое. Непосредственно на берегу Финского залива, сразу за Приморским шоссе разбит новый парк, посвященный 300-летию города. Пока, правда, как это следует из спутникового снимка, насаждения древесных пород в парке еще очень молодые и не обеспечивают в полной мере заложенные рекреационные возможности (об этом говорит большая яркость территории парка на снимке в оптическом диапазоне, примерно сравнимая с таковой прибрежного пляжа).

Функционирование железных дорог, являющихся, как известно, источником повышенной экологической опасности, связанной с возможными транспортными авариями и перевозкой опасных грузов. Непосредственно в зоне влияния железных дорог (несколько сотен метров) экологические характеристики среды резко ухудшены, такие территории несут большую антропогенную нагрузку. За период наблюдения в районе появилось новое ответвление от магистрального железнодорожного пути — линия на ст. Горская, которая используется для транспортировки грузов с портовых причалов.

Развитие сельскохозяйственного производства. На территории района находятся поля совхоза Пригородный. Удобрения, вносимые на поля, попадают в дренажные канавы, имеющие сток в р. Каменка, в свою очередь впадающую в Лахтинский разлив — в результате интенсифицируются процессы эвтрофирования прибрежных вод. За истекшие годы, ввиду ухудшения экономической ситуации в стране в целом, резко сократилось внесение удобрений на поля, что (при прочих сравнимых условиях) должно способствовать улучшению экологического состояния внутренних водоемов района и береговой зоны Невской губы. На основе спутниковых наблюдений в конце 90-х годов отмечается некоторое снижение масштабов «цветения» внутренних водоемов по сравнению с 80-ми годами.

Промышленные свалки, привлекающие в последнее время особое внимание экологов в связи с их неблагоприятным воздействием на природную среду и здоровье населения. Для Приморского района свалки представляют особую проблему в связи с их многочисленностью. Обилие свалок, находящихся на его территории или в непосредственной близости от границ, обусловлено окраинным положением района. Многие годы большая часть нынешнего Приморского района располагалась за городской чертой, и сюда свозили промышленные и бытовые городские отходы. Теперь на месте бывших свалок возводятся новые жилые массивы. Свалки приходится ликвидировать, однако при их рекультивации возникают новые проблемы. Так, при ликвидации Стародеревенской свалки была сооружена специальная технологическая грунтовая дорога для перевозки этой свалки на нынешнюю городскую свалку, расположенную близ северной границы района (см. рис. 2). Однако некоторые водители мусоровозов вываливали груз еще на полпути, в результате теперь вся эта дорога превратилась в протяженную свалку [3]. Ныне на космических снимках эта дорога вследствие перманентной свалки по обочинам имеет значительно большую яркость даже по сравнению с автострадами типа Приморского шоссе. Возникают и новые стихийные неконтролируемые свалки, например, на западном берегу Лахтинского разлива имеется крупная несанкционированная свалка строительного мусора и пр., хорошо различимая на спутниковом снимке, крупная свалка идентифицируется по спутниковым изображениям и у западной границы Юнтоловского заказника в районе Конной Лахты (см. рис. 2). Спутниковые данные позволяют уточнить площадь территории, занятой свалкой.

Неконтролируемые свалки зачастую содержат ядови-

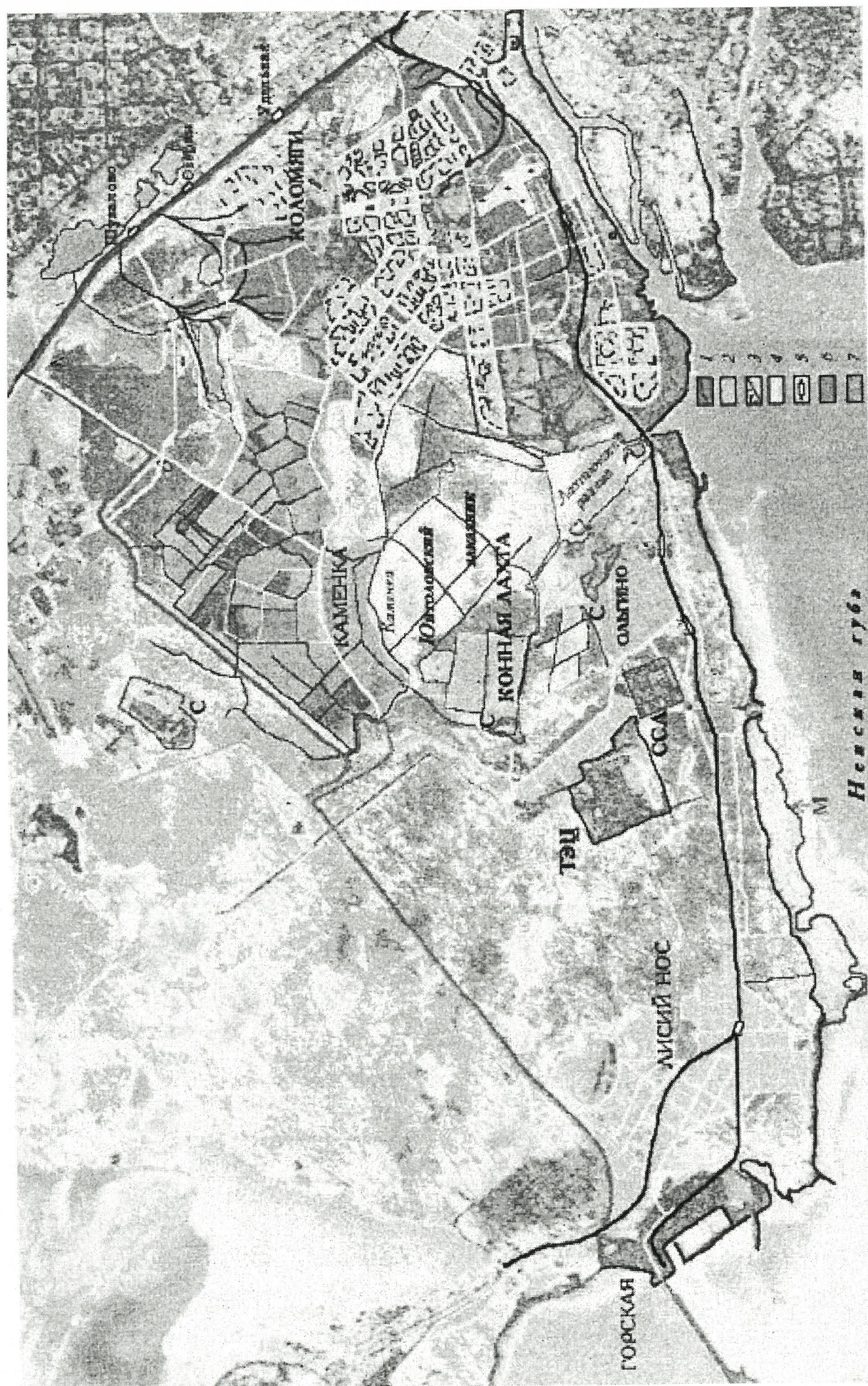


Рис. 2. Антропогенный ландшафт Приморского района Санкт-Петербурга, по спутниковым данным 1990-х гг.:

М — макрофиты; С — свалки; 1 — мелкие реки и каналы; 2 — поселки сельского типа; 3 — городская застройка; 4 — улицы; 5 — железнодорожные станции; 6 — промышленные зоны; 7 — леса

тые вещества либо случайный набор веществ, попадающих на свалку, приводит к образованию в воде, почве, воздухе опасных веществ, которые могут быть намного токсичнее, чем каждое из веществ в отдельности. Собственно, и контролируемая свалка вблизи границ района (в зоне водосбора Лахтинского разлива, см. рис. 2) является источником повышенной экологической опасности для жителей, поскольку, во-первых, ядовитые вещества со сточковыми водами попадают в каналы, мелкие речки, впадающие затем в Лахтинский разлив, а во-вторых, ядовитые вещества со свалки загрязняют почву на полях близлежащего совхоза Пригородный (также входящего в границы района, см. рис. 2). Важно провести исследование всех неконтролируемых свалок, с тем, чтобы определить, какие из них являются особо опасными для здоровья населения, и наметить первоочередные свалки для рекультивации.

Как уже упоминалось, в районе имеется особо охраняемый объект — Юнтоловский заказник, на болотистой территории которого гнездятся перелетные птицы. Спутниковые наблюдения позволяют контролировать хозяйственную деятельность на территории этого объекта — выявлять самовольные вырубки лесов, сооружение дренажных канав, самозахват земель под строительство и прочие виды незаконной деятельности, если таковые будут иметь место.

Спутниковые материалы позволяют следить за процессами, связанными с эвтрофированием водоемов, например, исследовать динамику развития макрофитов. Тем самым имеется возможность извлечения информации, необходимой для контроля за Беломорско-Балтийским миграционным путем многих видов перелетных птиц, для которых макрофиты — важная кормовая база. Так, известно, что непосредственно к береговой черте Невской губы в Приморском районе (у о. Верперлуда) примыкает мелководная зона, занятая макрофитами (см. рис. 2). В последние годы, в связи с большими объемами грунтонамывных работ исчезли привычные для птиц стоянки в устье Невы; птицам пришлось переориентироваться на другие места стоянок, в частности на мелководье у о. Верперлуда. Возможно, в будущем придется думать о создании режима особо охраняемой зоны и для этой территории. Спутниковые снимки могут здесь быть полезными при определении мест возможных кормовых стоянок птиц и оценки их продуктивности [4]. Как это следует из спутниковых снимков, площадь зоны макрофитов год от года не постоянна, изменяясь под влиянием различных природных и, возможно, антропогенных факторов.

2. Изучение динамики береговой зоны. Береговая зона — один из наиболее динамичных объектов земной поверхности. Причин для этого может быть много: эвстатические колебания уровня океана, неотектонические поднятия (опускания) тех или иных участков побережья, сейсмогенные, вулканогенные или антропогенные нарушения и др. Но во всех этих случаях происходит или отступление (размыв), или наращивание (аккумуляция) берега. Процесс этот в большинстве случаев достаточно медленный и неявный. Но установление направления и скорости изменения того или иного участка побережья часто очень важно, особенно при сооружении в зоне побережья крупных объектов, рассчитанных на длительный срок эксплуатации. Таким образом, хозяйственное освоение того или иного участка побережья нужно начинать с изучения динамики его береговой зоны. И затем, уже в процессе эксплуатации, регулярно проводить контрольные наблюдения за ходом процесса.

Наиболее простой, точный и быстрый способ изучения динамики береговой зоны — сравнительное дешифрирование материалов крупномасштабной аэрофотосъемки разных лет, желательнее за возможно больший период времени. Снимки позволяют быстро, на значительной территории и с большой точностью выявлять участки абразии (активные клифы, размыв и взмучивание рыхлых отложений) и аккумуляции (со-

временные террасы, пляжи, косы, бары, песчаные отмели и т.д.).

Изображения абразионных и аккумулятивных участков побережья на плановых АФС настолько характерны, что методика их выделения не требует каких-либо особых пояснений. Следует лишь отметить, что такое выделение предпочтительнее проводить по материалам специализированной аэрофотосъемки морского дна (с захватом прибрежной суши), т.к. по этим снимкам можно точнее определить характер преобладающего на данном участке подводного берегового склона процесса. Очень наглядны также перспективные АФС побережья, на которых четко видны активные и отмершие клифы, бенчи, аккумулятивные террасы, береговые и надводные валы.

Большое значение материалы дистанционного зондирования имеют для оперативного исследования изменений береговой зоны в результате сильных штормов и ураганов, поскольку часть этих изменений обратима и через некоторое время нивелируется, вследствие чего может быть не отмечена при обычных, наземных исследованиях. Однако как временные, так и постоянные послештормовые изменения могут быть столь значительны, что их учет при всех видах хозяйственного освоения побережий обязателен. Тем более, что такие явления периодичны и через какое-то время неизбежно повторяются.

При такого рода оперативных исследованиях очень важно четко определить границы раздела вода — суша. На снимках, снятых в широкой спектральной полосе, эта граница читается плохо, и здесь возможны существенные ошибки. Наиболее четко граница вода — суша отображается на РЛ- и спектрозональных (ближняя ИК-зона) снимках. В последнем случае удобны сканерные КС, возможно, более высокого разрешения (МСУ-Э, SPOT).

Развитие побережья в значительной степени зависит от количества, характера и направления перемещения рыхлых наносов в пределах надводного берегового склона. Этот фактор обуславливает возникновение и исчезновение пляжей, кос, береговых и надводных валов, баров и т.д. и предопределяет тем самым условия судоходства, эксплуатации портов и береговых сооружений, водозаборов, трубопроводов и т.д.

Перемещение наносов зачастую носит довольно непостоянный характер, т.к. определяется в каждый конкретный момент направлением ветра и волн и их силой. В общем, выделяют два основных типа перемещения наносов относительно линии берега: продольное и поперечное. И результирующая их сложения за год обычно имеет достаточно устойчивый характер, т.к. природные условия на каждом конкретном побережье (ветро-волновые условия, преобладающие течения, общая конфигурация побережья, ледовые условия) изменяются медленно. Это дает возможность прогнозировать характер динамики береговой зоны на будущее, выяснив направленность и скорость изменений в ретроспективе. Характер же перемещения наносов на конкретный момент аэрофотосъемки, расположение участков размыва и аккумуляции определяются достаточно точно по форме и расположению подводных валов, выступам коренных пород, валунным отмосткам и тому подобным маркерам, различимым на снимках. В качестве примера изучения береговой зоны с применением детального дешифрирования АФС морского дна и их ретроспективным анализом приведем участок западного побережья Самбийского полуострова на Балтийском море: Мечниково — мыс Таран (рис. 3). В качестве исходного материала использовались крупномасштабные (1:5000—1:20 000) аэрофотоснимки морского дна, выполненные в 1961, 1963 и 1992 гг. При анализе использовался также космический снимок аппаратуры КФА 1000 (масштаб около 1:250 000). Все материалы дистанционных съемок получены в один и тот же период года: в конце лета, что позволило не учитывать влияние сезонных колебаний береговой черты. Отдешифрированные снимки монтировались в

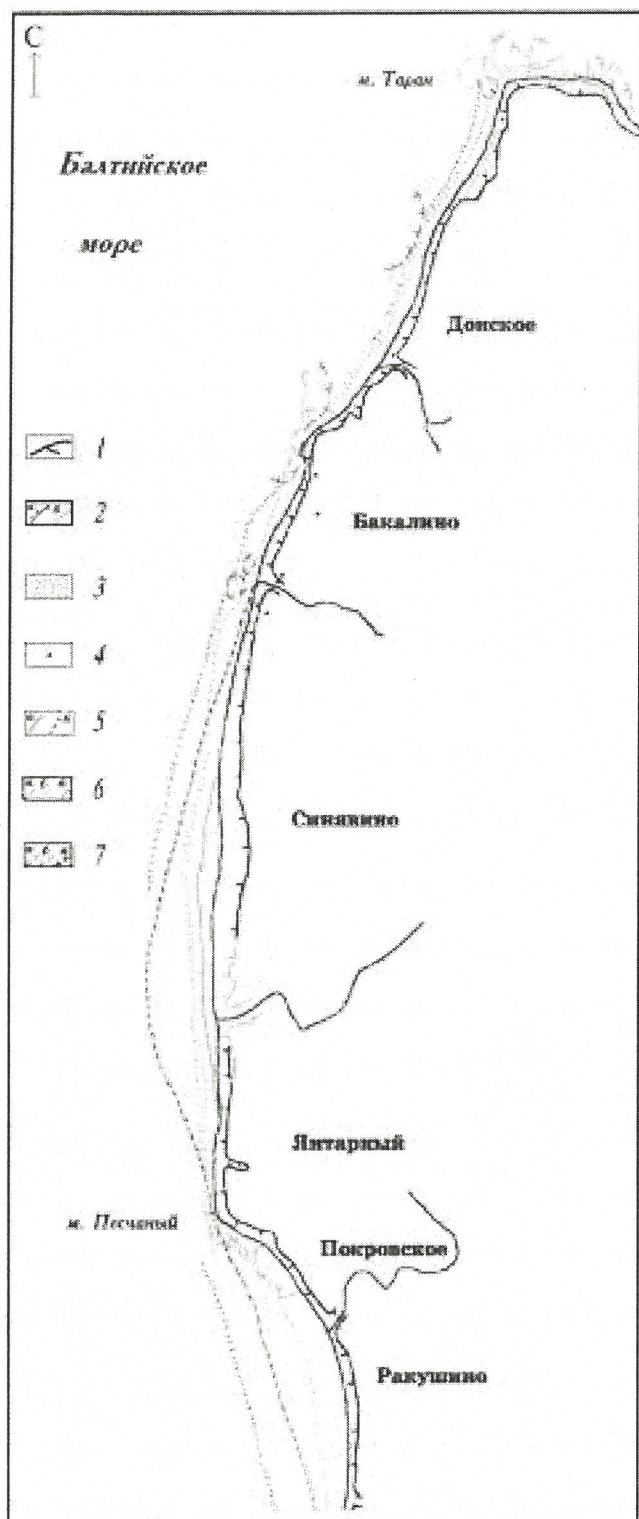


Рис. 3. Схема динамики береговой зоны Самбийского полуострова: 1 — береговая линия и реки по топокарте 1965 г.; 2 — бровка высокой террасы по топокарте 1965 г. (а) и по АФС 1961 г. (б); 3 — оползни по АФС 1961 и 1963 гг.; 4 — точки замеров положения элементов береговой зоны по идентичным деталям ландшафта на АФС 1963 и 1992 гг.; 5 — положение береговой линии по АФС 1961 г. (а) и 1992 г. (б); 6 — положение внешней границы зоны песчаных валов по АФС 1961 (а), 1963 (б), 1992 гг. (в); 7 — пятна валунной отмостки с водорослевым покровом по АФС 1961 (а), 1963 (б), 1992 гг. (в)

единые схемы, которые затем сравнивались между собой для выявления изменений, происшедших в каждом конкретном месте. Для этого на снимках отыскивались объекты, единые для обоих снимков.

Анализ вышеперечисленных материалов позволил сделать выводы о характере изменения береговой зоны в рассматриваемой области в 1961—1992 гг.

В начале 60-х годов подводный склон в южной части участка целиком был сложен песчаными отложениями с сериями подводных песчаных валов в прибрежной полосе подводного склона шириной 200—300 м (примерно до изобаты 5 м). Из этого следует, что дно в этой полосе сложено мелкозернистыми сортированными песками с крупностью зерна 0,1—0,5 мм. Структура системы валов, явные признаки разрывных течений, мезорельеф линии уреза воды свидетельствуют о преобладании здесь поперечного перемещения наносов. Отсутствие линейных валов говорит о том, что происходит размыв берегов и вынос обломочного материала на глубину; этот факт подтверждается сравнительно небольшой шириной пляжа и признаками размыва берегового обрыва.

В средней части участка береговая линия неровная. В районах мысов на дне прослеживаются довольно обширные водорослевые поля, свидетельствующие о наличии здесь валунной отмостки. На мысах наблюдаются очень узкий пляж и активный клиф. Здесь также зона размыва.

Севернее мыса Песчаный строение побережья меняется под воздействием сбросов в море отработанной пульпы янтарного комбината. Здесь в прибойную зону попадает большое количество обломочного материала, песчаная фракция которого наращивает берег в месте сброса и подпитывает вдольбереговой поток наносов, а глинистая фракция формирует обширную зону с большим количеством взвеси.

Севернее п. Синявино влияние комбината практически не заметно, а строение берега обусловлено в основном берегоформирующими факторами. Для районов мысов характерны активный клиф, узкий пляж. Подводные песчаные валы фрагментарны. Присутствуют все признаки зоны размыва.

В южной и центральной частях рассматриваемой области по строению подводных валов и форме линии уреза воды можно сделать вывод о преобладании в приурезовой и в зоне первого подводного вала вдольберегового перемещения наносов, направленного на юг. По имеющимся фрагментам второго и третьего валов (имеющих прямолинейные очертания) можно сделать вывод, что здесь также есть вдольбереговое перемещение наносов, но направлено оно уже на север. Таким образом, в приурезовой зоне наносы перемещаются, в общем, на юг, а в мористой части береговой зоны — на север.

В 1992 г. по сравнению с 60-ми годами произошли существенные изменения. Менее всего они затронули южную часть района, где по-прежнему продолжался размыв берега. Однако, судя по появлению здесь протяженных валов второй линии, которых не было в 1963 г., запасы песчаного материала стали больше и скорость размыва побережья уменьшилась.

Значительные изменения произошли на участке от урочища Осетрово до мыса Песчаный. В 1963 г. здесь также наблюдались явные признаки размыва, а в 1992 г. появились хорошо выраженные линейные валы второй и даже третьей линии, исчезли водорослевые поля в районе мыса Песчаный. Линия уреза воды сильно выдвинулась в сторону с соответствующим увеличением пляжа (см. рис. 3). Таким образом, размыв берега здесь полностью прекратился и началась интенсивная аккумуляция. Участок берега в районе пос. Янтарный также продолжал выдвигаться в сторону моря, что было отмечено еще по снимкам 1961 г.

В северной части района характер развития берега сохранился, размыв берега продолжился. Направления перемещения наносов в 1992 г. были, в общем, те же, что и в 1963 г. Наряду с признаками наличия разрыв-

ных течений и поперечного перемещения наносов в прибойной и в зоне первого вала на всем участке фиксируется продольное перемещение с севера на юг. В зоне второго и третьего валов признаков направления перемещения меньше, но имеющиеся показывают на перемещение с юга на север, т.е. наблюдаемая картина аналогична ситуации 1963 г.

Таким образом, за 1961—1992 гг. данный район претерпел существенные изменения, выразившиеся в спрямлении береговой линии за счет усиленной аккумуляции песчаных наносов, главным источником которых стали сбросы пульпы янтарного комбината. Следствием этого явилось то, что размывавшиеся ранее участки в центре района превратились в зону аккумуляции; в северной и южной частях района, где размыв продолжается, можно ожидать снижения скорости и интенсивности размыва — об этом свидетельствует выдвигание уреза воды в сторону моря во многих пунктах. Однако, если проанализировать положение тылового шва пляжа, то станет очевидно, что во многих точках северной и южной частей участка он продолжал отступать, т.е. происходил размыв подножия клифа. Особенно сильно это проявилось в центре вогнутых участков побережья.

В случае продолжения деятельности янтарного комбината, учитывая преобладающее направление потока наносов в приустьевой зоне, можно ожидать дальнейшего продвижения участка нарастающего берега к югу и полного прекращения здесь размыва побережья.

Полученные таким образом результаты показывают, что имеющиеся на данный момент топографические карты этого участка в части береговой зоны уже совершенно не соответствуют действительности и требуют пересоставления, т.к. местами береговая линия отошла от положения, зафиксированного на картах, на 500—600 м.

Подобного рода детальные исследования со специализированной аэрофотосъемкой имеет смысл прово-

дить во всех районах побережий, активно осваиваемых в хозяйственном плане либо намечаемых к такому освоению. Для оценки же более обширных районов при проведении мелкомасштабных исследований материалы аэрофотосъемки могут быть заменены космическими снимками.

В заключение отметим, что стоящие перед геологами и промысловиками задачи поиска и освоения природных ресурсов морского шельфа потребуют значительного расширения работ по геоэкологическому мониторингу прибрежных зон. Трудно переоценить роль методов дистанционного зондирования в комплексе этих работ. В этом контексте, при существующих ограничениях на номенклатуру и регулярность получения данных с отечественных ИСЗ, особое значение приобретает использование синергетического подхода к анализу информационного содержания спутниковых изображений прибрежных зон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бычкова И. А., Викторов С. В., Сухачева Л. Л. Аэрокосмический мониторинг водных ресурсов Санкт-Петербурга и Ленинградской области // Разведка и охрана недр. 1998. № 7—8. С. 42—44.
2. Гольцова Н. Н., Питулько В. Исследование в системе международных программ экологического мониторинга стран Северной Европы // Инженерная геология. 1996. № 3. С. 62—79.
3. Заказник Юнтоловский. Управление по охране окружающей среды Администрации Санкт-Петербурга. 1997.
4. Bekman J. H., van Eerden M. R. et. al. Landsat satellite images for detection of submerged macrophytes // In search of potential stop-over feeding sites for Bewick's swans (*Cygnus columbianus bewickii*) along their migratory route. Pt. 1: / Int. Conf. Habitat Mng. And Wise Use Ducks, Geese and Swans «Anatidae 2000», Strasbourg, Dec. 5-9 1994 // Gibier faune sauvage. 1996. 13. № 2. P. 421—450.
5. Sukhacheva L. L. Multiscale Space—Time Variability of the Distribution of the Fields of Suspended Matter in the Eastern Part of the Gulf of Finland Based on Data from Aerospace Observations over Several Years // Earth Observation Remote Sensing. 1997. Vol. 14. P. 793—804.

УДК 528.8.044.2.[550.8:528.94]:553

© А.А. Русанова, М.Ю. Смирнов, О.М. Пупков, 1999

Использование цифровых аэро- и космических радиолокационных снимков при структурно-геологических исследованиях Сортавальско-Питкярантской зоны поднятий

А.А. РУСАНОВА, М.Ю. СМИРНОВ (ВНИИКАМ), О.М. ПУПКОВ (СПбГУ)

Появление в последние годы цифровых радиолокационных снимков, полученных космическими (АЛМАЗ, ERS-1,2, JERS-1, RADARSAT) и самолетными (РАЗРЕЗ) радарными с синтезированной апертурой, работающими в различных диапазонах длин волн, с различными поляризациями, углами визирования и высоким пространственным разрешением на местности, даже при съемках из космоса открывает новые возможности при доизучении геологического строения территорий. Независимость результатов РЛ-съемки от метеоусловий позволяет эффективно использовать ее в северных регионах, где применение материалов дистанционного зондирования (МДЗ) видимого и ближнего ИК-диапазонов часто затруднено из-за сплошной облачности.

Во ВНИИКАМ на примере южной части Балтийского щита разрабатывались методические приемы компьютерной обработки и анализа цифровых радиолокационных данных нового поколения для изучения геологических структур докембрия и выяснения особенностей их формирования.

Исследуемая территория расположена на северном побережье Ладожского озера, в зоне умеренно-континентального климата и представляет собой грядово-холмистую, лесисто-болотистую местность с густой сетью озер и рек (подзона средней тайги). Преобладающая высота холмов 80—120 м. Вершины холмов слабо-выпуклые, плоские. Склоны преимущественно крутые,

иногда обрывистые. Большая часть территории покрыта лесами.

Район расположен в области развития карелид свекофенской складчатой области и приурочен к Сортавальско-Питкярантской зоне поднятий Ладожского синклинария [5]. В геологическом строении территории участвуют гранитоиды, мигматиты и амфиболиты, слогающие куполообразные овалы выступы архейского основания (купола), метаморфизованные осадочные и вулканогенные породы супракrustальных толщ обрамления (сортавальская и ладожская серии), интрузии основных и кислых пород раннего протерозоя, а также рифейские граниты рапакиви Салминского плутона. Купола имеют блоковое строение, обусловленное многоэтапной складчатостью и разрывной тектоникой северо-западного и северо-восточного направлений. Супракrustальные толщ нижнего протерозоя образуют зажатые между гранитоидными поднятиями и краем Карельского массива крутые синклинали преимущественно северо-западной ориентировки, осложненные складками более высоких рангов. Широко развиты четвертичные отложения различного генезиса, представленные песками, супесями, глинами, торфами, песчано-гравийно-галечным с валунами материалом. Мощности их до 10 м на гранитоидных куполах и 20—40 м и более в обрамляющих купола депрессиях.

Рельеф района представлен двумя типами: структурно-денудационным и аккумулятивным. Первый распространен главным образом в пределах куполов, где коренные породы выходят на поверхность. Второй развит на остальной части территории в понижениях между структурно-денудационными возвышенностями и грядами. Он представлен холмисто-моренным рельефом, озерно-ледниковыми и флювиогляциальными равнинами, часто заболоченными, а также морскими, речными и озерными террасами.

В ходе исследований использовались следующие МДЗ:

РЛ-изображение, полученное европейским космическим радаром ERS-1 с восходящей орбиты 06.04.93 г., длина волны 5,6 см, вертикальная поляризация, угол визирования 23° (рис. 1), теоретическое пространственное разрешение изображения — 30 м. Данные в цифровом виде были подготовлены и предоставлены нам профессором Парижского Университета (Paris VI) Жан-Полем Руданом при любезном разрешении руководителя программы ERS-1*;

космический снимок (КС), полученный российским спутником РЕСУРС-Ф, дата съемки 14.05.76 г., фотокамера КФА-1000, диапазон длин волн 0,68–0,81 мкм (рис. 2), пространственное разрешение 5–10 м;

материалы экспериментальной аэросъемки, проведенной НПО «Ленинец» и ИП «Интелл», радаром «Нить» (длина волны 2 см, горизонтальная (ГГ) и вертикальная (ВВ) поляризации) и «Разрез» (длина волны 290 см, ГГ поляризация) с синхронизированной цифровой записью сигнала и облучением (рис. 3). Съемка выполнялась 15.09.94 г. при облете территории с четырех сторон антеннами левого борта на высоте 3500 м. Направление полета север — юг. Угол визирования в центре полосы облучения около 75° [2];

цифровая модель рельефа, построенная в ходе исследования по топографическим картам масштаба 1:100 000 по методике ВНИИКАМ;

геологические, ландшафтные и другие данные, позволяющие охарактеризовать природные факторы, влияющие на формирование радиолокационного изображения в таежной зоне;

данные наземных маршрутных и профильных наблюдений.

Предварительная обработка РЛ-данных включает радиометрические и геометрические коррекции.

РЛ-изображениям, особенно полученным радаром с синтезированной апертурой, свойственны радиометрические искажения (пятнистость), присущие статистически однородным шероховатым поверхностям. Эти искажения называются спеклом (спекл-шумом) и обусловлены интерференцией электромагнитных волн, рассеянных отдельными отражателями шероховатой поверхности в пределах элемента разрешения радара. Свойства спекла зависят от характера облучаемой поверхности, степени ее шероховатости и параметров радара. При решении геологических задач спекл выступает в качестве мешающего фактора при визуальном или автоматическом анализе РЛ-изображений, затрудняющего распознавание и обнаружение объектов. К настоящему моменту разработаны многочисленные методы для уменьшения спекла, использующие различные алгоритмы пространственной фильтрации [3, 4]. Предварительная фильтрация спекла делает РЛ-изображения сопоставимыми с изображениями видимого и ближнего ИК-диапазонов и позволяет комплексировать эти данные. Разные сенсоры и природные условия снимаемых территорий создают различные модели спекла. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо подбирать наиболее подходящий фильтр и окно обработки.

В нашем случае аэро-РЛ-изображения (АРЛИ) сантиметрового диапазона обрабатывались осредняющим фильтром с окном 3×3 элемента, метрового диапазона

— сигма и медианным фильтрами с окном 5×5 элементов. Изображение ERS-1 — осредняющим фильтром с окном 5×5 элементов.

На АРЛИ сигналы от объектов дальней зоны выглядят часто темнее, чем объекты ближней зоны, что обусловлено более слабым сигналом от дальней по отношению к сенсору зоны. Этот недостаток может быть устранен с помощью регулировки средней яркости каждой строки изображения с помощью калибровочного коэффициента, равного отношению средней яркости всего изображения к средней яркости корректируемой строки. Когда изображения используются для качественной интерпретации, такой подход допустим для улучшения визуального восприятия информации.

Космические изображения ERS-1, передаваемые заказчику, обычно калиброваны, т.е. откорректированы поперечные изменения сигнала (потеря интенсивности сигнала по мере удаления от спутника) и изменения шели антенны в зависимости от угла визирования.

Геометрические искажения, обусловленные нестабильностью пространственного положения съемочной платформы, являются следствием нестабильности движения самолета по маршруту.

Формирование РЛ-изображения основано на наклонной дальности, т.е. на расстоянии между антенной и объектом на земной поверхности. Взаимосвязи между наклонной и горизонтальной поверхностями носят нелинейный характер. Это проявляется на изображениях эффектами «сжатия», «опрокидывания» и др. Перевод изображения из наклонной дальности в горизонтальную необходимо выполнять, если в дальнейшем намечена его географическая привязка или пространственное совмещение с данными оптического диапазона. После перевода изображения в формат горизонтальной дальности можно изменять размер пиксела для совмещения с другими данными. Данные космических систем, таких как ERS-1, предоставляют пользователям после геометрических коррекций и, по желанию, приведенные к определенной географической проекции (это определяется заказываемым уровнем обработки РЛ-данных).

Современные самолетные радары обычно оснащены оборудованием и программами, позволяющими фиксировать параметры полета и корректировать их на уровне цифровой записи. При отсутствии таких устройств в общем случае можно осуществить геометрические коррекции по опорным точкам с помощью программ, реализующих различные алгоритмы аппроксимации.

Нами были выполнены геометрические коррекции по опорным точкам с использованием созданной во ВНИИКАМ программы. Все снимки трансформировались в топографическую основу масштаба 1:200 000.

В ходе исследований применялись следующие методы анализа.

Визуальный анализ РЛ-данных. Экспертами проводился визуальный анализ подготовленных в ходе предобработки изображений. Дешифрирование осуществляется на экране компьютера и по изображениям, визуализированным с помощью принтера или системы FEAG. При этом оценивается в целом информативность различных РЛ-изображений в отношении отражения разноранговых геологических структур (по сравнению с изображениями оптического диапазона), а также особенности их отражения в зависимости от параметров РЛ-системы (длины волны, поляризации, угла визирования) и условий проведения съемки (направления визирования).

Автоматизированное выделение и обработка линейных элементов. Для объективизации процесса выделения линейных элементов изображения и, как следствие, более обоснованного определения информативности различных РЛ-изображений в отражении систем линейных элементов, развитых на данной территории, проводится автоматическое выделение линейных элементов с последующим построением схем их плотности и роз-диаграмм суммарной длины линейных элементов.

Для линейного анализа в автоматическом режи-

* Права на данные ERS-1 принадлежат Европейскому Космическому Агенству, предоставившему их нам в рамках программы тестирования эффективности многочастотных радиолокационных данных.

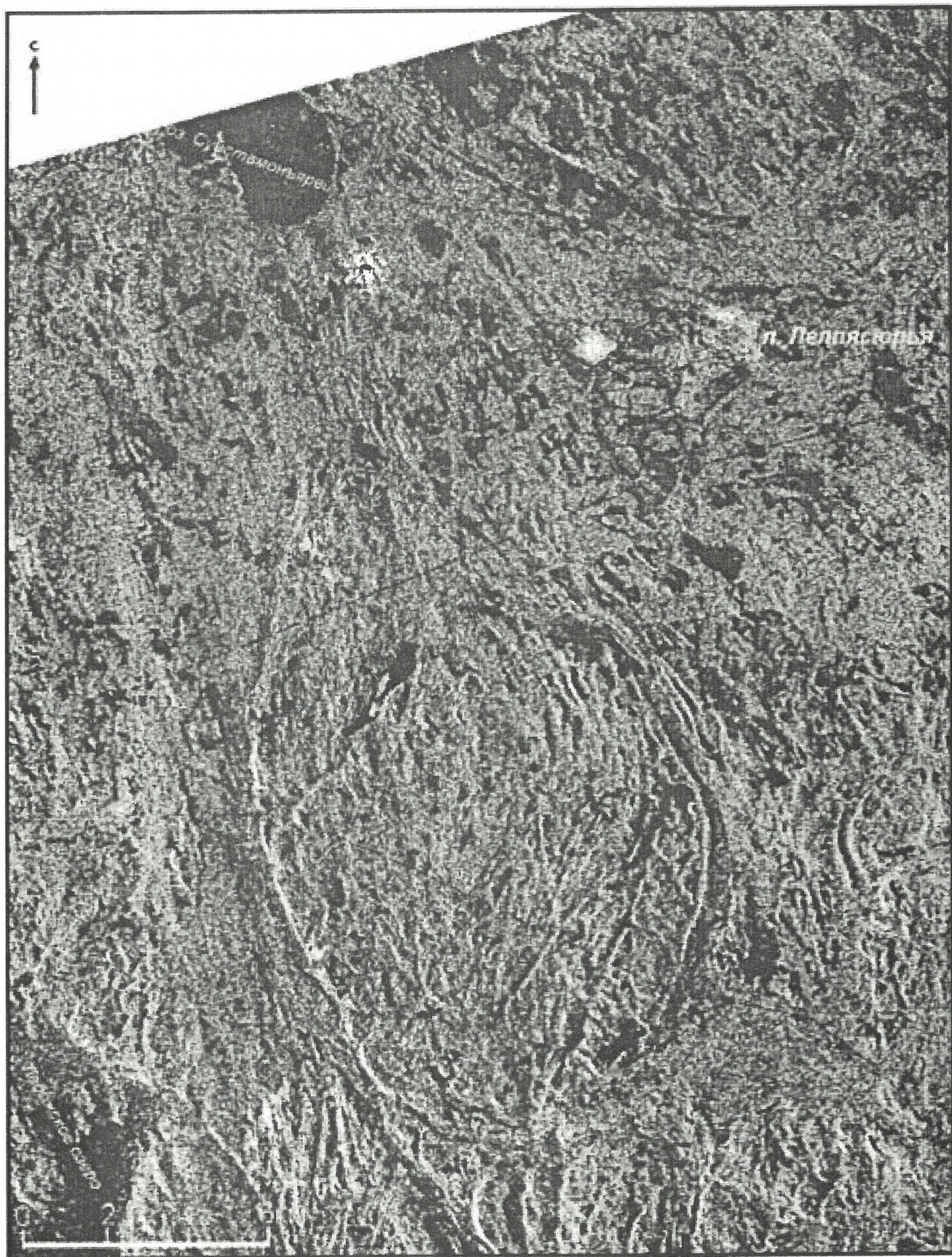


Рис. 1. Космический радиолокационный снимок ERS-1

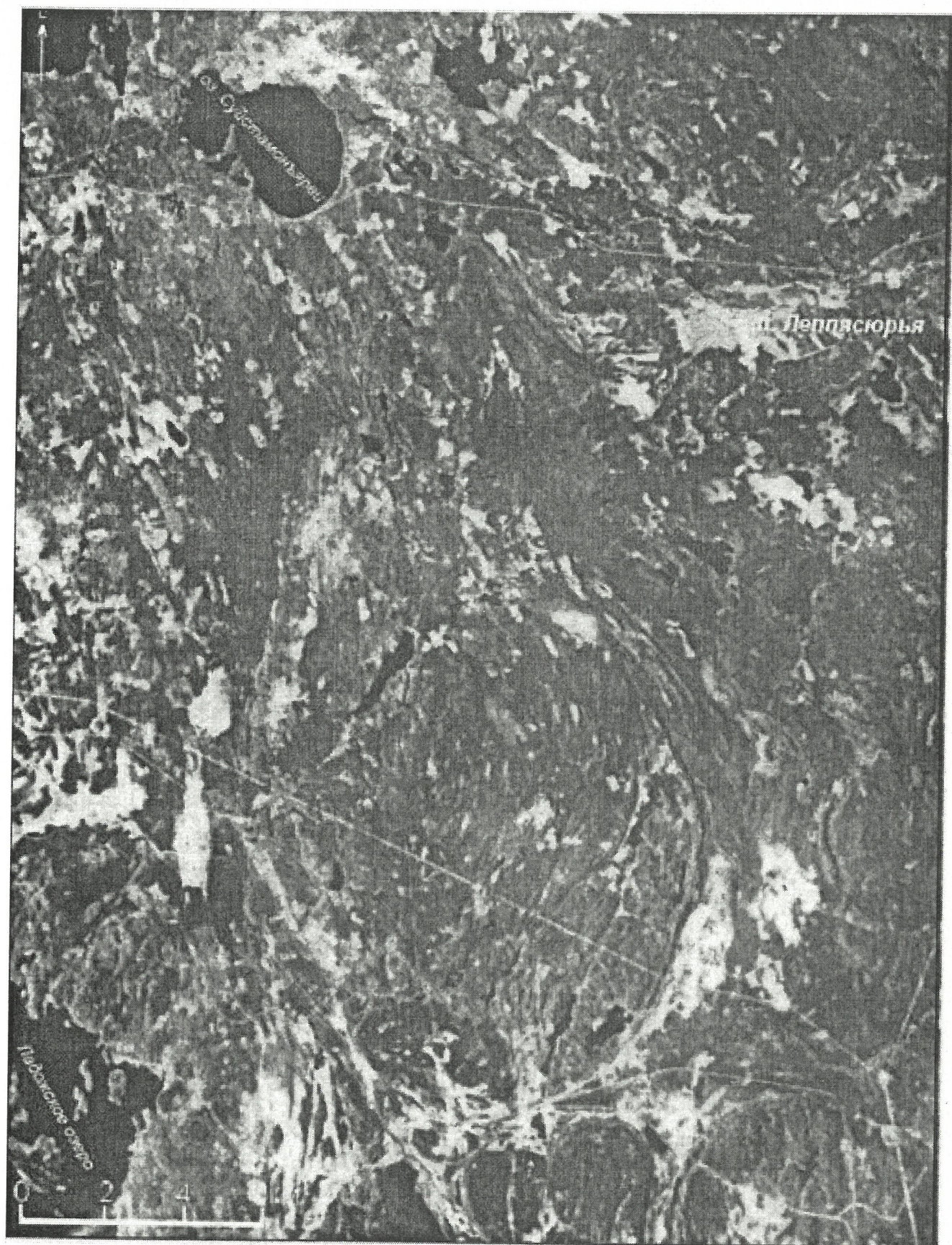


Рис. 2. Космический снимок РЕСУРС-Ф

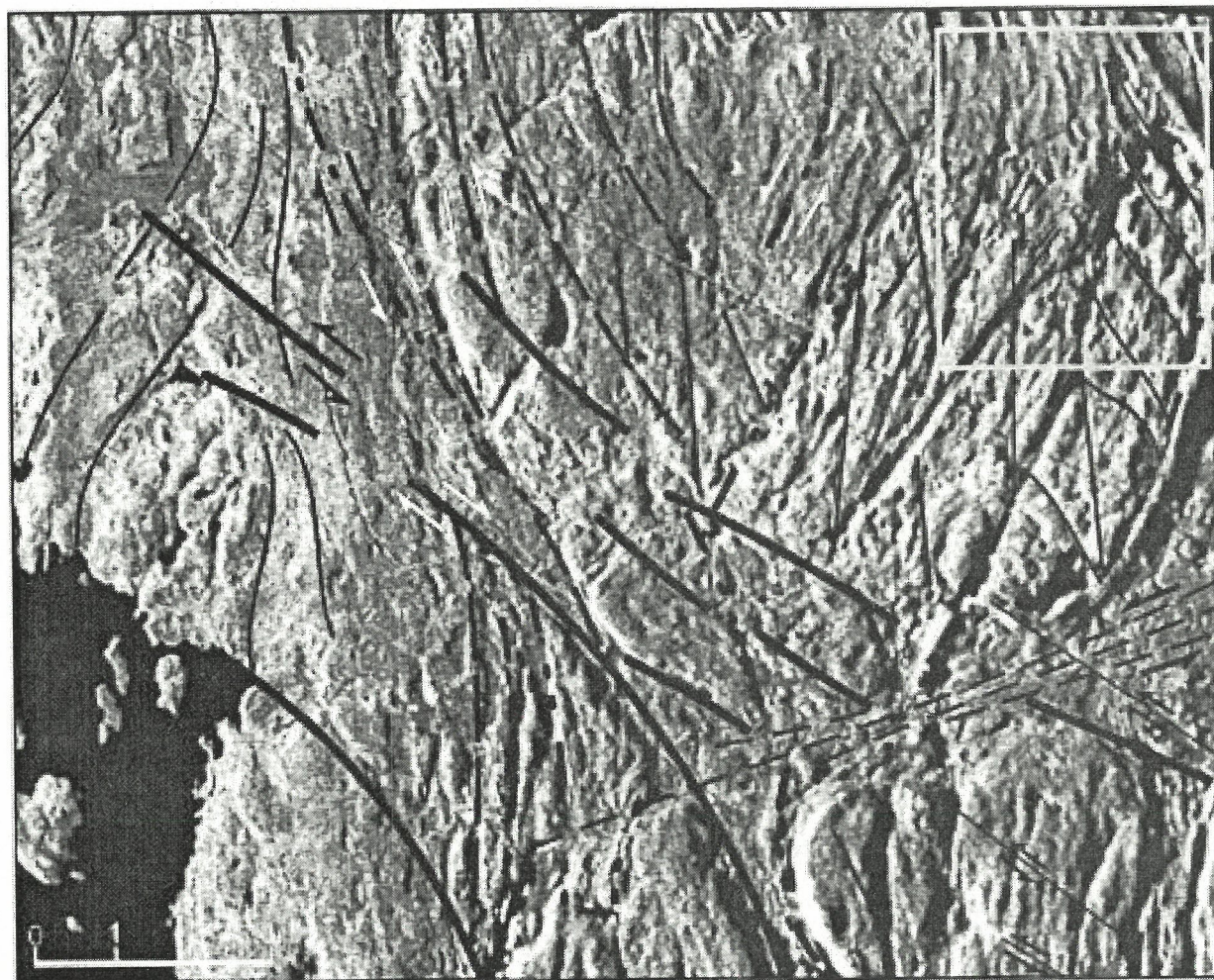
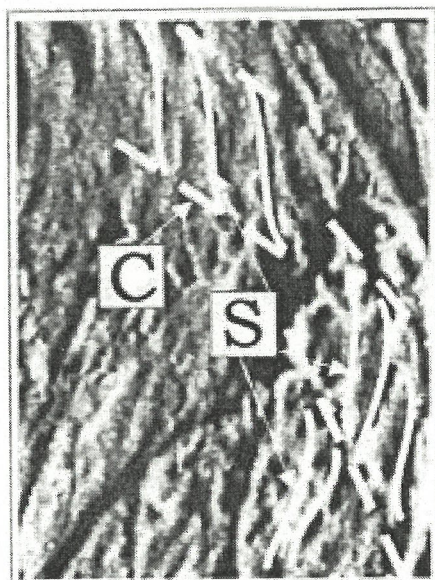
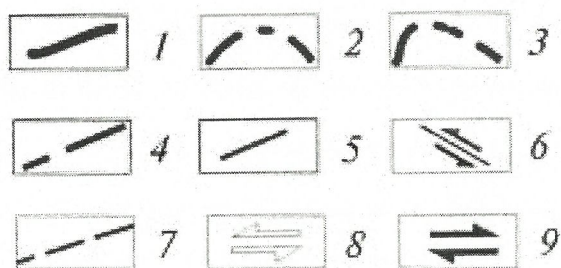


Рис. 3. Фрагмент радиолокационного аэроснимка с нанесенными ведущими структуроконтролирующими дизъюнктивными нарушениями:

1 — разрывы Fr_1 (dextral normal slip fault); 2 — синдеформационные сопряженные разрывы Fr_2 (sinistral normal extension fault); 3 — эшелонированные структуры Fr^1 (en-echelon tension); 4 — вторичные сколы Fr_2^1 (sinistral normal faults); 5 — хрупкие сколы; 6 — правосторонние сдвиги; 7 — зоны милонитизации; 8 — ранние направления смещений; 9 — поздние направления смещений

ме по РЛ-изображениям опробовалась технология, разработанная во ВНИИКАМ для аэро- и космических изображений оптического диапазона. В процессе исследований уточнялись возможности, особенности и ограничения использования данной технологии применительно к РЛ-данным.

Комплексный анализ РЛ-данных. После визуального анализа отдельных исходных и обработанных РЛ-изображений проводится комплексный анализ всех имеющихся данных (разночастотных, разнополяризованных и др.) с использованием методов анализа многомерных данных: корреляционного, факторного, классификации, а также цветовых композиций. Эти методы позволяют оценить структуру и взаимозависимость используемого набора данных, а также их роль в отражении различных геологических объектов различия в характере отраженного сигнала от данного объекта в зависимости от технических параметров съемки.

Результаты. Совместная интерпретация результатов обработки и анализа РЛ-изображений в комплексе с данными крупномасштабного картирования позволили идентифицировать структуроконтролирующие нарушения (см. рис. 3, 4), создать структурно-геологическую схему (рис. 5) и выявить закономерности структурной эволюции региона [1].

Структурную историю развития изучаемой территории можно разделить на три этапа.

События *доорогенного этапа* связаны с началом деформации края Карельского массива в условиях растяжения в направлении юг-юго-запад от массива. Общее растяжение с реализацией сдвиговой компоненты, направленной по касательной к массиву, приводит к формированию сложно построенной зоны растяжения с общей листрической плоскостью срыва (extension fault system propagation of second-order faults above a major listric detachment). Латеральная мощность растяжения оценивается как незначительная и не превышает первые километры.

На изучаемой территории эти события отразились в развитии серии субпараллельных разрывных нарушений F_{r1} правого знака (synthetic and antithetic extension fault) с простиранием сместителей северо-запад $310-320^\circ$, а также с началом формирования серии субпараллельных, синдеформационных сопряженных разрывов F_{r2} левого знака (extension fault system). На этой стадии, по-видимому, заканчивается отделение первичных фрагментов.

Дальнейшая эволюция выразилась в развитии субпараллельных, хрупкопластичных правого знака сдвиговых зон Sz_1 (semi-brittle shear zone, en-echelon tension gashes) с использованием сформированных ранее плоскостей срыва F_{r1} , как первичных плоскостей скалывания, контролирующих развитие серии эшелонированных структур F_{r1} .

Развитие сопряженных разрывов F_{r2} привело к формированию комплекса субмеридиональных (северо-запад 340°) левого знака разрывных структур (extensional fault system), ориентированных по оси Ляскеля — Импииниеми и частично вдоль восточного края Коккасельской и Уксинской куполовидных структур, а также F_{r2} — вторичных разрывов (extensional fault system), субпараллельных F_{r2} , развитых в основном в породах гранитогнейсового основания.

Таким образом, к началу орогенного этапа были сформированы основной структурный план, а также структурные парагенезисы, контролирующие дальнейшую структурную эволюцию изучаемой территории (см. рис. 4).

К областям сочленения зон первичного скалывания F_{r1} и F_{r2} — зон вторичного скалывания и растяжения пространственно тяготеет распределение метавулкаников сортавальской серии. В области развития структур растяжения F_{r2} зафиксирован комплекс параллельных даек габбро-долеритов.

Орогенный этап. Возобновление тектонических процессов и инверсия поля напряжений сначала приводят к закрытию морского бассейна, развитию малоамплитудных надвигов, а затем к интенсивным тангенциаль-

ным движениям, что выразилось в активизации ранее сформированных структур уже как сдвиговых зон субмеридионального и северо-западного простираций. Сдвиговые зоны субмеридионального простираения представляют собой активные правого знака сложнопостроенные зоны с пограничной реакцией на деформацию. С нарастанием более пластичных реакций на деформацию с севера на юг отмечается смена структурного рисунка, если на севере пространственное расположение и ориентировку интрузивных комплексов контролирует структурный парагенезис, характерный для хрупкой сдвиговой зоны (brittle-shear zone), то на юге — это структурный парагенезис хрупкопластичной сдвиговой зоны (semi-brittle shear zone). Сдвиговые зоны северо-западного простираения в это время остаются относительно малоактивными.

Дальнейшая инверсия поля напряжения приводит к активизации плоскостей сместителей левого знака северо-западного простираения и, как следствие, широкого развития S-C-структур (S-C band structures) левого знака с хорошо выраженными первичными и вторичными зонами скалывания, представляющими собой зоны сдвига с характерным расщеплением на концах, в виде «конского хвоста». В центральных частях крупных поднятий (Коккасельская куполовидная структура) S-структуры исчезают, сменяясь структурными парагенезисами, отражающими более хрупкие реакции, что подтверждается наземными наблюдениями (см. рис. 3).

Развитие S-C-структур, по-видимому, приходится на кульминацию метаморфических процессов. Тангенциальные движения в гранитогнейсовом комплексе выразились в ротационных движениях микрофрагментов, обусловив суммарный вращательный эффект самих куполовидных структур. Максимально проявленные деформации тяготеют к краевым частям купольных структур, а также контактовым частям микрофрагментов. Внутрикупольные амфиболиты как более компетентные к стрессу в зависимости от своего пространственного положения ведут себя как жесткие тела с характерными хрупкими реакциями. Приуроченность дайковых тел к контактовым частям микрофрагментов, эффекты вращения приводят к возникновению псевдоскладчатых форм.

Таким образом, область пересечения субмеридиональных сдвиговых зон со сколо-сдвиговыми зонами северо-западного простираения характеризуется развитием сложных интерференционных структур, обусловивших закономерности пространственного распределения Суйстамского комплекса малых интрузий, диорит-тоналит-гранодиоритового комплекса Импииниеми, габбро-монцит-диоритового комплекса Велимяки и, вероятно, габбро-анортозитов Импилахти.

Ладожская серия деформируется в открытые пологие складки с субгоризонтальными шарнирами, в которых развит кливаж, субпараллельный осевым плоскостям. Вблизи купольных структур резко меняется структурный рисунок — складчатость становится изоклиальной, часто с крутым падением шарниров, в межкупольных синклиналиях зафиксирована складчатость нагнетания.

Окончание орогенного этапа характеризуется сменой гранитоидного натрового магматизма калиевым и становлением последовательно ультраметаморфогенных гнейсогранитов и палингено-анатектических (Мурсульский пегматит-гранитовый и Маткасельский пегматит-лейкогранитовый) комплексов.

Дальнейшая структурная эволюция восточного борта Ляскеля-Импииниемского трога приводит к активизации ранее сформированных разрывных структур и характеризуется интенсивно проявленной пропилитизацией.

Наиболее поздними структурами этого этапа являются правосторонние сдвиги с простираением северо-запад $310-330^\circ$ (dextral strike-slip fault), хорошо различаемые на снимке в виде тонких линий, секущих все структурно-вещественные комплексы и обычно трассированных пегматоидными жилами.

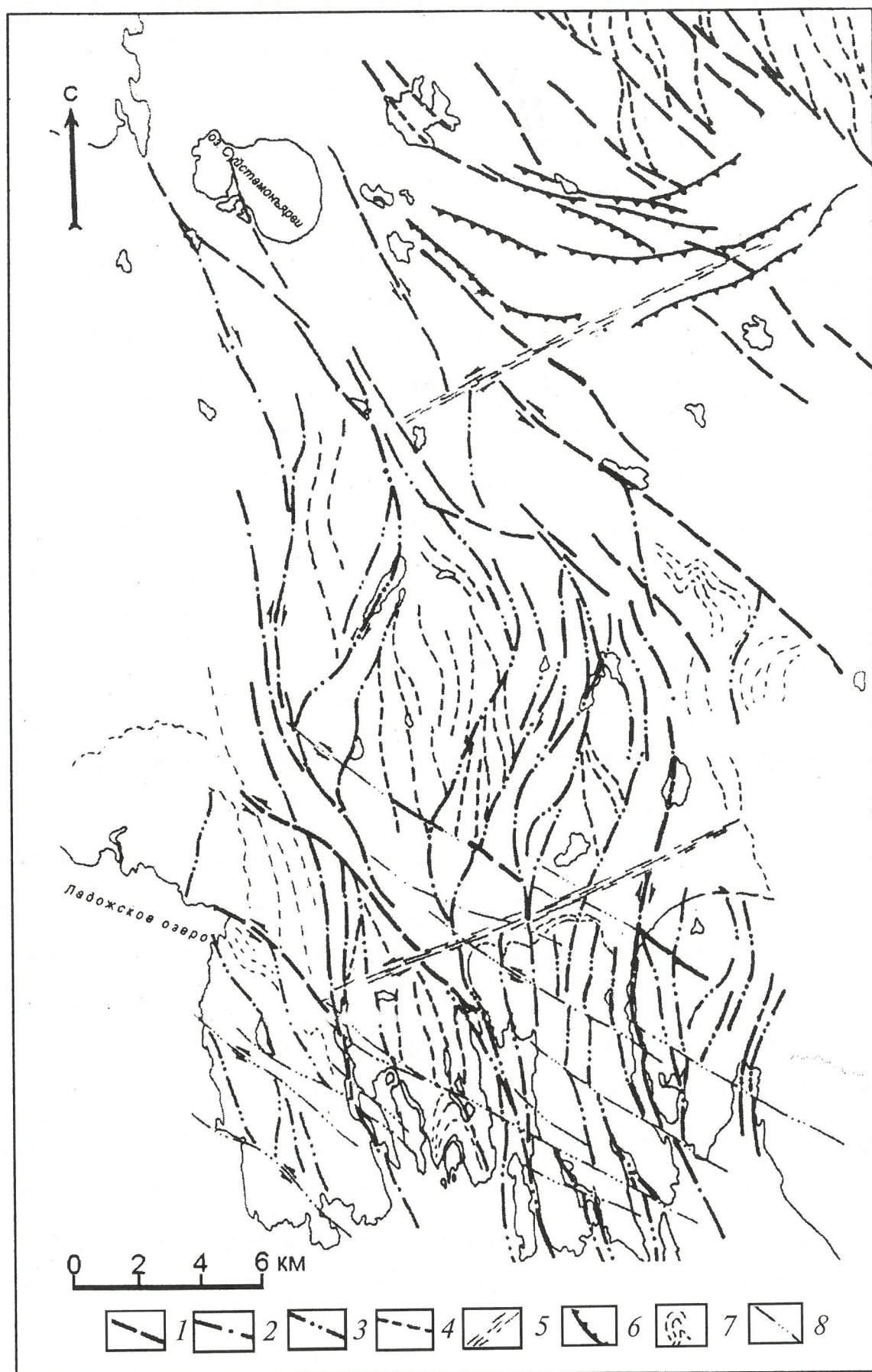


Рис. 4. Схема структурного дешифрирования по данным радиолокационных космических и аэросъемок:

1 — разрывы Fr_1 (dextral normal slip fault); 2 — синдеформационные сопряженные разрывы Fr_2 (sinistral normal extension fault); 3 — эшелонированные структуры Fr^1 (en-echelon tension); 4 — вторичные сколы Fr_2^1 (sinistral normal faults); 5 — зоны милонитизации; 6 — малоамплитудные надвиги; 7 — вторичные плоскостные структуры; 8 — правосторонние сдвиги

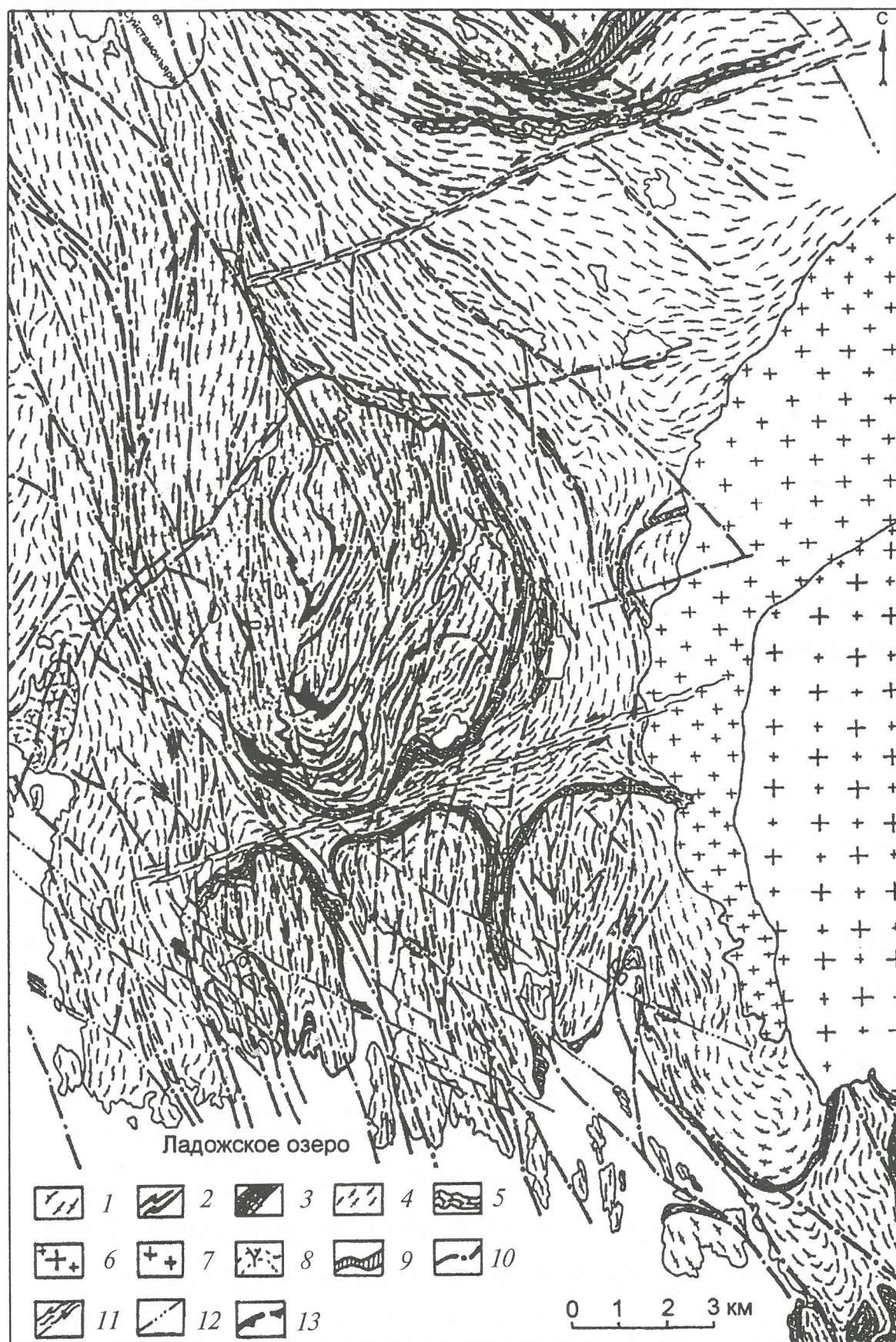


Рис. 5. Структурно-геологическая схема:

1 — архейские гранитоиды; 2 — дайки метаамфиболитов; 3 — метавулканыты питкярантской серии; 4 — метатерригенные породы ладожской серии; 5 — карбонатные породы ладожской серии; 6 — граниты рапакиви I фазы; 7 — граниты рапакиви II фазы; 8 — габброиды; 9 — диориты, гранодиориты, порфириды; 10 — раннедеформационные разрывные нарушения; 11 — зоны милонитизации; 12 — правосторонние сдвиги; 13 — малоамплитудные надвиги

Постороженный этап на изучаемой территории выразился в становлении Салминского комплекса гранитов рапакиви и характеризуется пограничным поведением вещества. В приконтактных частях массива развиты текстуры течения и в то же время присутствуют жесткие структурные формы.

Из вышесказанного сделаем следующие выводы. Сравнение различных РЛ-изображений (см. рис. 1, 3), КС РЕСУРС-Ф (см. рис. 2) и их обработок позволило заключить, что основные геологические структуры более уверенно дешифрируются на радиолокационном изображении ERS-1 (см. рис. 1). Это обусловлено тем, что геологические образования (структуры) хорошо выражены в рельефе, который является одним из главных природных факторов, влияющих на формирование радиолокационных изображений. Изображение ERS-1 дает возможность оценить структурную картину в целом, полученные при различных параметрах съемки АРЛИ помогают детализировать представления о геологическом строении территории. Наиболее информативными представляются АРЛИ сантиметрового диапазона ГГ и ВВ поляризации с направлением залета север — юг, причем предпочтительнее оказались АРЛИ ГГ поляризации. Четкость выделяемых структурных элементов (см. рис. 3, 4) связана с преобладанием меридиональных направлений основных структуроконтролирующих разрывных нарушений. В то же время сопоставление одновременно полученных АРЛИ с разной длиной волны и одинаковой ГГ поляризацией показало, что использование более длинноволнового излучения позволяет наблюдать другой характер отраженного сигнала и делает возможным дешифрирование природных объектов, невидимых в коротковолновом диапазоне [2, 6].

Изучаемый регион — часть развития обширной, дол-

гожившей северо-западного простирания эшелонированной структуры, разделенной трансформной зоной Ляскеля — Импииниemi на две структурно-формационные единицы: Сортавальское и Питкярантское поднятия. Территория испытала, по крайней мере, два этапа тектонической активизации, каждый этап которой характеризуется собственными структурными парагенезисами, термодинамическим режимом и вещественными комплексами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атакова М.М., Русанова А.А., Пупков О.М., Смирнов М.Ю. Анализ региональных структур Северного Приладожья на основе материалов дистанционного зондирования // Тез. докл. 1-й международной конференции: Корреляция геологических комплексов Фенноскандии, 8—11 сентября 1996 г. С.-Пб., 1996. С. 4—5.
2. Атакова М.М., Никольский А.С., Русанова А.А. и др. Радиолокационное исследование геолого-структурного строения Южной Карелии в метровом диапазоне длин волн (по материалам самолетного радара) // Тр. XIV Всероссийского симпозиума: Радиолокационное исследование природных сред, 25—27 апреля 1998 г. С.-Пб., 1998. Вып. 1. С. 70—75.
3. Ахметьянов В.Р., Пасмуров А.Я. Обработка радиолокационных изображений в задачах дистанционного зондирования Земли // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. № 1. С. 70—81.
4. Зайцев В.В., Зайцев Вл.В., Трошкин Д.В. Экспериментальное исследование алгоритмов фильтрации спекл-шума на радиолокационных изображениях // Исследования Земли из космоса. 1994. № 6. С. 30—41.
5. Кратц К.О. Геология карелии // Тр. лаб. геологии докембрия АН СССР. — М.-Л., Изд. АН СССР, 1963. Вып. 16.
6. Pertsov A.V. Remote sensing in geology // Proceeding of the 18th Annual Conference of the Remote Sensing Society: remote Sensing from Research to Operation, 15—17 September 1992, University of Dundee, England, 1992. P. 129—146.

УДК 528.88.044.2:55(239.9)

© В.В. Самсонов, А.А. Кирсанов, В.Н. Филиппов, 1999

Некоторые результаты дешифрирования радиолокационного изображения RADARSAT для геологических целей на примере северной части гор Принс-Чарльз

В.В. САМСОНОВ, А.А. КИРСАНОВ, В.Н. ФИЛИППОВ

Общеизвестно, насколько велика роль космической информации при геологических исследованиях, которая в условиях Антарктиды в силу специфических природных факторов (суровый климат, труднодоступность многих районов, широкое развитие снежно-ледового покрова, большая разобщенность свободных от ледового покрова участков и т.д.) значительно возрастает. Между тем, несмотря на значительное количество разнообразных спутниковых систем, поставляющих космические снимки для исследования поверхности Земли, изображений шестого материка нужного качества крайне недостаточно. Что касается специального радиолокационного космического зондирования территории Антарктиды для геологических целей, то такие съемки стали проводиться лишь в последнее время с американо-канадского искусственного спутника Земли RADARSAT, запуск которого был осуществлен в ноябре 1995 г. Спутник выведен на орбиту с первоначальными параметрами: высота орбиты над экватором 792 км, наклонение орбиты 96,6°. На спутнике размещена радиолокационная система с синтезированием апертуры антенны, которая работает на частоте 5,3 ГГц с линейной горизонтальной поляризацией излучаемых и принимаемых сигналов и углом визирования 20—50°. В стандартном режиме работы радиолокационная аппаратура позволяет получать независимо от облачности и условий освещенности изображения поверхности Земли с разрешением 10—100 м в полосе шириной 50—500 км. Для съемки южнополярной облас-

ти необходима переориентация спутника на 180° вокруг собственной оси. Первые радиолокационные снимки ледяного континента были получены только в конце 1997 г.

Нами, как участниками проекта 1D-230 ADRO (Application Development and Research Opportunity), были получены от NASA радиолокационные (РЛ) изображения района гор Принс-Чарльз (Восточная Антарктида) для изучения возможностей выявления геологических объектов и выяснений преимуществ и/или недостатков этих снимков применительно к изучению геологического строения Антарктиды (рис. 1). В настоящей статье рассмотрены лишь первые результаты использования РЛ-данных для выявления дисъюнктивных нарушений. Для повышения достоверности информации, получаемой при структурном дешифрировании снимков, нами использовались схема разрывных нарушений, составленная по результатам дешифрирования мелкомасштабных космических снимков в видимой части спектра, полученные с российского спутника «Космос» среднемасштабные аэрофотоснимки, а также некоторые данные геофизических съемок.

Некоторые аспекты физических основ РЛ-съемок. Впервые эксперименты по зондированию Земли с помощью радиолокационной станции, работающей в сантиметровом диапазоне длин волн и обеспечивающей съемку земной поверхности с пространственным разрешением около 1 км, были осуществлены в 1983—1984 гг. с ИСЗ «Космос-1500» [4]. Тогда были получены и первые РЛ-изображения Антарктиды. Результаты

экспериментов, а также теоретические аспекты формирования радиолокационного сигнала обратного рассеяния от материковых льдов изложены в работе [5].

Информативность РЛ-изображения Антарктиды обусловлена соотношением отраженной, рассеянной и поглощенной энергий зондирующего сигнала в зависимости от геометрии, структуры и состава исследуемого объекта. Если неровности поверхности много меньше длины волны радиолокационного луча, то происходит зеркальное отражение в сторону от радиолокационной станции, и тон изображения будет черным или близким к нему. При наличии неровностей, соизмеримых или больше длин волн, происходит диффузное отражение волн во все стороны и соответственно в направлении антенны РЛС, поэтому тон на изображении будет серым до светлого.

Одновременно с поверхностным отражением имеет место и объемное рассеяние радиоволн внутренними неоднородностями ледникового покрова. В связи с тем,

что используется сантиметровый диапазон волн, основным фактором, обуславливающим интенсивность обратного излучения РЛ-сигнала, становится его рассеяние на внутренних неоднородностях поверхностного слоя. Толщина этого слоя зависит от свойств среды. Радиоволны проникают, например, в пресноводный лед приблизительно на 10 м, а в снежно-фирновые образования на десятки метров. Поэтому различные по внутреннему строению ледяные покровы по-разному отображаются на РЛ-снимках, т.к. их тон, структура и текстура имеют своеобразные для соответствующего льда особенности. Это показано на рис. 2, где представлено РЛ-изображение в сравнении с аэрофотоснимком того же участка.

Следует отметить, что характер космических изображений Антарктиды в отличие от других районов Земли определяется особенностями рельефа — единственного здесь компонента ландшафта, несущего информацию для геологического дешифрирования. При этом на космичес-

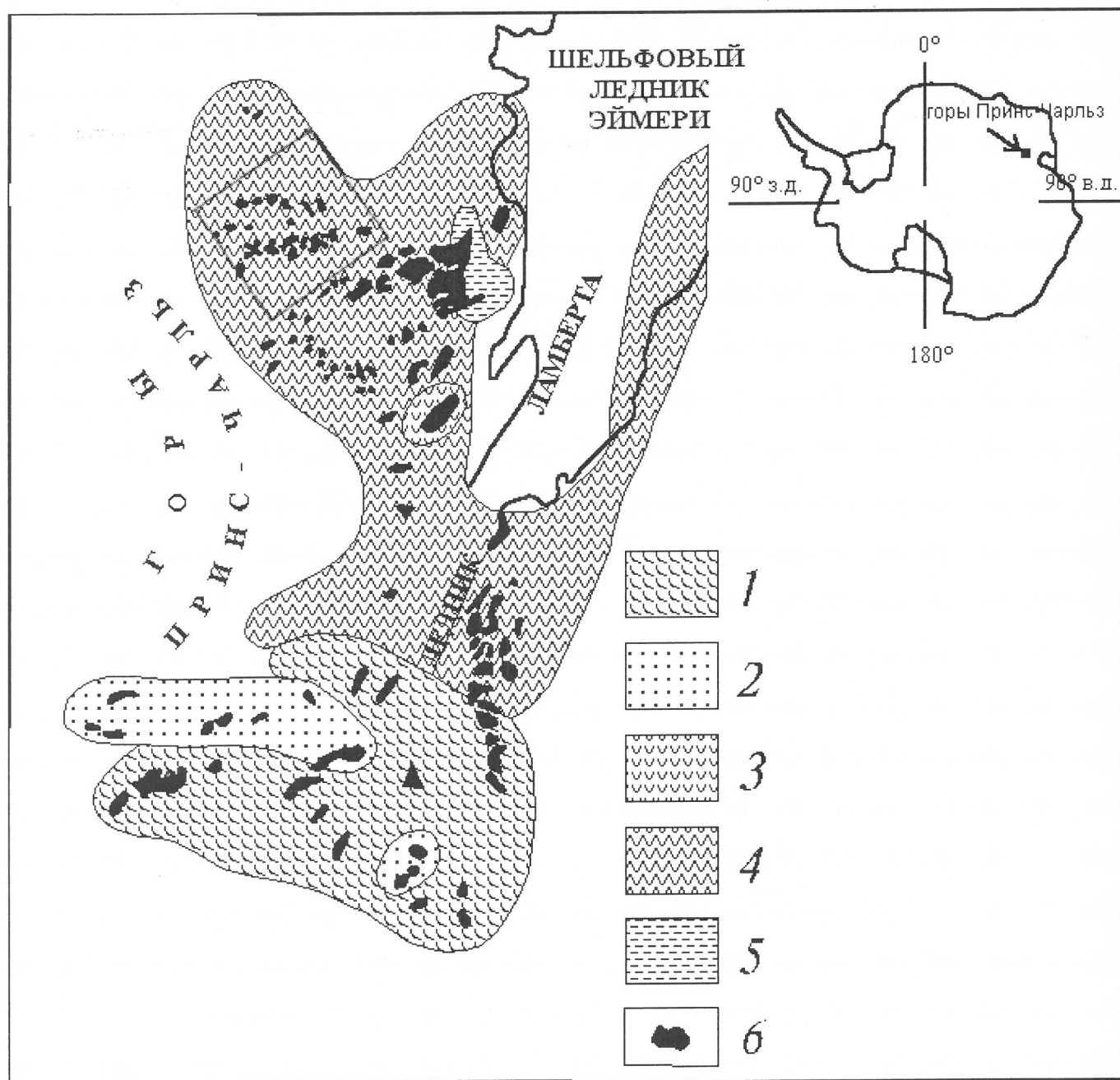


Рис. 1. Геологическая схема гор Принс-Чарльз (Восточная Антарктида), по работе [12]:

1 — кристаллический фундамент, AR; 2 — гранитоиды и вулканогенные породы, PR₂; 3 — высокометаморфизованные породы, PR₂; 4 — метасадочные породы, PR₃; 5 — осадочные породы, P; 6 — выходы коренных пород

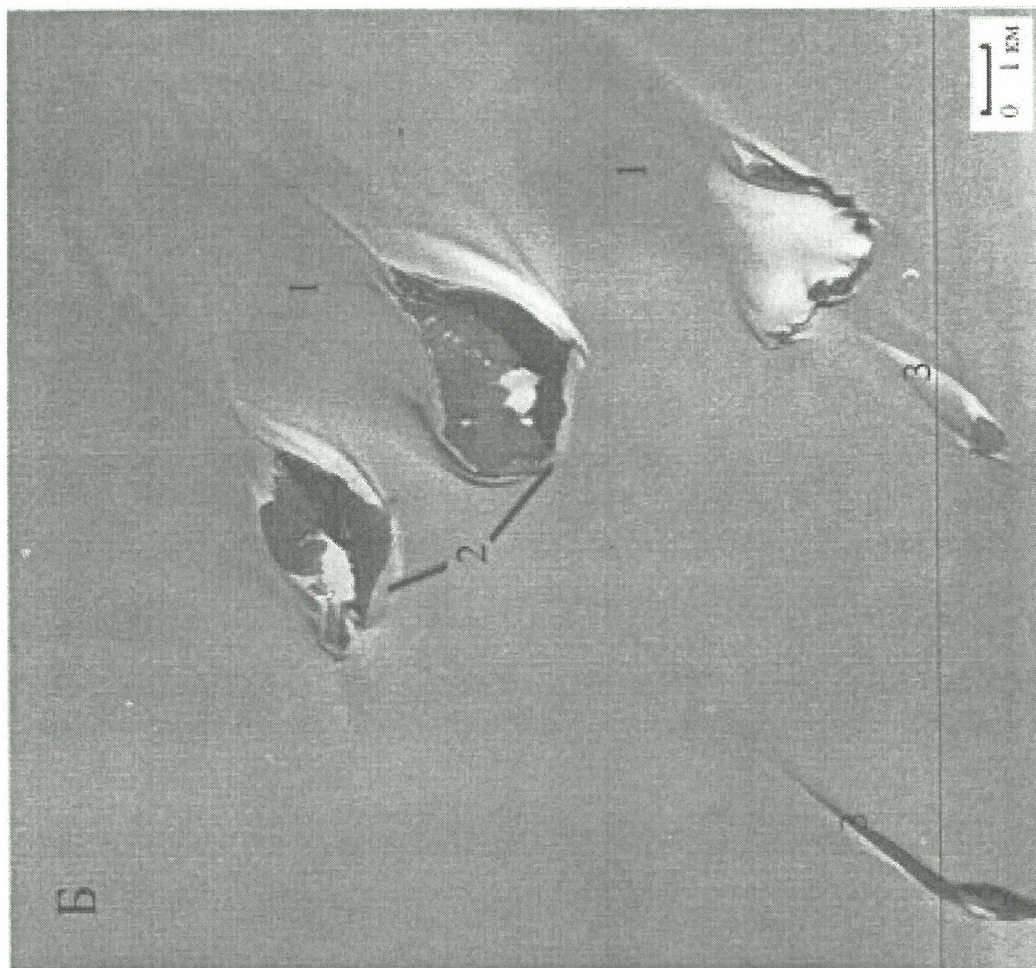


Рис. 2. Радиолокационное изображение (А) участка северной части гор Принс-Чарльз, полученное со спутника RADARSAT, в сравнении с фотографическим изображением (АФС) того же участка (Б):

1 — участки, лишенные снежного покрова; 2 — рандклюфты (выдувы); 3 — снежные надувы

ких снимках отражается не собственный рельеф коренных пород, являющийся индикатором геологического строения территории, а в основном рельеф поверхности ледникового покрова, достигающего мощности сотни — тысячи метров. Однако, по мнению ряда исследователей, имеются предпосылки считать, что характер рельефа поверхности ледника определяется не только экзогенными факторами и движением ледника, но и рельефом ледникового ложа [1, 2, 5]. Среди форм разного генезиса на поверхности ледникового покрова практически всегда развиты и формы унаследованные, т.е. соответствующие формам подледного рельефа. Они присутствуют как на участках развития малоподвижного материкового льда, так и в пределах выводных ледников. Однако следует иметь в виду, что с увеличением мощности ледникового покрова происходит закономерное сглаживание унаследованных форм подледного рельефа. Так, если при покрове мощностью до первых

десятков метров на его поверхности отражаются формы рельефа ложа, имеющие амплитуду несколько метров, а линейные размеры первые сотни метров (ложбины, гребни, уступы и т.п.), то при мощности от десятков до сотен метров «просвечивают» лишь формы, размерами не менее первых километров — отроги хребтов, разделяющие их долины и т.п. [1]. Таким образом, происходит естественная фильтрация геологических объектов по масштабу — чем больше мощность покрова, тем крупнее объекты, которые могут быть выявлены при дешифрировании. Естественная фильтрация наблюдается и в других районах Земли при дешифрировании геологических объектов, перекрытых более молодыми образованиями и проявляющихся через особенности компонентов ландшафта. В Антарктиде этот процесс выражен особенно отчетливо в связи с тем, что толща льда из-за относительно высокой однородности ее со-

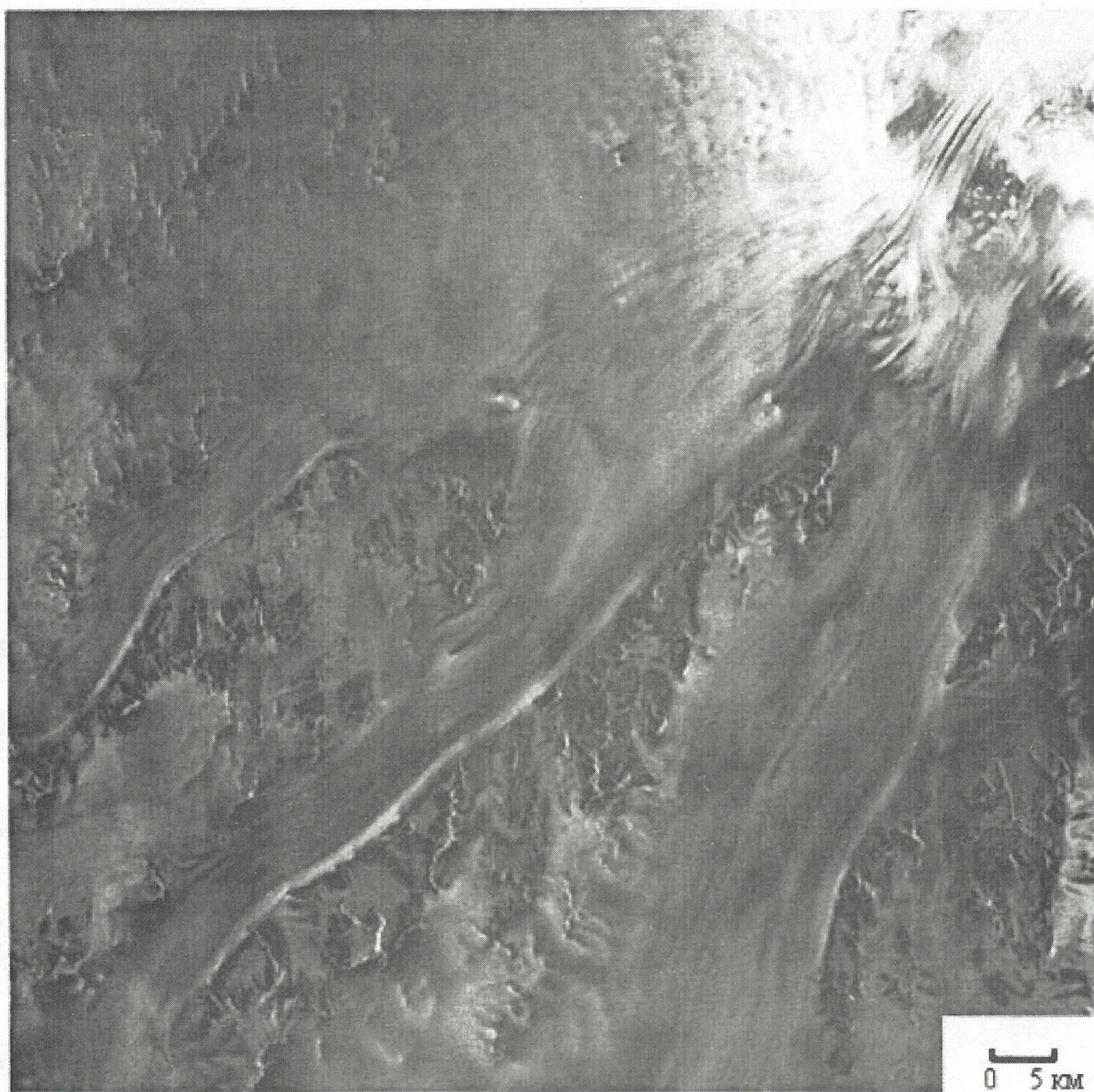


Рис. 3. Радиолокационное изображение северной части гор Принс-Чарльз

става и структуры практически не вносит в него искажений [1].

Унаследованные формы ледникового рельефа в ряде случаев отчетливо проявляются на многоспектральных космических снимках, возможности геологического дешифрирования которых хорошо проиллюстрированы [1, 9, 10] на примерах некоторых территорий Антарктиды. На РЛ-изображениях следует ожидать более четкого проявления погребенных геологических структур вследствие изменений состояния поверхностной части ледника, обусловленных его деформациями при обтекании неровностей подледного рельефа (рис. 3).

Географические условия и геологическое строение гор Принс-Чарльз. Горы Принс-Чарльз, которые представляют собой прерывистые цепи нунатаков и горных массивов, приуроченные к бортам крупнейшего в Антарктиде вывального ледника Ламберта и его притоков, расположены в Восточной Антарктиде в пределах Земли Мак-Робертсон между 60 и 70° в.д., 69 и 75° ю.ш.

Горы разделены на две морфологически различные группы — южную и северную, граница между которыми проходит примерно по 72° ю.ш. Для гор южной группы характерен «столовый» рельеф: относительно плоские вершинные поверхности с пологохолмистым рельефом и крутые, часто обрывистые, склоны. Плоские вершины в большинстве случаев покрыты плащом элювиально-делювиальных и ледниковых отложений. У подножия гор со стороны движущихся ледников распространены шлейфы современных морен. Абсо-

лютные высотные отметки гор колеблются от 1000 до 3162 м (гора Мензис). Относительные превышения над ледниковой поверхностью 250—1600 м.

Для северной группы гор характерны массивы и нунатаки, в большинстве случаев имеющие альпийно-типный рельеф с остроконечными вершинами и крутыми склонами, которые практически лишены рыхлых покровных отложений. Абсолютная высота гор увеличивается от долины ледника Ламберта в западном направлении от 1800 до 2400 м. Однако превышения гор над ледниковой поверхностью не такие большие — от нескольких десятков до первых сотен метров.

В горах Принс-Чарльз преобладают горные ледники с мощностью льда до первых сотен метров, сменяющиеся к периферии района материковым ледниковым покровом, мощность которого достигает 2000—2500 м. Толщина движущегося льда ледника Ламберта до 1500 м.

В тектоническом плане горы Принс-Чарльз расположены в пределах Восточно-Антарктического кратона, наиболее крупного геоструктурного элемента полярного материка. В современном структурном плане регион представляет собой горное обрамление крупного рифта мезозойского заложения, используемого мощным выводным ледником Ламберта. Рифтовая структура, имеющая субмеридиональное простирание, протягивается в глубь материка на 600 км и более и далее в виде зоны разломов прослеживается через весь континент. Мезо-кайнозойская субмеридиональная зона рифтогенных линейментов рассекает древние структуры

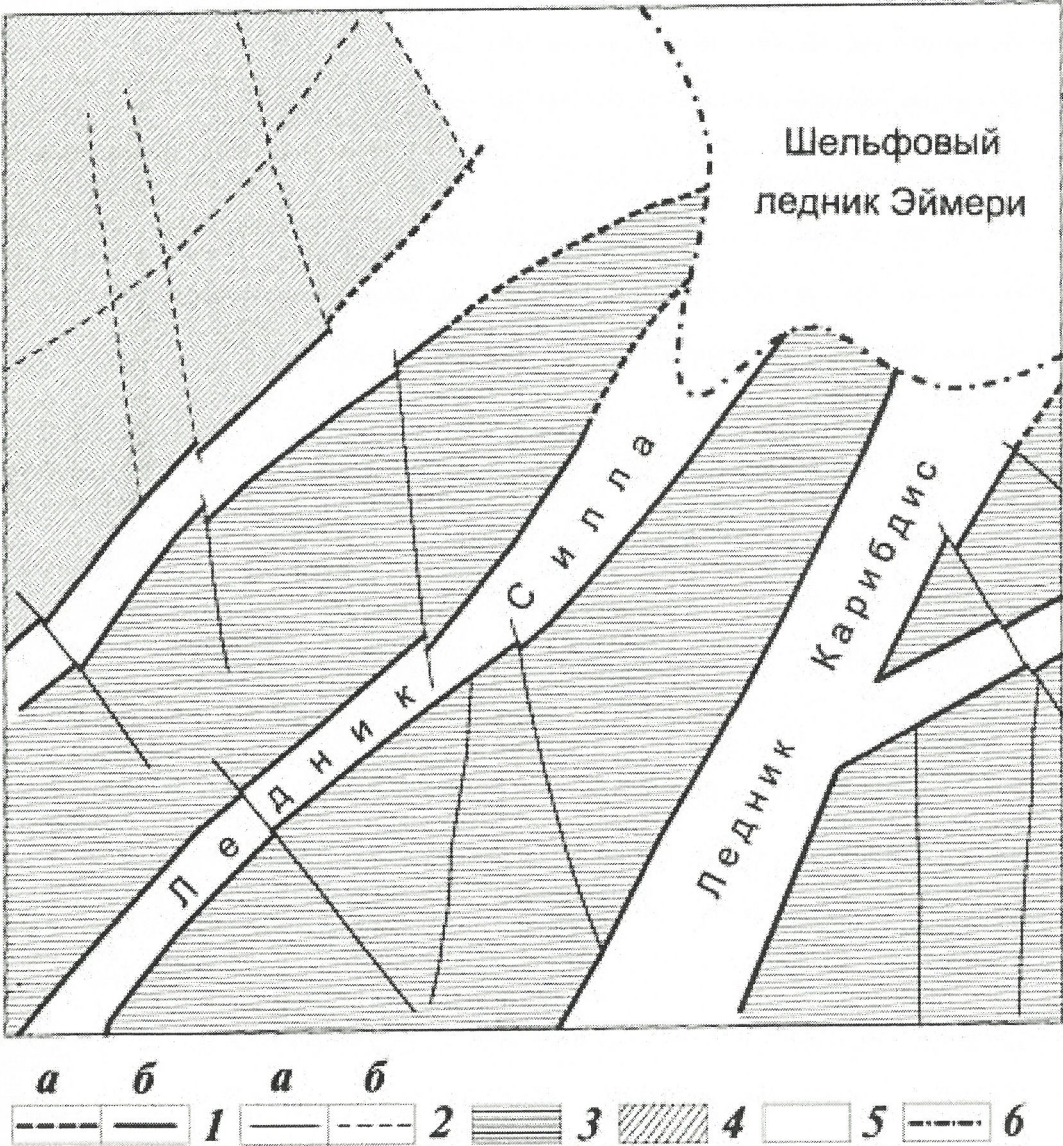


Рис. 4. Схема структурного районирования северной части гор Принс-Чарльз:

1 — рифтогенные нарушения (а — дешифрируемые предположительно, б — дешифрируемые уверенно); 2 — прочие разрывные нарушения (а — дешифрируемые уверенно, б — дешифрируемые предположительно); 3 — поднятые блоки (выступы докембрийского фундамента); 4 — погруженные блоки; 5 — максимально погруженные блоки (зоны предполагаемого развития в верхнем ярусе мезозойских осадочно-вулканических образований); 6 — граница шельфового ледника Эймери, по данным дешифрирования

кристаллического фундамента, ориентированные в субширотном направлении. Последние в горах Принс-Чарльз составляют две тектонические провинции: архейскую-раннепротерозойскую Рукерскую гранит-зеленокаменную область на юге и Вегенер-Моусоновский протерозойский полиметаморфический подвижный пояс на севере [7, 8, 12].

На тестовом участке (см. рис. 1) в северной части гор Принс-Чарльз массивы и нунатаки сложены главным образом докембрийскими высокометаморфизованными и интрузивными породами и только вокруг оз. Бивер обнажаются пермские — раннетриасовые осадочные образования [11].

Северная часть гор Принс-Чарльз — один из наиболее исследованных районов Восточной Антарктиды. Она посещалась многократно австралийскими и российскими полевыми группами, а также была объектом аэрогеофизических исследований, в результате которых выявлены блоки как с положительным высокоинтенсивным магнитным полем, так и с аномально низким магнитным полем.

Результаты дешифрирования и интерпретации РЛ-изображения северной части гор Принс-Чарльз. Дешифрирование цифровых радарных изображений проводилось в интерактивном режиме после их предварительной обработки (подавления спеклов, топографической коррекции, дифференцирования и т.д.). При этом выявлены две группы линеаментов — региональные и локальные. Для выделения региональных линеаментов использовались радарные изображения масштаба 1:300 000, а для локальных — увеличенные до масштаба 1:50 000. Одной из важных проблем была идентификация линеаментов как разрывных нарушений по ряду прямых и косвенных признаков, с привлечением геолого-геофизических данных и материалов полевых исследований.

При дешифрировании РЛ-изображения четко выделяются субширотные линеаменты, которые рассекают исследуемую территорию на линейно вытянутые блоки, осложненные более мелкими нарушениями. Наиболее крупные дизъюнктивы района — разломы, по-видимому, сбросового характера, ограничивающие депрессии, занятые выводными ледниками Силла, Карибдис и безымянным ледником, расположенным севернее хр. Атос (рис. 4). Подтверждением правильности выявления блокового строения района являются геофизические данные и, в частности, аэромагнитные исследования, проведенные Российской Полярной геофизической экспедицией, а также совпадения большинства выявленных на РЛ-изображении линеаментов с положением дизъюнктивов, отдешифрированных по КС видимого диапазона.

Выявление дизъюнктивов регионального плана важно по ряду причин. Во-первых, они, как правило, являются блокоформирующими структурами. Во-вторых, известна их рудоконтролирующая роль, особенно узлов пересечения, т.е. они имеют минерогеническое значение. Локальные разломы ограничивают более мелкие блоки, размером десятки квадратных километров, которые сложены горными породами различного состава.

Известно, что на современном этапе тектонического развития в горных районах Антарктиды преобладают интенсивные поднятия, в равнинных — опускания [3]. Основным критерием оценки амплитуды поднятия для горных районов в целом являются относительные превышения над окружающей равнинной территорией, учитываемые совместно с данными о возрасте и мощности геологических образований, толщины ледникового покрова и т.п. Положение крупных блоков земной коры в исследуемом районе, а также знаки их неотектонических движений в значительной степени унаследованы от более ранних эпох тектогенеза. В связи с этим, данные о характере движения блоков, образованных основными региональными разломами, относятся,

по-видимому, ко всему периоду существования этих разломов.

Результаты совместного анализа РЛ-изображения, геоморфологических и геофизических данных позволили по степени относительного воздымания (погружения) выделить в исследуемом районе блоки трех типов: относительно поднятые, в пределах которых большое количество выходов коренных пород докембрийского возраста (в центральной и южной частях исследованной территории);

погруженный или слабо погруженный с близким залеганием под поверхностью ледникового покрова коренных пород, который расположен в северной части района;

с максимальным погружением ледникового ложа, к которым приурочены выводные ледники и часть шельфового ледника Эймери. В пределах этих блоков предполагается развитие в верхнем ярусе мезозойских осадочно-вулканогенных образований по аналогии с рифтовой зоной ледника Ламберта.

Достаточно значительные линейные размеры и амплитуды блокообразующих разломов, а также вероятный большой диапазон возраста и различный состав пород, слагающих смежные блоки, свидетельствуют о глубинности нарушений и длительности периода активного развития блоков с унаследованным характером этого развития.

В заключение следует отметить, что РЛ-изображения RADARSAT Антарктиды информативны для решения различных геологических задач (при выявлении сети разломов, изучении новейшей тектоники), а результаты их дешифрирования могут использоваться как самостоятельный фактический материал наравне с другими МДЗ, геологическими и геофизическими методами исследования шестого материка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будько В.М. Геологическое дешифрирование космических снимков Антарктиды // Исследование Земли из космоса. 1983. № 6. С. 52—59.
2. Динамика масс снега и льда / Пер. с англ. под ред. А.Н.Кренке. — Л.: Гидрометеиздат, 1985.
3. Значко-Яворский Г.А. О новейшей тектонике Антарктиды // Информационный бюллетень Советской Антарктической экспедиции. 1970. № 77. С. 29—31.
4. Калмыков А.И., Ефимов В.Б., Кавелин С.С. и др. Радиолокационная система ИСЗ «Космос 1500» // Исследования Земли из космоса. 1984. № 5. С. 84—93.
5. Радиолокация поверхности Земли из космоса / Под ред. Л.М.Митникова, С.В.Викторова. — Л.: Гидрометеиздат, 1990.
6. Isachen Y.W. Fracture analysis of New York State using multistage remote sensor Data and ground study: Possible application to plate tectonic modeling / Eds. Hodgson R.A., Gay S.P., Benjamins J.Y. & Jr. // Proceedings of the First International Conference on net New Basement Tectonics (Publication Number 5). Utah Geological Association. 1974.
7. Kamenev E.N. Structure and evolution of Precambrian cratons and metamorphic Belts in East Antarctica // Sixth International Symposium on Antarctic Earth Sciences. National Institute of Polar Research. Tokyo. 1991. P. 261—263.
8. Kamenev E.N. Structure and evolution of the Antarctic shield in Precambrian / Eds. Findley R.N., Unrug R., Banks M.R. & Veevers J.J. // Gondwana eight: Assembly, Evolution and dispersal. Rotterdam: A.A.Balkema. 1993. P. 141—151.
9. Kirsanov A.A., Samsonov V.V. Study of geological and tectonic structure of Antarctic continent using multispectral satellite data // The second ADEOS Symposium/Workshop. NASDA. Yokohama. 1997. P. 709—710.
10. Kirsanov A.A., Samsonov V.V., Kamenev E.N. Investigation of Antarctic continent geological features // The first ADEOS Symposium/Workshop. Vol. 2. NASDA. Kyoto, 1994. P. 622—623.
11. Mikhailov V.M. & Sergeyev M.B. Main Lithological Formation of High-Grade Metamorphic Tarrain of the Northern Prince Charles Mountains, and Their Subglacial Distribution // The Antarctic Region: Geological Evolution and Processes. 1997. P. 89—95.
12. Tingey R.J. The regional geology of Archaean and Proterozoic rocks in Antarctica / Ed. Tingey R.J. // The geology of Antarctica. Oxford: Clarendon Press. 1991. P. 1—58.

Геодинамика береговой зоны Ладожского озера под влиянием выпуска сточных вод целлюлозно-бумажного производства по материалам дистанционных съемок

Т.А. ПОПОВА, Н.Н. СЕМЕНОВА, Е.В. ЛЕОНТЬЕВА

Изучение геодинамики береговой зоны проводилось в юго-восточной части Волховской губы Ладожского озера. Цель исследования — проведение мониторинга геодинамики береговой зоны и оценка влияния на нее антропогенного фактора — выпуска сточных вод целлюлозно-бумажного производства.

Ставились следующие задачи:

определить оптимальные виды материалов дистанционных съемок (МДС), а также природные и технические условия их получения, необходимые для достижения этой цели;

проследить динамику береговой зоны за 14 лет;

изучить ландшафтную структуру прибрежной зоны;

определить загрязняющее воздействие сточных вод Сясьского целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК) на прибрежный ландшафт и акваторию Волховской губы.

Поставленные задачи решались путем проведения экспериментальных аэросъемок, аэровизуальных наблюдений, анализа космических снимков и комплексных полевых работ.

Экспериментальные съемки проводились ежегодно с 1977 по 1990 г. Основными материалами служили изопанхроматические пленки, в меньшем объеме — пан- и ортохроматические, спектрально-аналитическая, цветная. Проведена также съемка камерой МКФ-6 и аппаратурой «Вулкан». Получены материалы в разных масштабах (от 1:3000 до 1:25 000) для всех сезонов (с мая по декабрь). Банк данных содержит 45 комплектов аэрофотоснимков (АФС), 1 комплект снимков МКФ-6 и 4 фильма, полученных аппаратурой «Вулкан», кроме того мы располагали космическими снимками — сканерными Ландсат 1975 г. и фотоснимками июня 1980, июля 1981 и 1989 гг.

Во время аэровизуальных наблюдений зарисовывались потоки воды разной спектральной яркости, по которым можно судить о загрязнении озера сточными водами и направлении поверхностных течений.

Комплексные полевые работы проводились на основе АФС и включали описание рельефа, почвенных разрезов, растительности и полевое дешифрирование. Из почвенных разрезов по генетическим горизонтам отбирались образцы, которые были подвергнуты спектральному анализу на содержание свинца, цинка, меди, никеля и хрома.

В камеральных условиях проведено сопоставление описательных, аналитических и дистанционных данных, на основании чего были составлены карты: ландшафтная, почвенно-экологическая, растительности, динамики береговой линии, ареала массового загрязнения подводного склона отходами ЦБК.

Ладожское озеро — крупнейший пресноводный бассейн Европы, его площадь приближается к 18 тыс. км². По морфологии берегов и рельефу дна котловина озера разделена на две части: северную и южную. Северная — глубоководная, с расчлененным рельефом дна и сложной береговой линией; южная — относительно мелкая, является областью озерной аккумуляции. Береговая линия имеет плавные очертания, три крупных залива (губы) чередуются с мысами. Берега мало изрезаны. Характер береговой линии прекрасно проявляется на космических снимках.

Наши исследования проводились по юго-восточному побережью Ладожского озера от устья р. Назия до устья р. Обжанка и фрагментарно по северному побережью. Однако в данной работе использованы материалы по юго-восточной части Волховской губы от устья р. Сясь до устья р. Воронежка.

Волховская губа, как и вся южная часть озера, мелководна. Подводный береговой склон пологий, 5-метровая изобата удалена от берега местами на 7—10 км.

Дно губы выстлано преимущественно песчано-гравийным материалом и только на значительном удалении от берега, за изобатами 8—10 м, сменяется песками волнового поля [2].

Береговая линия центральной части Волховской губы, от устья р. Волхов до устья р. Сясь, вытянута близшироко, а за р. Сясь в сторону р. Воронежка плавно поднимается на север. В этой части акватории подводный склон более крутой, чем в западной, и 5-метровая изобата расположена ближе к берегу.

По имеющимся наблюдениям [2], седиментационный материал в этой части губы поступает за счет абразии берегов и в меньшей степени от размыва дна и выноса рек. По нашим наблюдениям за 14 лет и сравнении с АФС 1937 г., вынос материала р. Волхов, Сясь и Воронежка достаточно велик. Об этом свидетельствуют шлейфы взмученных вод и аккумуляция песчаных наносов в устьях рек, рост баров и образование островов.

Разные оптические свойства природных объектов суши и водных масс акватории, разномасштабность исследуемых объектов, высокая динамичность процессов, осложненных антропогенным влиянием, обусловили необходимость использования разнообразных МДС.

По космическим снимкам получено представление о форме чаши озера, характере береговой линии, особенностях водосбора, общем переносе загрязненных вод в Волховской губе. Для слежения за шлейфом сточных вод Сясьского ЦБК и его перемещением использованы АФС масштабов 1:5000 — 1:20 000. Тон изображения шлейфов зависит от типов загрязнителя и материалов съемки. На отпечатках с изопан- и панхроматических пленок (Т-17, Т-15, Т-10, Т-22) изучаемый шлейф изображен обычно довольно темным серым тоном. При отсутствии волнения сквозь загрязненные воды просматриваются подводные береговые валы. Цветные отпечатки с пленок СН-6М и ЦН-3 менее пригодны для этих целей.

Сточные воды характеризуются более высокой, чем озерные воды, температурой и как температурная аномалия изображаются на тепловых снимках в зоне 8—13 мкм очень светлым тоном. Весной и осенью, когда разница в температурах особенно велика, шлейф выглядит белым на очень темном фоне озерных вод. Нефтяное загрязнение акватории регистрируется с помощью радиолокационной съемки (РЛС). Нефтяная пленка гасит свойственную свободной водной поверхности «шероховатость», вследствие чего нефтяные пятна выглядят на РЛ-снимках почти черными на фоне пестрого рисунка серых тонов — обычного изображения воды с волнением или рябью.

Общая структура ландшафта изучалась по АФС масштаба 1:20 000—1:10 000. Серии береговых валов прекрасно прослеживаются на пан- и изопанхроматических АФС благодаря различию в растительном покрове валов (леса) и межваловых понижений (болота). Более подробная характеристика ландшафта получена по крупномасштабным АФС (1:3000—1:10 000) с аналогичных пленок и дополнена по цветным отпечаткам с пленки СН-6М. Оптимальное время съемки для изучения растительных сообществ — вторая половина лета — начало осени, что обусловлено поздним развитием растений на заливаемых участках и мелководьях. Для слежения за сезонными изменениями необходимы АФС всего вегетационного периода, начиная с мая.

При изучении динамики береговой зоны необходимо учитывать многие факторы: характер природы побережья, гидродинамический режим акватории, рельеф подводного склона, характер многолетних циклов водности, антропогенное влияние.

Циклические колебания водности для Ладоги изучены на протяжении длительного времени. Зарегистрированы многоводные фазы: 1899—1906, 1923—1936, 1953—1959; маловодные фазы (спада уровня): 1907—1922, 1937—1952, 1960—1977 гг. [1, 8]. Как видно из приведенных данных, продолжительность фаз колеблется очень значительно. Считается, что для Ладожского озера колебания водности не имеют большого значения, поскольку озеро характеризуется замедленным водообменом. Однако в южной мелководной части озера колебания водности ведут к значительным изменениям во всех процессах. В 1940 и 1973 гг. годовой уровень упал на 1 м ниже средней отметки, что привело к обнажению в южной и юго-восточной частях озера 26% площади литорали [1].

Наши наблюдения начаты в 1977 г., который пришелся на конец маловодной фазы, когда уровень водного зеркала был ниже среднего многолетнего на 40 см. В 1978 г. уровень зеркала был все еще ниже среднего многолетнего на 20 см, после чего началась многоводная фаза [1], которую охватили последующие наблюдения.

Антропогенным фактором, вызывающим перестройку ландшафта, является выпуск сточных вод ЦБК. Промышленные стоки помимо коры, древесины, лигнина содержат отработанные растворы (щелочи, органические соединения, свободный и связанный едкий натр, соду, сернистый натрий). В местах скопления донных отложений, осевших из таких промышленных стоков, создаются анаэробные условия, в которых целлюлоза разлагается с образованием метана, сероводорода и других дурно пахнущих газов.

Сясьский ЦБК основан в 1928 г. на берегу р. Валгомка в 4 км от Ладожского озера. 40 лет комбинат работал не имея очистных сооружений и сбрасывал в Ладожское озеро неочищенные отходы производства. С 1968 г. запущена станция механической и позднее (1978 г.) биологической очистки. Однако и после очистки сточные воды содержат большое количество вредных веществ. По данным на 1990 г., Сясьский ЦБК ежегодно сбрасывает 23 тыс. т сухого вещества [6].

Промышленные стоки идут по общему наземному коллектору, который пересекает озерную равнину и на южном берегу Староладожского канала переходит в трубопровод, проложенный под каналами. На северном берегу Новоладожского канала трубопровод делится на шесть веерообразно расходящихся труб. Их оголовки приурочены к северному склону берегового вала. Сточные воды мощными потоками изливаются из оголовков труб на широкие бетонированные лотки, а дальше вырабатывают русла в рыхлых отложениях и пробивают путь к озеру. На своем пути они пересекают низкие береговые валы, межваловые понижения, пляж (рис. 1). Стадии развития растительности этого участка позволяют предполагать, что при строительстве выпуски были заложены в непосредственной близости к береговой линии и открывались в акваторию.

Наблюдения в районе выпуска сточных вод на протяжении 14 лет показали значительные изменения в положении линии берега и подтвердили их связь с фазами водности бассейна и зависимость от аккумуляции взвесей из промышленных вод. Процесс аккумуляции, в свою очередь, зависит от деятельности ЦБК и ветро-волновых процессов на акватории. Для установления динамики берега были отобраны АФС разных лет: выполненные в одни и те же сезоны, примерно в равных погодных условиях, на изопанхроматическую пленку. Проведена фотограмметрическая коррекция, аэрофотоснимки трансформированы и приведены к единому масштабу. На АФС 1978 г., на котором суша занимала близкую к максимальной из зарегистрированных площадь, нанесены линии берега с других АФС. Кроме того по границе устойчиво сформированной растительности определена предположительная линия берега на время строительства комбината, которое приходится на многоводную фазу, продолжавшуюся с 1923 по 1936 г. [9]. Таким образом, составлена карта динамики береговой линии на фотооснове (см. рис. 1, а).

Наблюдения за динамикой береговой линии подтверждают, что 1977 г. был самым маловодным за время наблюдения, а 1985—1990 гг. соответствуют многоводной фазе акватории. В 1977 г. расстояние от выпусков до уреза воды достигало 500 м, а в 1990 г. 70—130 м, при этом разрушилась полоса побережья шириной около 400 м.

Прогноз изменения линии берега на конкретные сроки затрудняется тем, что чередующиеся многоводные и маловодные фазы варьируют по продолжительности. В связи с этим целесообразно продолжать мониторинг в этом районе.

Седиментация механических взвесей из промышленных стоков, последующие процессы переформирования — наносы озерного песка при нагонных ветрах, перемирование отложений, переслаивание — привели к многократным сменам растительного покрова, созданию специфических почв, изменениям в ландшафте.

Волховская губа, по систематическому делению ландшафтов, разработанному А.Г.Исаченко [4], относится к бореальным умеренно континентальным южнотазовым ландшафтам платформенных равнин на озерно-ледниковых песках.

Участок расположен в пределах нижней [8] плоской озерной террасы Ладожского озера на гипсометрическом уровне 4,3—8,5 м. Для этой территории характерно чередование облесенных береговых валов и заболоченных понижений между ними. Почвы формируются по типу аллювиальных, по характеру увлажнения относятся к гидро- и полугидроморфным, за исключением почв наиболее выраженных в рельефе береговых валов. В отличие от нормальных аллювиальных почв, развивавшихся на озерной пойме, в профиле которых выделяется природный слоистый материал (песчаный, супесчаный, илистый), здесь сильно влияние промышленных стоков — слоистость создается чередованием слоев природного и техногенного происхождения и морфологически выражена очень контрастно. Техногенные слои сформировались из взвесей сбросов ЦБК и представляют собой массу небольших (обычно от первых сантиметров) разлагающихся обломков коры и измельченной древесины, темноокрашенных, пропитанных щелочами, с характерным блеском — в сбросовых растворах, вероятно, был обилён серный колчедан. Органическое происхождение основной массы материала, слагающего эти отложения, позволяет определять их как органо-техногенные.

Ландшафт на рассматриваемом участке (рис. 2) представлен урочищами: береговых и техногенного валов, межвалового понижения, берегового склона, прибрежной отмели и островами, формирующимися на приустьевой отмели р. Сясь (за пределами приведенного фрагмента карты). Значительная часть участка сложена либо техногенными отложениями сбросов Сясьского ЦБК, либо их сочетаниями с озерными песчаными отложениями и торфами. Отложения сбросов ЦБК встречаются в шурфах и прикопках на протяжении около 2 км к северо-востоку от выпусков сточных вод.

Полностью техногенным является вал, на этом участке сливающийся с естественным береговым валом, по юго-восточному краю которого был проложен Новоладожский канал. Искусственный вал с крутыми склонами сейчас практически полностью закреплен растительностью. На вершине и склоне к Новоладожскому каналу в основном встречаются луга с куртинами кустов и деревьев. Фрагментарно образовались сероольховые леса с участием сосны и ели с кустарниковым и полусорным травяным ярусом — в основном по склону к Ладожскому озеру. При прокладке труб растительный и почвенный покровы вновь были нарушены, сформировались луга, местами появились язвы дефляции.

Техногенный береговой вал примыкает к береговому, поверхность которого слабо наклонена в сторону Ладожского озера и имеет сложное строение. Поверхность вала неоднородна по микрорельефу как вдоль его оси, так и по поперечному профилю. Микрорельеф отчасти

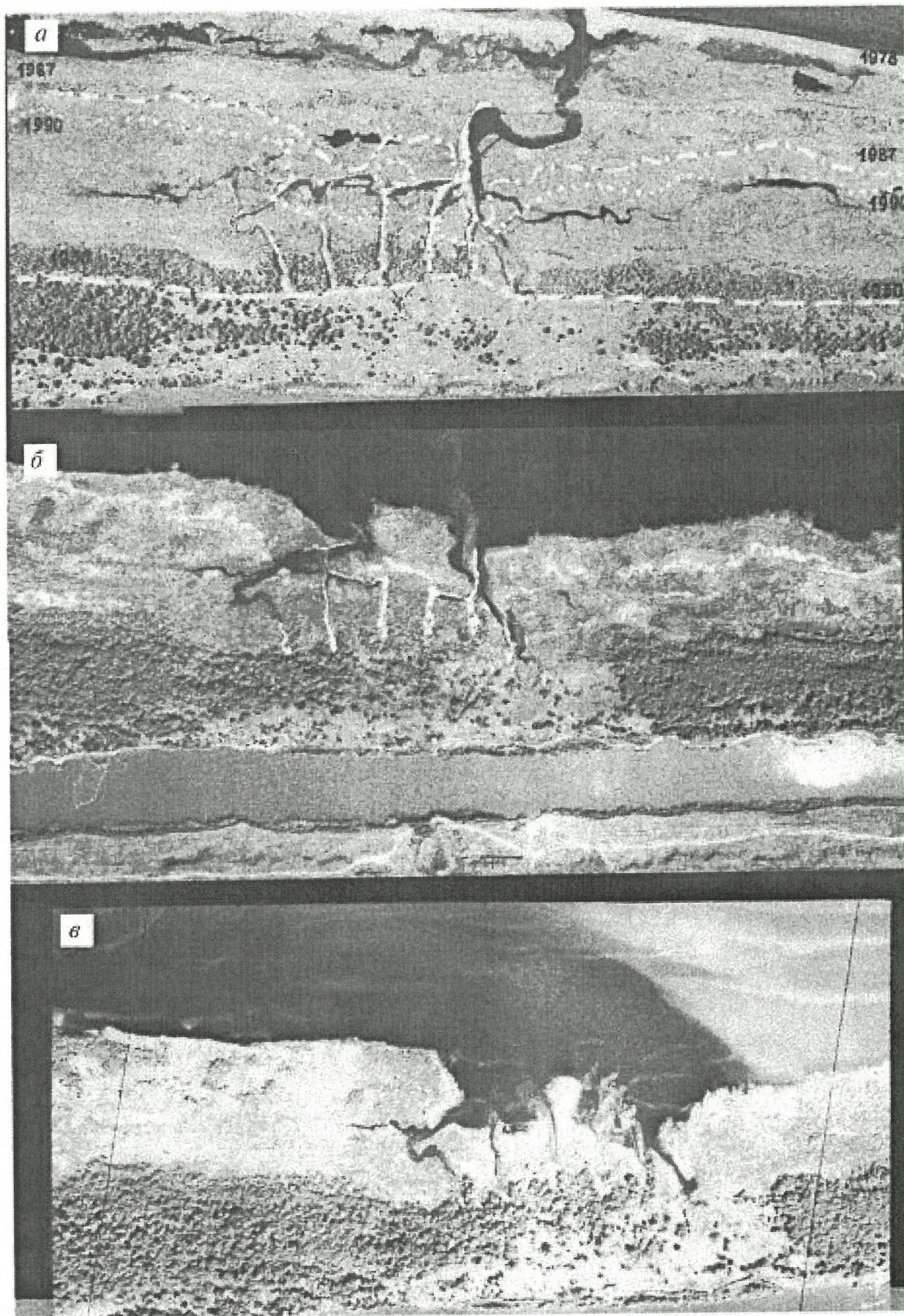


Рис. 1. Динамика береговой линии:

а — АФС 1978 г. (июль), с нанесенными береговыми линиями разных лет; *б* — АФС 1987 г. (июнь); *в* — АФС 1990 г. (июнь); масштаб 1:5000

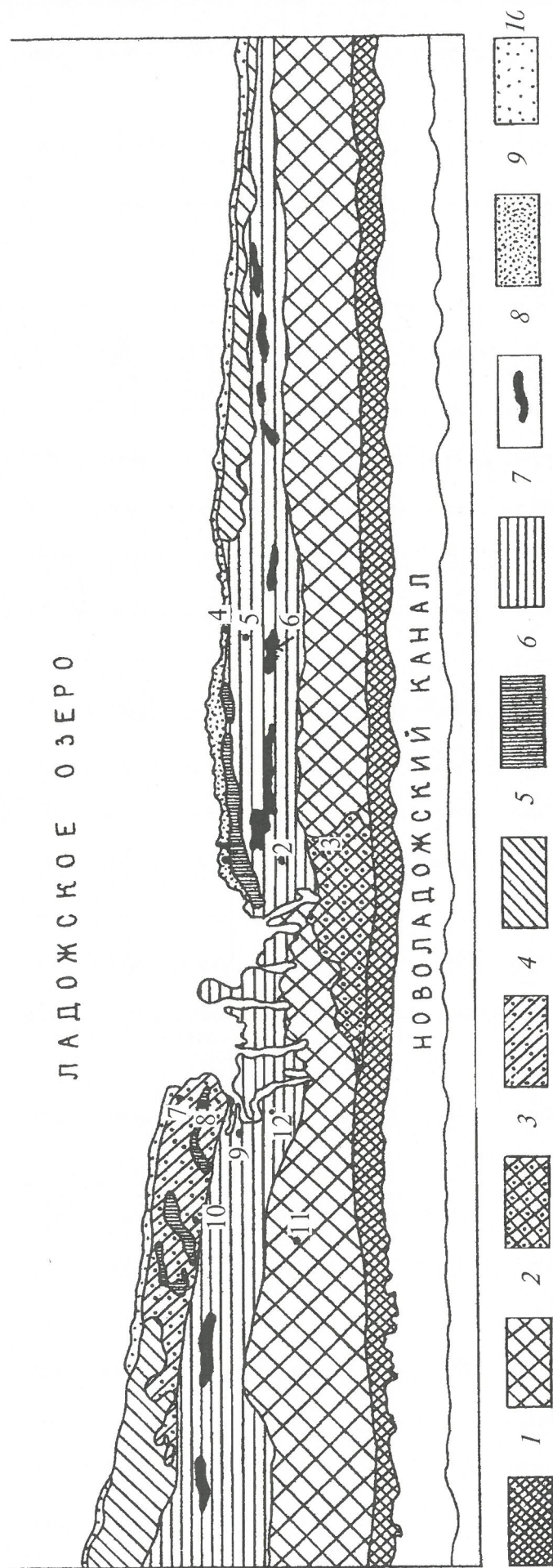


Рис. 2. Фрагмент ландшафтной карты зоны выпуска промышленных стоков Сясьского ЦБК, составлена по АФС 1990 г. м-ба 1:5000, уменьшена в 1,5 раза:

1 — техногенный береговой вал; 2 — береговой вал сложного строения; 3 — луг на перекрытом участке того же вала; 4 — участки с преобладанием травяного покрова в пределах берегового вала; 5 — участки с сомкнутыми ивняками с участком серой и черной ольхи; 6 — участки редкостойных ивняков; 7 — участки луговых и болотных растительных сообществ по органогенно-техногенным отложениям; 8 — «вымочки», наиболее низкие участки без высших растений; 9 — пляж, сложенный техногенными отложениями; 10 — песчаный, слабозаросший пляж; цифры на рисунке — номера почвенных разрезов

выражен строением растительного покрова. Намечающиеся понижения выглядят как «цепочки» прогалин, занятых влаголюбивой травяной растительностью. В верхней его части (вдоль техногенного вала) тянется полоса кустарниково-крупнотравного сероольхового леса с участием ивы и березы с единичной сосной. Высота деревьев около 10 м, сомкнутость крон 0,7—0,8. Ниже местами прослеживается полоса травяного мелколесья и крупнокустарниковых (ива, серая ольха) зарослей. На перерывом при прокладке труб участку встречаются луга. Здесь в более «старых» аллювиальных дерновых почвах процесс гумусообразования выражен наиболее явственно (см. рис. 2, разрез 11). Гумусовые горизонты достигают мощности 0,07—0,1 м, окраска их темная, дернина обычно хорошо сформирована. В нижней части вала ближе к Ладожскому озеру полоса леса и крупнокустарниковых зарослей сменяется густыми тонкоствольными ивняками, местами сероольховыми зарослями высотой 3—5 м, большей частью мертвопокровными. При почти полном отсутствии травяного яруса плохо выражен и гумусовый горизонт. В почвенных разрезах (см. рис. 2, разрез 3) видно участие органо-техногенных прослоек разной мощности. Это подтверждает, как мы и предполагали на основе изучения разновременных АФС, что трубы для выпуска сбросов в момент их закладки находились вблизи уреза воды.

Приладожский береговой вал сформировался при значительном участии массы отходов Сясьского ЦБК, которые переслаиваются с озерными песчаными отложениями и низинными осоково-тростниковыми торфами, образующимися в межваловых понижениях. Участок вала против выхода сбросных труб почти полностью размыт (ландшафтная карта была составлена по АФС 1990 г.). По растительному покрову различаются участки с преобладанием только травяного покрова, участки с более или менее сомкнутыми ивняками с участием серой и черной ольхи и участки редкостойных ивняков. Почвенный покров представлен в основном подтипом аллювиальных слоистых примитивных слабодерновых почв (см. рис. 2, разрез 7). В них отмечаются лишь начатки гумусообразования, отсутствие сформированной дернины. В понижениях формируются почвы с явными признаками оглеения на глубине 15—20 см.

Урочище межвального понижения (см. рис. 2) сформировано под наибольшим воздействием сбросов ЦБК. Его поверхность сложена в значительной мере органо-техногенными отложениями. Здесь распространены сочетания луговых и болотных растительных сообществ. Почти всюду в травостое присутствуют мелкие особи ивы. Выделены и «вымочки» — наиболее низкие участки, где застаиваются талые, дождевые и сбросные воды, практически без высших растений. В межваловом понижении развиваются аллювиальные болотные почвы — торфянисто- и иловато-торфянисто-глеевые. Первые формируются на периферии понижения при детальном грунтовым и поверхностным увлажнением. Верхняя часть профиля этих почв оторфована. Мощность торфяных горизонтов 20—30 см, торф грубый, слабо разложившийся. Он залегает на мелкозернистом песке с явными признаками оглеения и включениями органо-техногенного материала. Иловато-торфянисто-глеевые почвы приурочены к наиболее глубоким центральным частям межвального понижения. Здесь с поверхности залегает слой торфа мощностью 10—25 см, под ним сизовато-темносерый илистый горизонт, сильно обводненный, подстилаемый водоносными песками сизого или голубого цвета, чередующимися с органо-техногенными слоями. Межваловое понижение в зоне выпусков сточных вод подвергается непосредственному затоплению этими водами, почвы испытывают их прямое загрязняющее воздействие.

В пределах урочища берегового склона выделен сложенный техногенными отложениями и песчаный слабозаросший пляж. Зона пляжа 1990 г. являлась частично межваловым понижением 1977 г. Здесь в непосредственной близости от выпусков сточных вод или на некотором расстоянии от них выявлены участки, сло-

женные с поверхности переотложенными, перемытыми органо-техногенными осадками (мощностью 30—50 см), подстилаемые торфом, плавником или песком. Эти осадки практически не затронуты почвообразованием, они легко размываются и являются постоянным источником химического загрязнения. В случае зарастания на них возможно формирование своеобразных техногенных почв. Такие почвы описаны нами в 1979 г., когда площадь техногенного берега была максимальной, под сомкнутым осоково-вейниковым покровом. Под слабо выраженной дерниной в разрезе обнажались разлагающиеся органо-техногенные осадки красновато-лилового цвета с характерным резким «химическим» запахом.

Установлено, что основными загрязнителями являются подвижные тяжелые металлы — цинк, свинец, медь. Содержание малоподвижных никеля и хрома как по площади, так и по разрезу более или менее равномерно и незначительно, их концентрации не достигают ни ПДК, ни средних значений в почвах.

Концентрации подвижных тяжелых металлов значительно варьируют в разных генетических горизонтах (рис. 3). Максимальное содержание всех металлов отмечено в торфяных горизонтах, которые являются мощными геохимическими барьерами, обладая высокой адсорбционной способностью. В торфяных горизонтах в наибольшей степени аккумулируется свинец, затем цинк и медь. Органо-техногенные горизонты по содержанию металлов стоят на втором месте, что можно объяснить слабой дисперсностью, сильной перемытостью материала, рыхлостью и высокой водопроницаемостью слоев. Однако по сравнению с песчаными горизонтами в них отмечается заметная концентрация тяжелых металлов. Строгой закономерности в преобладании содержания того или другого металла в этих горизонтах нет.

Минимальным загрязнением характеризуются песчаные горизонты. Содержание цинка, меди и свинца в них соответственно в 5, 10 и 20 раз ниже, чем в торфяных горизонтах. В пробе, взятой из неоднородного песчаного горизонта (с тонкими органо-техногенными прослойками), содержание металлов значительно выше, чем в однородных по составу песчаных горизонтах (см. рис. 3, разрез 10).

По отношению к ПДК [6] и средним содержаниям в литосфере [3] и почвах [5] металлы образуют следующий ряд по нарастанию этих соотношений: цинк — медь — свинец.

У цинка превышения ПДК наблюдаются только в торфяных горизонтах (до 1,8), в них же цинк превышает и кларковые содержания. Увеличение содержания цинка по отношению к среднему содержанию в почвах отмечается в торфяных (до 5,5) и органо-техногенных отложениях (1,3—2,7 раз).

Медь по сравнению с цинком имеет более высокие показатели. Они превышают ПДК и среднее содержание в почвах во всех горизонтах (редкие исключения в песках). В торфяных горизонтах содержание меди выше ПДК в 3—12 раз, среднего содержания в почвах 3,14—13,7 раз. В органо-техногенных горизонтах эти показатели составляют соответственно 1,9—2,9 и 1,6—3,9.

Свинец имеет наибольшие показатели по отношению ко всем стандартам и во всех горизонтах почвенных разрезов. Содержание свинца превышает ПДК в торфяных горизонтах в 17,5—26,7 раз, в органо-техногенных горизонтах в 1,5—10,4 раза, в песчаных в 1,2—3 раза. По отношению к кларку и среднему содержанию в почвах эти цифры еще больше, достигая в торфяных горизонтах соответственно 33,4 и 55,4.

Наиболее заражено тяжелыми металлами урочище межвального понижения, где находятся выпуски стоков ЦБК, и прежде всего накапливаются содержащиеся в них взвеси, застаиваются талые и дождевые воды. Именно здесь, как указывалось выше, сформировались торфянисто- и иловато-торфянисто-глеевые почвы, в наибольшей степени аккумулирующие тяжелые металлы. По направлению как к береговой линии, так и к

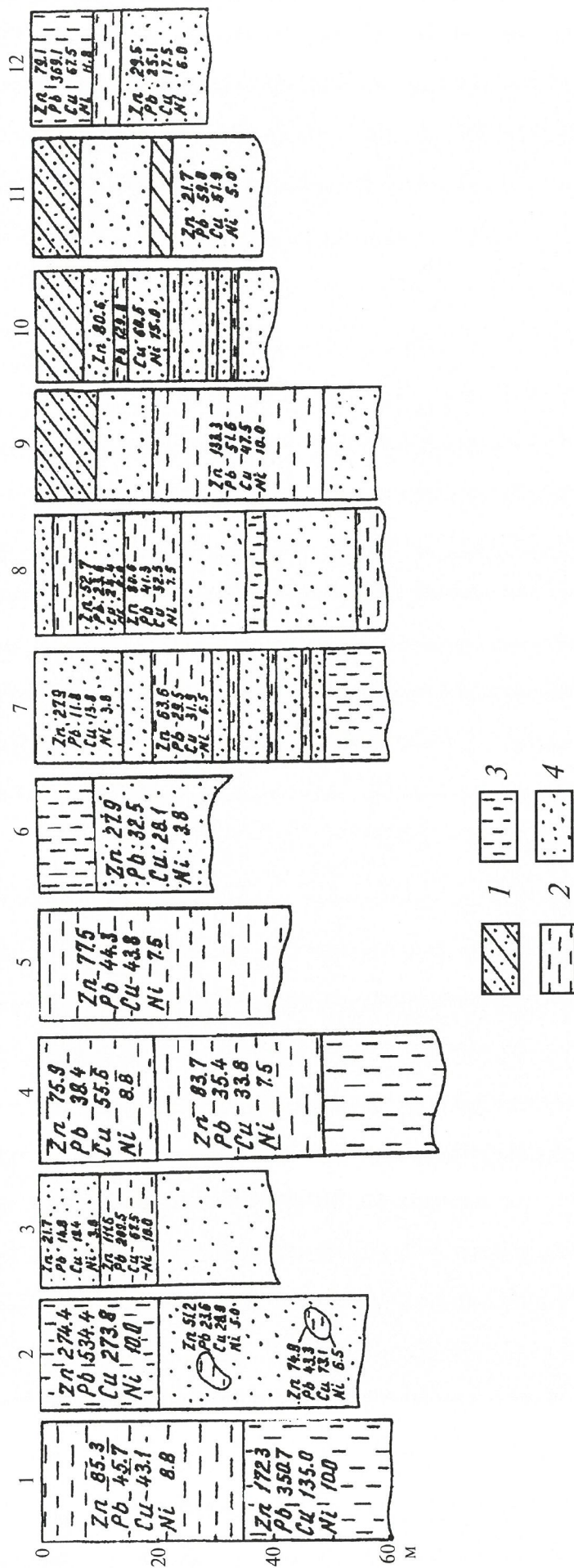


Рис. 3. Концентрация тяжелых металлов в различных почвах в зоне выпусков Сясьского ЦБК (в мг/кг):

1 — гумусированный песок; 2 — органоминерно-техногенный горизонт; 3 — торф; 4 — песок; 1—12 — почвенные разрезы

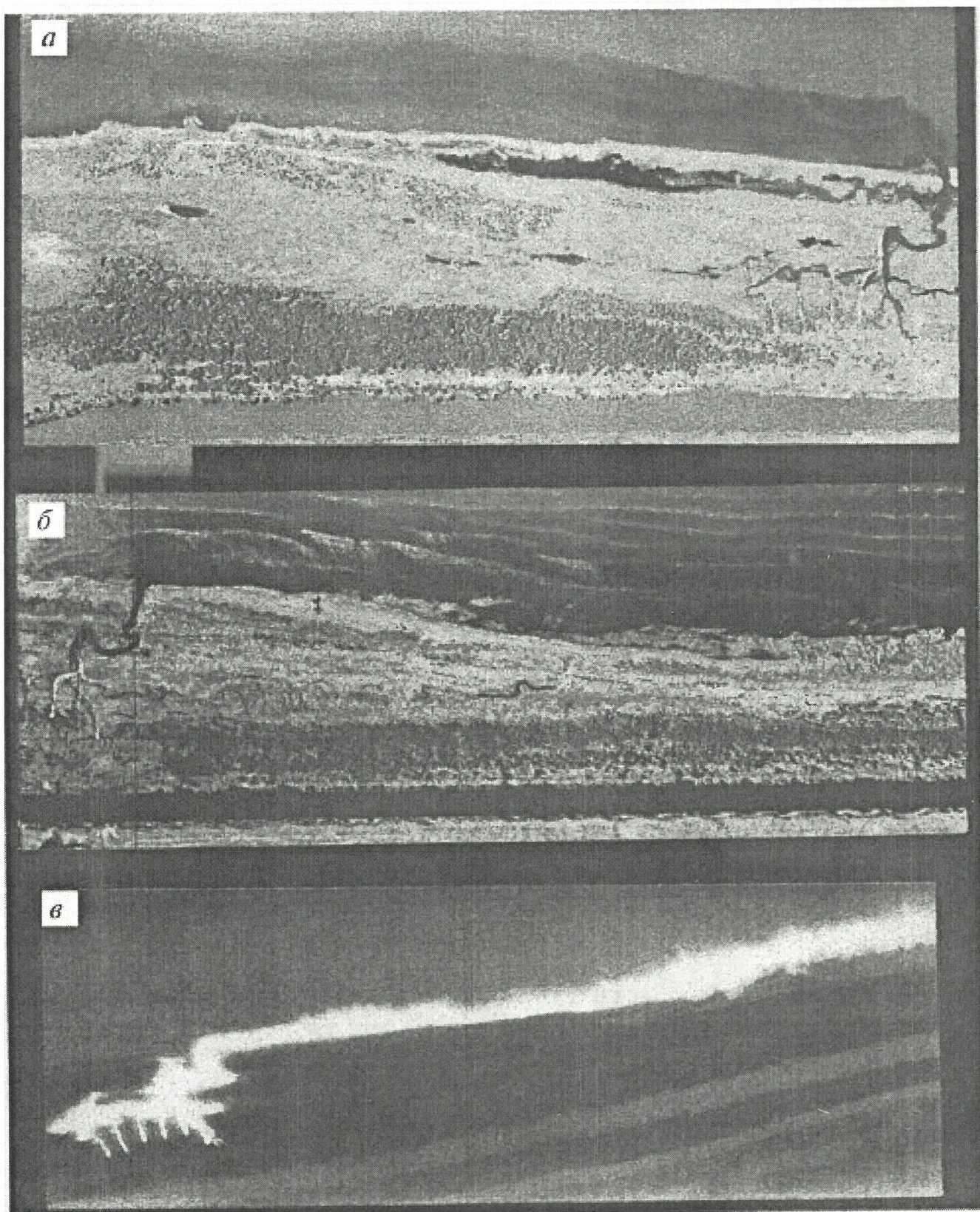


Рис. 4. Распространение шлейфов сточных вод Сясьского ЦБК в акватории Ладожского озера:

направление вдоль береговых шлейфов: *а* — западно-юго-западное (АФС 1978 г., июль), *б* — восточно-северо-восточное (АФС 1979 г., сентябрь), *в* — восточно-северо-восточное (тепловой снимок 1981 г., ноябрь)

Новоладожскому каналу концентрации металлов уменьшаются.

Процессы, происходящие в прибрежной зоне, неразрывно связаны с процессами на акватории. Особенно ярко это проявляется в условиях мелководной Волховской губы. Загрязнение ее происходит через речные воды, за счет поверхностного стока с освоенных территорий, утечек нефтепродуктов от водного транспорта. Свою долю вносит Сясьский ЦБК. Помимо этого загрязнение усиливается при искусственном и естественном взмучивании донных отложений. Загрязненные водные массы перемещаются течениями и вследствие различий в оптических характеристиках чистых и загрязненных вод маркируют направление течений.

Анализ космических снимков и данных аэровизуальных наблюдений показал, что Волховская губа по внутримассовому загрязнению — наиболее грязная в Ладожском озере. По характеру распределения внутримассового загрязнения в губе установлены два основных типа. Первый обусловлен ветрами от северо-восточных направлений до западных через южные, вынос при этом осуществляется в северном направлении через центральную часть губы. Второй тип определяется ветрами от западных направлений до северо-восточных через северные, при которых загрязненные массы перемещаются вдоль восточного берега губы.

Помимо двух основных типов наблюдаются два переходных: от первого ко второму и от второго к первому.

Сточные воды ЦБК, попадая в Волховскую губу, образуют шлейф загрязнения, значительно меньший по размерам, чем, например, от р. Волхов. Однако сточные воды ЦБК отличаются от озерных и речных по физико-химическим характеристикам: высоким содержанием взвешенных частиц, повышенной минерализацией, цветностью и температурой. Они более агрессивны и загрязнение ими более опасно.

По материалам банка данных проведен анализ распространения сточных вод по акватории. Характер шлейфов и дальность их распространения сопоставлялись с данными гидрометеорологической службы на время съемки, фазами водности акватории.

Сопоставление изображений показало, что наиболее ярко выражены и чаще наблюдались два типа шлейфов: вдольбереговые западно-юго-западного и восточно-северо-восточного направлений. В обоих случаях шлейф плотно прижат к берегу, достигает ширины 100—500 м, прослеживается на расстояние 15—20 км.

В типичных случаях шлейф западно-юго-западного направления проходит между правым берегом р. Сясь и островом, смешивается с речными водами и более широким фронтом перемещается дальше на запад (рис. 4, а). Вдольбереговой шлейф восточно-северо-восточного направления является почти зеркальным отражением первого (см. рис. 4, б, в). Обычно он прослеживается до устья р. Воронежка, где смешивается с потоком речных вод и в ослабленном виде прослеживается далее, в сторону устья р. Свирь.

Помимо типичных форм нами наблюдались другие варианты, при которых перемещение сточных вод идет примерно на север. Такое явление наблюдается при ветрах, близких к южному направлению.

В зимнее время, после образования ледового покрова ветро-волновые условия не влияют на распространение сточных вод. Однако они характеризуются повышенной температурой и вызывают образование полыньи. Наблюдались случаи, когда полынья имела вид правостороннего крыла, и другой — полынья в виде распахнутых крыльев. В таких случаях сточные воды, вероятно, скатываются по дну в более глубоководные части озера.

Необычная картина наблюдалась при штормовом северном ветре. Нагонные волны вызвали сильное взмучивание донных отложений, активное перемешивание взмученных вод с промышленными выбросами, что, видимо, тоже приводит к перемещению осадков по дну подводного склона в более глубоководные части.

По данным озероведов, в Ладожском озере существу-

ет система общеозерной циркуляции и полного перемешивания водной толщи. Последнее происходит в период гомотермии, поздней осенью. При этом все вещество, поступившее в озеро в течение года, вовлекается в этот общеозерный процесс [1]. Несмотря на существование этих процессов, седиментация взвесей из промышленных стоков осуществляется прежде всего на суше и мелководной части литорали.

Сопоставление АФС за весь период наблюдений позволило составить синтетическую карту шлейфов загрязнения и таким образом установить ареал наиболее сильного загрязнения промышленными отходами. Ареал имеет вид несимметричного веера с основанием у русла сточных вод. Западная граница ареала проходит западнее устья р. Сясь, восточная — у устья р. Воронежка. Можно предполагать, что ареал загрязнения донных осадков подводного склона шире, чем это определено по МДС.

На основании выполненных исследований, можно рекомендовать технологическую схему изучения геодинамики прибрежных зон в районе выпусков промышленных вод целлюлозно-бумажного производства.

1. База знаний. Источник загрязнения: технология производства, периодичность работы, виды очистки, система выпусков, продолжительность функционирования.

Эксплуатационный водоем: тип водоема, размеры, связь с другими водоемами, состав и трещиноватость подстилающих горных пород, характер водообмена, ветро-волновые явления.

Ландшафтная характеристика: карты, рельеф, литология, растительность, почвы, антропогенная нарушенность.

II. Банк данных МДС. Ретроспективные и новые МДС. Все материалы сопровождаются данными по техническим и природным условиям съемки.

III. Анализ ретроспективных МДС: визуальный просмотр, выявление реперных точек, дешифрирование, попарное сопоставление снимков, составление карт на разные сроки съемки — ландшафтных, береговой линии, границ шлейфов загрязнения.

IV. Определение требований к мониторингу в конкретных условиях (вид съемок, масштаб, частота повторных съемок, направление залетов, сезон).

V. Мониторинг и продолжение формирования банка данных МДС.

VI. Базовые полевые исследования: ландшафтная характеристика, почвенный и растительный покров, химическое опробование отложений, полевое дешифрирование.

VII. Обработка материалов МДС: дешифрирование, фотограмметрическая коррекция снимков, используемых для картирования, составление сигнальных, комплексных и синтетических карт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера.* — Л.: Наука, 1982.
2. *Барков Л.К., Шербаков Е.М., Усенков С.М.* Состав и динамика современных донных осадков южной части Ладожского озера // *Вестник ЛГУ. Геология, география.* 1983. Вып. 1. С. 32—40.
3. *Виноградов А.П.* Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. — М.: Изд. АН СССР, 1957.
4. *Исаченко А.Г.* Ландшафты СССР. — Л.: Изд. ЛГУ, 1985.
5. *Малюга Д.П.* Биогеохимический метод поисков рудных месторождений. — М.: Изд. АН СССР, 1963.
6. *Санитарные нормы допустимых концентраций химических веществ в почве.* САНГИН № 42-128-4433-87. М., 1988.
7. *Программа первоочередных природоохранных мероприятий для Ленинграда, Ленинградской области, Карелии и Эстонии.* Комплексный отчет министерства окружающей среды Финляндии. 1991.
8. *Соколов Н.Н.* Геологическое строение и история развития рельефа Северо-Запада РСФСР // *Северо-Запад РСФСР.* М.-Л., 1949. С. 8—61.
9. *Филатов И.В.* Изменчивость корреляционных связей уровня Ладожского озера // *Вестник ЛГУ. Геология, география.* 1983. Вып. 4. С. 103—105.

Новый метод дистанционного геологического изучения шельфовых акваторий

Е.И. КИЛЬДЮШЕВСКИЙ (ВНИИКАМ), П.С. ВОРОНОВ (СПб ГГИ)

Аэро- и космические снимки при геологическом изучении шельфовых акваторий применяются уже довольно давно. Но обычно их использование ограничивается только узкой полосой прибрежных мелководий до глубины 20—25 м, где удается сфотографировать морское дно, просвечивающее сквозь толщу воды. И лишь в случае исключительно прозрачной воды при съемках из космоса можно получить изображение морского дна на глубине 50—70 м. На большей же части шельфа получить с воздуха или из космоса изображение морского дна невозможно. Можно получить только изображение морской поверхности и приповерхностной толщи воды на некоторую глубину. Если здесь находят отражение какие-либо геологические процессы, протекающие в недрах морского дна (например, извержение подводного вулкана, отражающееся на поверхности воды выбросами пемзы, пара и газов), то на этом основании можно делать определенные выводы о геологии дна. Но такие процессы не часты, наблюдения их еще более редки, и геологические выводы, сделанные на их основе, будут весьма отрывочны и приблизительны. Некоторую информацию о строении морского дна вне зоны его видимости можно получить по радиолокационным снимкам морской поверхности, поскольку тонкая структура поверхностного волнения в определенных случаях может нести информацию о рельефе морского дна либо по материалам спутниковой альтиметрии. Но это опять-таки будут отрывочные и косвенные данные.

Для геологического же картирования необходимы сведения о наличии и расположении на всей картируемой площади хотя бы основных структурно-геологических элементов. До последнего времени эта задача дистанционными методами не решалась, хотя ранее и была сделана попытка такого решения [4].

Ситуация изменилась с появлением цифровых космических снимков. Сотрудниками ВНИИКАМ было замечено, что в прибрежной зоне на морской поверхности по таким снимкам иногда визуальнo выделяются линейные аномалии изображения, которые являются продолжением известных в пределах суши разрывных нарушений. Более детальные исследования, проведенные нами как по снимкам акватории Сахалина, так и по снимкам акватории Печорского и Белого морей, показали, что путем компьютерной обработки цифровых снимков, а иногда и при визуальном их дешифрировании на изображении морской поверхности выделяется густая сеть линейных неоднородностей, аналогичная по структуре схемам дешифрирования снимков суши и совершенно непохожая на схемы дешифрирования каких-либо океанологических объектов.

Схема таких линейных неоднородностей изображения на акватории Печорского моря в пределах листов R-39,40, выделенных по цифровому снимку NOAA по разработанной во ВНИИКАМ программе RSdPS, представлена на рис. 1. На островах и прилегающей материковой суши проведено визуальное дешифрирование линеаментов по фотографическим и сканерным КС (КАТЭ-200,140, МСУ-СК, МСУ-С). Как видно даже без всяких специальных сопоставлений, сеть выделенных элементов как на суше, так и на акватории представляет собой единый как по структуре, так и по направлениям их простираия рисунок. Более того, многие линеаменты, отдешифрированные на суше, находят свое непосредственное продолжение и на акватории. В связи с этим, линейные элементы изображения, выделенные на акватории, по аналогии с сушей также целесообразно называть линеаменами.

Компьютерная схема таких линеаментов акватории, представленная на рис. 1, слишком перегружена мелкими деталями и требует более четкого представления.

Поэтому она была подвергнута визуальной генерализации, результаты которой представлены на рис. 2.

Для более строгого сопоставления сетей линеаментов акватории Печорского моря и прилегающей суши были построены розы-диаграммы простираия выделенных линеаментов (рис. 3). Из сравнения роз *А* и *Б* видно, что как на суше, так и на акватории преобладают линеаменты, простирающиеся в двух направлениях: СВ 45—75° и СЗ 315—355°. Из-за большого количества линеаментов и большого интервала усреднения (10°) роза *Б* не позволяет достаточно подробно дифференцировать составляющие ее системы. Поэтому она была пересчитана с интервалом усреднения 5° (роза *В*). Из сравнения роз *А* и *В* видно, что как на суше, так и на акватории выделяются и совпадают не только общие направления простираия большинства выделенных линеаментов, но и отдельные их системы: 285, 315, 345, 15—25, 45—55, 75—80°.

Район южной части Баренцева моря и прилегающей с суши части Печорской синеклизы геологически довольно хорошо изучен. По работе [10], большая часть всех разрывных нарушений Печорской впадины входит в четыре системы: 325 ± 15 , 0 ± 15 , 50 ± 10 , $90 \pm 15^\circ$. По данным А.П.Агаркова, проводившего в 1983—1986 гг. опытно-методическую геологическую съемку шельфа масштаба 1:200 000 в западной части Чёшской губы, сеть разрывных нарушений здесь группируется в четыре четко выраженные системы: 315—320, 340—350, 40—60° и близкитротную.

Если сравнить эти данные с розами-диаграммами на рис. 3, то видно, что результаты нашего дешифрирования хорошо подтверждаются данными морских и наземных геолого-геофизических работ. Также видно, что на суше четко выделяются все системы, выделенные на акватории. Вместе с тем, на море отсутствует ряд систем, четко представленных на суше (297, 330, 355°). Такое явление вполне объяснимо. Оно, очевидно, является следствием того, что выделение линеаментов на акватории проводилось по более мелкомасштабным материалам, чем на суше, поэтому здесь вполне могли не проявиться некоторые менее четко выраженные направления.

Таким образом, некоторые различия роз для суши и для акватории удивления не вызывают. Удивительно другое — большое сходство этих роз. И из этого сходства можно сделать только один вывод. Поскольку линеаменты на суше выделены по давно уже отработанным методикам дешифрирования линеаментов по КС, не вызывающим уже никаких сомнений в реальности существования этих линеаментов, отражающих реальную сеть разрывных нарушений коренных пород, то сходство с ними линеаментов, выделенных по КС акватории, говорит о том, что эти линеаменты также реально существуют и, очевидно, также отражают сеть разрывных нарушений в коренных породах морского дна. Вопрос — как это происходит?

Прежде всего отметим, что сходная проблема существует и на суше. В литературе по дистанционным методам многократно отмечен эффект «просвечивания» разрывных нарушений коренных пород через мощный покров рыхлых отложений (в некотором приближении водную толщу на акватории можно сравнить с покровом рыхлых отложений). В результате этого по снимку выделяется линеамент, отражающий это разрывное нарушение, хотя на местности каких-либо четких признаков его наличия, как правило, не заметно, что вызывает нередко сомнения в достоверности результатов дешифрирования.

П.С.Вороновым уже давно было предложено объяснение этого феномена «прорастанием» разрывного нарушения через толщу рыхлых отложений [2]. В толще

рыхлых отложений под влиянием миллиарды раз повторяющихся микроподвижек стенок трещин подстилающих коренных пород (под влиянием изменений ротационного режима планеты, приливных колебаний земной коры и др.) над этими трещинами возникают ослабленные, растущие снизу вверх «зоны раструски», вдоль которых в толще рыхлых отложений и на их поверхности усиливается действие различных экзогенных факторов (водная эрозия, линейное расположение растительности и т.д.). В настоящее время наличие таких зон подтверждено и геофизикой. В частности, открыта анизотропия электрических свойств на поверхности рыхлых отложений над зонами разрывных нарушений в нижележащих консолидированных породах [8].

Представляется, что было бы логичным ожидать в какой-то форме отражения разрывных нарушений толщи коренных пород морского дна и на поверхности перекрывающей их водной толщи. Кстати, в работе [8] вскользь отмечено, что анизотропия электрических свойств выявлена также на поверхности льда и воды.

К настоящему времени уже существует довольно много работ, которые подтверждают возможность отражения на поверхности моря «следов» разрывных нарушений в толще коренных пород морского дна. Так, в

работе [3] указывается на факт существования в толще морской воды электрических полей и влияния этих полей на концентрацию фитопланктона. М.А.Холмянский [9] доказал существование в толще морской воды аномалий потенциала естественного электрического поля над зонами разрывных нарушений. Интенсивность этих аномалий бывает достаточна для воздействия на частички органической и минеральной взвеси и образования над зонами разрывных нарушений ее аномальных концентраций.

С.Ю.Баласаян [1] установил неизвестное ранее явление — аномальную суточную динамику локальных геоэлектрических и геомагнитных полей в энергоактивных геологических образованиях (энергоактивных зонах). К таким зонам (т.е. к областям с меняющимися в такт с внешними физическими воздействиями планетарного масштаба свойствами) относятся, в частности, зоны дизъюнктивных нарушений. Наиболее показательным периодическим внешним воздействием можно считать гравитационные приливы поверхности Земли под действием притяжения Луны и Солнца. Вертикальное смещение земной поверхности может составлять здесь до 0,5 м. При этом в зоне разрывного нарушения происходит существенное изменение внутритрещинного и внутривпахового объема, достаточное для периоди-



Рис. 1. Схема линейных неоднородностей цифрового космического изображения акватории Печорского моря NOAA (компьютерное выделение) и визуального дешифрирования линеаментов на прилежащей суше (по фотографическим и сканерным КС) в пределах листа R-39,40

ческого образования каналов высокой проводимости, концентрирующих теллурические и другие электрические токи, действующие в Земле. В результате этого над энергоактивными зонами образуются естественно вызванные высокочастотные электромагнитные излучения.

О.Л.Кузнецов и Э.М.Симкин отмечали [5], что аномалии, образующиеся в зонах разрывных нарушений, имеют комплексный характер. Границы блоков различных порядков — зоны повышенной проницаемости для флюидов, которые под воздействием различных колебательных движений земной коры мигрируют по этим зонам. Это вызывает ряд сопутствующих явлений: изменение электропроводности, возникновение электромагнитного излучения, выход на поверхность газов и др. Таким образом, в зонах повышенной проницаемости (в зонах разрывных нарушений) образуются фильтрационные аномалии — пространственно совпадающие аномалии поля упругости, теплового, электрического и магнитного полей, естественного гамма-излучения, концентрации химических элементов, минеральных новообразований и др.

Факт существования над зонами разрывных нарушений регистрируемых излучений подтвержден данными, полученными при пролетах спутника «Интеркосмос-

19» над зонами глубинных разломов в Баренцевом и Карском морях [6]. При этом были отмечены всплески интенсивности магнитной и электрической составляющих поля низкочастотных излучений и была установлена устойчивость измеряемых параметров на двух витках с интервалом 3 мес при отсутствии каких-либо землетрясений.

В.В.Юшманов и Ф.Н.Рянский [11, 12] писали о структурно-энергетическом каркасе планеты, обусловленном взаимодействием между неравномерно вращающейся Землей и Космосом, их гравитационными и электромагнитными полями и образующем объемную решетку с регулярной ячеисто-блоковой структурой (тектонический каркас). Решетчатый каркас литосферы оказывает (на микроуровне) непосредственное энергетически информационное воздействие на все экзогенные и наземные геосферы, формируя пронизывающий их силовой каркас биогеосферных взаимодействий. В экзогенных геосферах этот каркас почти незаметен и представлен узкими вертикальными пересекающимися зонами разнообразных физических полей и корпускулярных потоков, образующих решетчатую в плане систему (сети Хартмана). Выявленная к настоящему времени взаимосвязь ледового и облачного покровов, а также ионосферы со структурами литосферы и земной

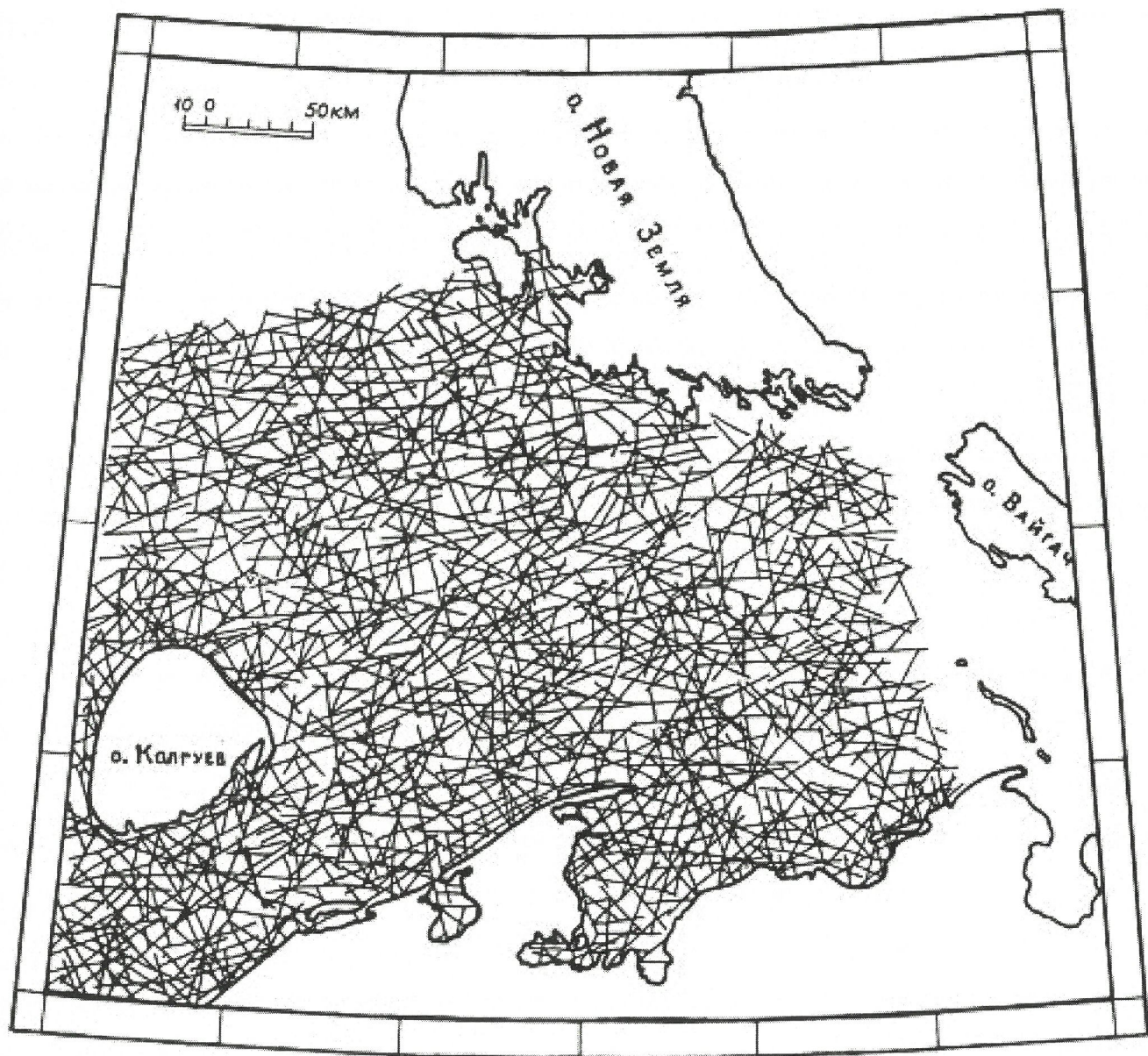


Рис. 2. Схема линеаментов акватории Печорского моря, по результатам визуальной генерализации компьютерной схемы линейных неоднородностей, представленной на рис. 1

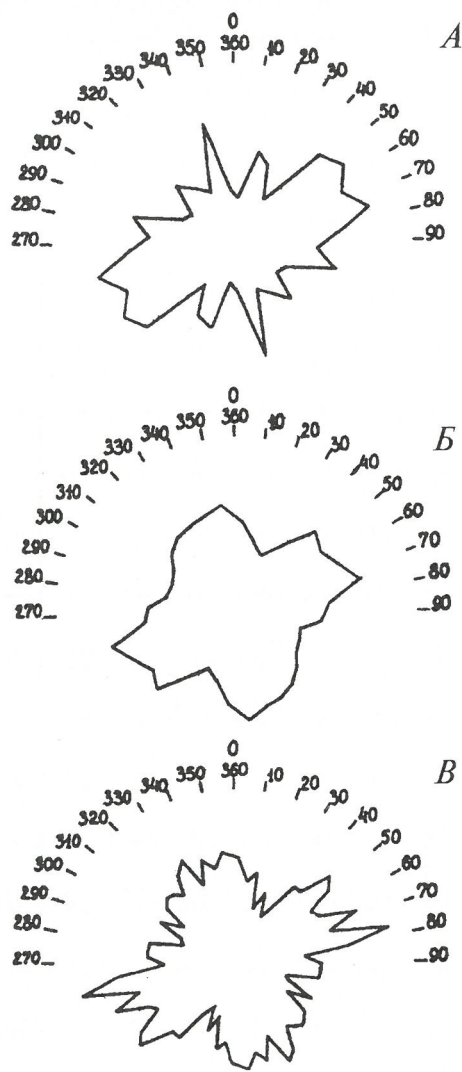


Рис. 3. Розы-диаграммы простираения линеаментов, отдешифрованных в пределах листа R-39, 40:

А — по космическим снимкам акватории Печорского моря (NOAA), Б — окружающей суши (КАТЭ-140, 200, МСУ-СК, МСУ-С), интервал усреднения 10° ; В — интервал усреднения 5°

поверхности позволяет говорить об объективной природе экзогенного каркаса. На земной поверхности он соответствует сети линеаментов с упорядоченной структурой

Таким образом, можно, очевидно, считать вполне обоснованным существование над зонами разрывных нарушений, выраженных на поверхности Земли линеаментами, энергетических потоков, охватывающих земную кору, атмосферу и ионосферу. И, разумеется, гидросферу.

Если на суше выявление сети линеаментов по материалам дистанционных съемок не составляет особых сложностей, то на акватории, ввиду ее крайней изменчивости, это представляется, на первый взгляд, невозможным (за исключением, конечно, прибрежных мелководных зон с непосредственно видимым дном). Однако, если исходить из признания существования над зонами разрывных нарушений аномальных потоков энергии, то вывод получается противоположный. В работе [7, с. 43] сделано такое заключение: «...если линейный источник акустических и электромагнитных излучений находится на дне моря, генерирует электромагнитные и акустические волны и создает перемещение соленой воды, является источником многочислен-

ных пузырьков воздуха, вихревых образований и т.п., то он создает вытянутый постепенно выходящий на поверхность и расширяющийся при приближении к поверхности клинообразный волновод. Такой волновод характеризуется слабыми изменениями температуры, солёности, седиментационного потенциала и т.п., проявляется в виде «следа», который может быть обнаружен аэрофотосъемкой, имеет аномальное волновое сопротивление и служит резонатором для определенного типа волн».

Таким образом, зона разрывного нарушения в коренных породах морского дна может быть «визуализирована» на морской поверхности в виде «следа», или, по аналогии с сушей, — линеамента. Визуально этот «след» будет очень слабо выражен небольшими изменениями цвета или прозрачности воды либо структуры ее поверхности. По этой причине на обычных фотографических аэрокосмических изображениях такие линеаменты, как правило, не видны и лишь на более чувствительных цифровых снимках с применением ряда преобразований появляется возможность их выделения. Приведенные выше примеры по шельфу Печорского моря, очевидно, достаточно убедительно это подтверждают.

Следовательно, можно говорить о появлении нового метода геологического изучения обширных шельфовых акваторий (на исследованных нами участках глубины достигают 100–150 м), позволяющего распространить сферу широкого применения космических снимков на значительные площади акваторий, которые раньше для дистанционных методов были практически недоступны. Изложенные здесь результаты наших исследований необходимо считать лишь предварительными. Они, безусловно, требуют дальнейшей широкой проверки и подтверждения на разных акваториях, прежде всего, в отношении более уверенного выяснения механизма отражения на морской поверхности «следов» разрывных нарушений, локализованных в толще пород морского дна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баласанян С.Ю. Динамическая геоэлектрика. — Новосибирск: Наука, 1990.
2. Воронов П.С., Егорова И.С. Анализ ориентировки спрямленных участков речных долин юго-восточного Таймыра для изучения неотектоники // Тр. НИИГА. 1958. Т. 80. С. 139–148.
3. Деменицкая Р.М., Иванов С.С., Литвинов Э.М. Естественные физические поля океана. — Л.: Недра, 1981.
4. Кобец Н.В. Геологическое и геоморфологическое дешифрирование морского дна по космическим фото- и телевизионным снимкам // Применение новых видов аэросъемок при геологических исследованиях. Л., 1976. С. 21–34.
5. Кузнецов О.Л., Симкин Э.М. Преобразование и взаимодействие геофизических полей в литосфере. — М.: Недра, 1990.
6. Ларина В.И., Мигулин В.В., Сергеева Н.Т., Сенин Б.В. Электромагнитное излучение над глубинными разломами литосферы по измерениям на спутнике // Докл. РАН. 1998. Т. 360. № 6. С. 814–818.
7. Паламарчук В.К., Георгиевская Л.П. Основы прогноза землетрясений на акваториях // Геоинформатика. 1998. № 4. С. 41–43.
8. Панов Б.С., Тахтамиров Е.П. Новое в геолого-геофизических исследованиях // Изв. вузов. Геология и разведка. 1993. № 3. С. 57–67.
9. Холмянский М.А. Локальные естественные электрические поля арктического шельфа СССР // Автореф. дисс. доктора геол.-минер. наук. Л., 1986.
10. Шаблинская Н.В. Разломы по геофизическим данным и их роль в формировании структур Западно-Сибирской и Тимано-Печорской плиты // Разломы земной коры. М., 1977. С. 160–165.
11. Юшманов В.В., Рянский Ф.Н. Использование дистанционных методов при структурно-геоэкологических исследованиях // Тез. докл. Междунаrodn. конф. «Аэрокосмические методы геологических и экологических исследований». С.-Пб., 1994. С. 113–114.
12. Юшманов В.В. Структурно-энергетический каркас Земли и его роль в процессах геоэкологического взаимодействия эндогенной природной среды с биосферой и обществом // Нетрадиционные вопросы геологии. V научный семинар. М., 1997. С. 36–37.

Новое направление в развитии дистанционных методов геологических исследований

Н.Ф. АФАНАСЬЕВ, А.В. ПЕРЦОВ

Аэрокосмические методы исследования природной среды, как известно, объединяют совокупность методов исследования строения поверхности Земли, земной коры, гидросферы и атмосферы с помощью измерений или оценки параметров электромагнитного поля (ЭМП) геосистемы [11]. Их эффективность в решении конкретных задач природопользования зависит от набора используемых параметров и качества моделей интерпретации, которые содержат информацию об отображении структуры свойств исследуемых объектов в структуру регистрируемого электромагнитного излучения (ЭМИ).

Современные системы зондирования регистрируют спектральные компоненты электромагнитного поля в узких и широких интервалах частот, поляризационные компоненты в форме интенсивностей отраженного или вторичного излучения. Поэтому информационные модели изображений представляют собой структуры пространственного распределения интенсивностей ЭМИ. Используемые в процессе дешифрирования изображений интерпретирующие модели являются феноменологическими, неформализуемыми в большей своей части. Попытки повысить эффективность дистанционных методов путем дробления спектра ЭМП и различных преобразований, осуществляемых над интенсивностями излучения и корреляции вычисленных параметров с природными ситуациями, не приносят желаемых результатов. Это свидетельствует об ограниченности той методологии, на основе которой они развивались. Для достижения новых результатов необходимо расширить методологический базис аэрокосмических методов за счет привлечения методологии системного синтеза. Это позволит при описании информационной структуры регистрируемых параметров электромагнитного поля и моделировании вещественно-энергетической структуры исследуемых объектов (геосистем) построить интерпретирующие модели на основе функционального изоморфизма между вещественно-энергетическими структурами объектов и информационными структурами параметров ЭМП.

Как известно, информационные модели материальных систем, используемые для интерпретации наблюдаемых явлений и процессов, порожденные их функционированием и эволюционными преобразованиями, разделены на два класса: генетические и сигнальные.

Генетические модели представляют собой генетические коды; они определяют закономерности взаимодействия системы со средой и законы композиции элементов системы, а следовательно и законы функционирования и эволюции системы в среде. Эти модели, по существу, являются прогностическими, поскольку, установив по данным наблюдений состояние системы в некоторой пространственно-временной структуре среды, можно по модели и состоянию среды точно определить состояние системы и возможные изменения ее состояний и структуры.

Сигнальные модели, среди которых можно выделить пространственно-временные (морфологические), функциональные и эволюционные, представляют собой структуры свойств системы, наблюдаемые в статической, а также в динамически и эволюционно изменяющейся среде. Они являются феноменологическими, внешними. Их использование для интерпретации возможно лишь при наличии модели соответствия состояния среды состоянию исследуемой системы — геоиндикационной структуры. Однако сигнальные модели в принципе не могут быть использованы для прогнозирования поведения системы, т.к. не объясняют причин, порождающих явления (наблюдаемую, исследуемую систему), а лишь раскрывают морфологическое или структурно-функциональное значение явления (фено-

мена) в наблюдаемой действительности. Как известно, поведение любой подсистемы в системе определяется всем комплексом их взаимодействий, которые происходят во всей системе, а не только в ближайшей среде. Для геосистем любого уровня организации полный комплекс взаимодействий реализуется только во Вселенной. Вследствие этого функциональные связи наблюдаемой геосистемы изменяются в функционально-эволюционном движении Вселенной. Поэтому любой феномен в геосистеме есть лишь состояние системы, относящейся к некоторому уровню организации материи на соответствующем отрезке процесса функционально-эволюционных изменений среды. Длительность эволюционного цикла системы некоторого иерархического уровня определяется периодом внешнего воздействия на нее ее надсистемы, космических полей и излучений. В геосистеме максимальный эволюционный цикл надсистемы составляет около 1 млрд лет, а минимальный 160 мин [8] для литосферы и, соответственно, десятки лет и доли секунд для биосферы. Построенные по данным, полученным на небольших интервалах времени изменения состояния среды, модели не позволяют судить о состоянии системы в другие фазы ее эволюционного цикла. Отсюда следует вывод о том, что сигнальные модели не являются прогностическими.

Интерпретирующие модели, построенные на сериях временных рядов сигналов, — прогностические, поскольку по ним может быть оценена тенденция или определена закономерность временного изменения вещественно-энергетической структуры, но лишь на ограниченном отрезке времени эволюционной или инволюционной фазы изменения системы. Они могут быть привлечены для локального прогноза изменения состояний геосистемы. Эти свойства моделей используются при распознавании изображений природных объектов и построении сетевых геоиндикационных структур. Однако эффективность такого подхода остается весьма скромной и, несмотря на широкое применение компьютерных технологий, интерпретация результатов обработки изображений в большинстве случаев осуществляется дешифровщиком.

В теории электромагнитного поля также нет моделей, адекватно описывающих его состояние и структуру. Система уравнений Максвелла, как показали А.Б.Болдырева и Н.Б.Сотина [6], описывает лишь линейное распространение волны электрической поляризации E и распространение направленной вдоль нее спиновой поляризации. Следовательно, информация, заключенная в нелинейностях ЭМП, в этих моделях не учитывается. Поэтому не учитывается она и во всех методах анализа и описания электромагнитного поля, опирающихся на них. Кроме того, постулируемая независимость между частотными компонентами электромагнитного поля в вакууме не реализуется в реальной среде при распространении и взаимодействии излучения с объектом. Поэтому информация, заключенная в этом взаимодействии, учитывается лишь в поляризации, но не полно, т.к. компоненты вектора поляризации считаются независимыми, что исключает получение эффекта взаимодействия между ними, а описание электромагнитного поля, не учитывающее взаимодействия между компонентами, не является системным, полным. Следовательно, при описании взаимодействия излучения с природными объектами необходимо учесть не только различную поляризацию спектральных компонентов излучения, но и взаимодействие между ними. Этот вывод подтвержден экспериментально при исследовании информационной структуры электромагнитного поля поверхности Земли. Установлено соответствие между пространственной структурой композиций, построенных по многоспект-

ральным компонентам ЭМП, и структурой неоднородностей в геологическом строении геосистем различных уровней организации [4]. Обнаружено, что в пространственной структуре композиций многоспектральных изображений проявляются разрывные нарушения в земной коре, пликативные структуры, образования с различными петрофизическими свойствами, выделяются кольцевые структуры. Установлено, что геодиполи различных рангов (домены) [7] отображаются в композициях с положительной и отрицательной взаимосвязями между многоспектральными изображениями. Учет отмеченных обстоятельств позволяет существенно расширить информационные возможности аэрокосмических методов.

Для построения моделей, идентифицирующих геосистему по сигнальной информации, необходимо рассмотреть композицию носителей информации (сигналов) низшего иерархического уровня исследуемой системы (ее элементов) и сформировать на них информационную иерархическую структуру, соответствующую вещественно-морфологическому компоненту геосистемы. В такой модели прослеживается генезис организационных уровней — предопределенность системы ее элементами, компонентами и отношениями между ними, зависящими от условий среды, но не определен генезис первичных элементов, т.к. они вводятся как базовые понятия. Для представления системной модели геосистемы, обосновывающей ее организационную и функциональную структуры, рассматриваются вещественный, энергетический, сигнальный и генетический компоненты и соответствие между ними. В качестве первичных элементов системных моделей этих компонентов используются минералы и их агрегаты, геофизические поля, электромагнитное излучение и генетические матрицы, находящиеся в функциональном соответствии и образующие в условиях изменяющейся среды некоторые композиции. Соответствие сигнальных и энергетических композиций системы ее вещественно-структурным комплексам следует из того, что генетически в системе, как известно, допускаются только такие взаимодействия между ее элементами, которые предопределяются энергетическим и информационным состоянием среды, в которой происходит взаимодействие.

Таким образом, построение модели организационно-функциональной структуры геосистемы, связывающей ее функциональные компоненты и иерархию элементов, и вывод присущих им закономерностей могут быть использованы при создании эффективных интерпретирующих моделей для дешифрирования материалов дистанционного зондирования.

В соответствии с методологией системного синтеза [5] введем четырехкомпонентную модель геосистемы

$$S_M = \{S_B \otimes S_E \otimes S_C \otimes S_T\} A, P, T, H, x, y, z, t$$

с функционально-эволюционной структурой, показанной на рис. 1.

Четырехкомпонентная модель геосистемы (минеральной системы) соответствует современным представлениям минералогии о структурно-вещественном, энергетическом, сигнальном и генетическом компонентах, которые взаимосвязаны и взаимообусловлены функционированием и эволюцией минеральной системы в реальной среде. Эти компоненты S_M системы образуют замкнутые функциональный, эволюционный и функционально-эволюционные циклы ее развития и деградации. Энергетический компонент создает энергетические условия существования структурно-вещественного компонента, и совместно они образуют физическую подсистему минеральной системы. Сигнальный компонент обеспечивает связь между энергетическим и генетическим компонентами, осуществляя информирование генетической подсистемы о состоянии свободной энергии в минеральной системе, и передает управление энергетическим компонентом от генетической подсистемы. Сигнальный и генетический компоненты образуют управляющую подсистему минеральной системы.

Множества M_j^i , $i = \text{в, э, с, г}; j = 0, 1, 2, 3$ представляют собой множества минеральных систем различных иерархических уровней организации: M_0^i — множество атомов и молекул, M_1^i — минералов и их агрегатов, M_2^i — пород, M_3^i — формаций. Элементы множеств $M_{1,2,3}^i$ локализованы пространственно и во времени, поэтому S_M — пространственно и во времени распределенная система. Пространственно-временные структуры элементов минеральной системы представляют собой ее локальные пространственно-временные подсистемы — минералы, породы, месторождения, поля, узлы, районы и другие с иерархо-неиерархической организацией.

Функциональный цикл в минеральной системе формируется по отношениям R_f^i — управления — исполнения между подсистемами — компонентами и по отношениям обратной связи R_d^i между ними в соответствии с законами композиции Z_p^i , определяющими тип взаимодействия, организационное и фазовое состояния эффекта взаимодействия (структурно-вещественной подсистемы компонента). В соответствии со структурой генетической подсистемы — компонента S_T , которая корректируется внутренней средой A , в сигнальной подсистеме-компоненте S_C вырабатывается управляющий сигнал, который изменяет структуру энергетической подсистемы S_E .

Эволюционный цикл в системе формируется по отношениям R_c^j конструирования (организации) и R_d^j деструкции (деорганизации) в соответствии с законами композиции Z_{cd}^j , определяющими условия организации и деорганизации системы. В эволюционном цикле происходит организация иерархической структуры или ее реорганизация, если структура уже создана. Этот процесс реализуется при возрастании и убывании внешнего энергетического воздействия.

Функционально-эволюционные циклы образуются сопряжением функциональных и эволюционных циклов на подмножествах тех подсистем, которые испытывают устойчивое управляющее воздействие или внеш-

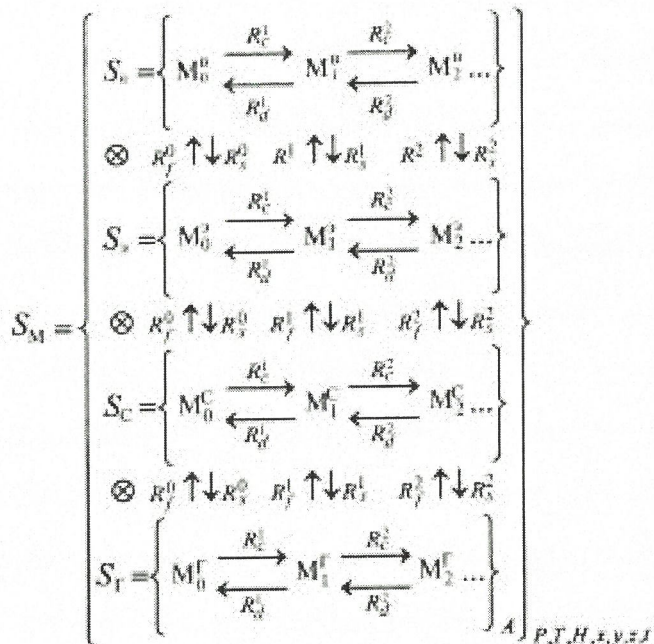


Рис. 1. Функционально-эволюционная структура минеральной системы:

S_B, S_E, S_C, S_T — вещественная, энергетическая, сигнальная и генетическая компоненты S_M системы; $M_0^i, M_1^i, M_2^i, M_3^i$ — множества вещественных, энергетических, сигнальных и генетических элементов; индексы 0, 1, 2 соответствуют минералам и их агрегатам, породам и формациям; R_f^i, R_c^i — отношения парагенетического единства минералов в горных породах и горных пород в формациях; R_d^i, R_a^i — отношения прямых и обратных функциональных связей; $\otimes$ — знак функционального сопряжения; A — условия внутренней среды; P, T, Y, x, y, z, t — условия внешней среды

нее энергетическое воздействие, превосходящее порог чувствительности и устойчивости системы.

Процесс перестройки морфоструктур S_B компонента осуществляется за счет изомеризации структур S_c и S_d компонентов, которая идет с поглощением и/или высвобождением энергии и информации соответствующей интенсивности. Высвобождающиеся энергия и информация по отношению R_c' изменяет структуру надсистемы, принадлежащей к M_{j+1}' , которая затем по отношению обратной связи R_{cb}' изменяет структуру элементов энергетической, сигнальной и генетической подсистем-компонентов. Изменившиеся состояния генетических систем приводятся в соответствие с генетическими подсистемами по отношению R_f' и внутренней средой A . Так достигается адаптация системы к условиям среды.

В результате эволюционно-функционального цикла формируется новый генетический код системы, соответствующий новым условиям ее существования.

Процессы преобразования в эволюционирующей минеральной системе относятся к различным типам системных преобразований. На эволюционной ветви реализуется процесс изомеризации и организации, т.е. процессы создания структур за счет изменения отношений между элементами и формирования иерархических уровней. На инволюционной же ветви реализуются процессы полиморфизации, повышающей разнообразие элементов за счет разрушения изомеров более высокого уровня иерархии. На множестве первичных элементов-атомов возможна только изомеризация по типу взаимодействия. Отсюда следует, что признаками, идентифицирующими объект, принадлежащий минеральной системе, являются изомерия структура ее физических (энергетических, сигнальных) полей и образование пространственно-временного изомера — геодиполя [7]. На фундаментальное значение изомеризации в процессе синтеза природных систем впервые указывал Ю.А. Урманцев [10].

По изоморфизму между вещественной, энергетической, сигнальной и генетической структурами можно утверждать, что любой элемент и компонент минеральной системы есть геофизический (энергетический, сигнальный) или генетический изомер. И, следовательно, проблема идентификации структурно-вещественного разнообразия минеральных систем сводится к идентификации их генетических, энергетических или сигнальных изомеров. Этот вывод имеет фундаментальное значение для определения стратегии развития методов исследования минеральных систем и методов их идентификации по физическим полям, в т. ч. и по дипольному ЭМП. Преимущество такого подхода обусловлено тем, что разнообразие минеральных видов огромно, а разнообразие физических полей ограничено четырьмя. Разнообразие структур ЭМП определяется числом мод в его спектре. Их композиции могут быть построены по семи типам отношений. Это позволяет существенно унифицировать методы исследования, идентификации, систематизации и классификации минеральных систем по сигнальной информации.

Сделанный вывод обнажает ограниченность всех современных геофизических и дистанционных методов геологических и минералогических исследований и служит основанием для перехода к новой методологии и нетрадиционным методам анализа геофизических данных и материалов аэро- и космических съемок.

Информация о дипольном поле геосистем (месторождений в целом), структуре и динамике диполей пород и их морфологических образований, минералов передается на дневную поверхность с помощью электрического тока геосистемы, взаимодействующего с полем дипольных моментов. Структура поля естественно вызванной поляризации (ЕВП) месторождений и других энергоактивных зон определяется вещественным составом, структурой геологических объектов и их энергообменом с вмещающей средой [5]. Элементы энергоактивных зон как высокоскоростные осцилляторы, а среда как медленные осцилляторы, функционирующие в электромагнитном

поле, формируют структуру внешнего поля, индицирующую состояние и местоположение высокочастотных осцилляторов. Высокоскоростные осцилляторы геологического тела, осциллируя с разными скоростями, создают на поверхности запаздывающее поле. Поэтому структура поверхностного электромагнитного поля зависит от пространства и времени.

Дипольный момент каждого элемента энергоактивного геологического образования изменяется во времени в такт с изменением амплитуды внешнего поля, достигая максимума в период его активности. В меняющемся диполе электрический ток создает векторный потенциал в форме сферических волн. Причем пространственные производные векторного потенциала определяют магнитную составляющую поля, а временная производная определяет электрическую составляющую. Таким образом, показано, что естественная поляризация в энергоактивных зонах представляет собой волновой процесс. Интенсивность электромагнитного поля и его электрической и магнитной составляющих зависит от величины дипольного момента и скорости его изменения во времени. Обе эти величины достигают максимума в концентрированном оруденении высокой проводимости. Особенности пространственно-временной структуры поля естественной поляризации в энергоактивных зонах позволяют рассматривать его в виде электромагнитной волны, распространяющейся по энергоактивным природным разрывам различного масштаба как по направляющим системам.

Геологическое образование, представляющее собой геофизический волновод, в силу многофазности, полидисперсности, многокомпонентности состоит из излучателей различной величины, которые возбуждаются широким спектром действующих частот, поэтому каждая из излучаемых волн естественно вызванной поляризации имеет свои амплитуду, частоту и фазу. В результате их взаимодействия каждое геологическое образование будет создавать на поверхности наблюдения интерференционную картину своего суммарного поля естественной поляризации с характерной для объекта пространственно-временной структурой. В результате на любой плоскости, пересекающей волновод, наблюдаются чередующиеся по законам интерференции волн максимумы и минимумы, интенсивность которых может в n раз превосходить интенсивность отдельного излучателя.

Таким образом, пространственно-временная структура волнового поля естественно вызванной поляризации энергоактивных геологических образований представляет собой отображение вещественно-энергетической структуры геологических объектов на поверхности земли.

Сформированная на дневной поверхности пространственно-временная энергоинформационная структура, изоморфная структуре и динамике геологических тел различных уровней и типов организации, при взаимодействии с внешним зондирующим излучением отображается в его структуре. Сформировавшаяся структура излучения представляет собой изомер относительно частот ЭМИ, углов визирования и суммарных дипольных моментов минеральной системы. Теоретическим основанием такого отображения в системе дистанционного зондирования служит системный изоморфизм [9].

Физически механизм отображения реализуется на основе взаимодействия торсионных, спиновых и поляризуемых электромагнитных полей. Суть его состоит в следующем.

Торсионные поля порождаются спиновыми гармониками и электромагнитными полями и проявляются в основном в условиях фазовых переходов и в неустойчивых состояниях систем [1]. ЭМП является неравновесной системой. Геомагнитное поле своей торсионной компонентой индуцирует поляризацию вещества и соответствующую поляризацию излучения, взаимодействующего с ним.

Взаимодействие зондирующего излучения с магнитным дипольным полем поверхности земли порождает

поляризацию излучения, обычно представляемую продольной, поперечной, циркулярной компонентами.

Циркулярная поляризация может быть в зависимости от состояния вещественного и плотностного диполя право- или левоциркулярной.

Над полюсом вещественного диполя высокой плотности формируется магнитное дипольное поле, которое одновременно поляризует излучение, вследствие чего зондирующее излучение различных частот притягивается, образуя положительный изомер ЭМП [+]. Над полюсом вещественного диполя, сложенном породными смесями, магнитное дипольное поле формирует правую и левую циркулярные поляризации. В результате излучения разных частот, взаимодействуя между собой, образуют отрицательный изомер [-], т.к. разноминус циркулярно поляризованные излучения отталкиваются, формируя отрицательные связи.

Право- и левоциркулярные компоненты поляризованного света, взаимодействуя соответствующим образом между собой, индицируют места локализации вещественных диполей.

Специфическая информационная структура внешнего электромагнитного поля и ее динамика, изоморфная структуре и динамике дипольных полей геосистем различных типов и уровней организации, отображается в структуре и динамике зондирующего электромагнитного излучения. Зондирующее электромагнитное излучение, взаимодействуя с изменяющимся магнитным полем дипольных моментов, поляризуется и модулируется им дважды: до и после отражения от объектов дневной поверхности. Компоненты зондирующего электромагнитного излучения различных частот подвергаются различной модуляции, поляризации и фазовым искажениям, которые зависят от углов визирования зондирующей и приемной антенн. Эти факторы влияют также на значения суммарных сигналов, формирующих о суммарных дипольных моментах. Различия во взаимодействии зондирующего электромагнитного сигнала с полем дипольных моментов определяют различия в отношении между компонентами регистрируемого ЭМ сигнала. Поэтому композиции компонентов этих сигналов также являются изомерами и индицируют структуру поля дипольных моментов объекта. Следовательно, отображение внутреннего дипольного поля месторождения в электромагнитное поле, регистрируемое при различных параметрах съемочных систем, есть отображение изомерийной структуры в изомерийную структуру. Это является основанием для привлечения теории изомерии общей теории систем для развития теории дистанционных методов исследования природной среды. В изомерийной системе отношение между компонентами — главное свойство для дифференциации систем и его используют в качестве всеобщего и фундаментального сравнительного признака. Поэтому и пространственно-временная фазовая структура пространственно-распределенной системы энергоактивных образований, представляющая собой изомер, является всеобщим и фундаментальным признаком сходства — различия геологических объектов. Этот признак может быть использован для объективного описания и классификации геологических объектов по данным дистанционного зондирования.

Изомеризация компонентов электромагнитного поля формирует множество изомерийных структур, в частности на основных типах отношений $[[+]]$, $[00]$, $[- -]$. Такие изомеры — индикаторы местоположения энергоактивных процессов в геосистеме, обеспечивают обнаружение этих процессов и порождаемых ими объектов систем, в частности месторождений полезных ископаемых, различными системами зондирования.

Использование изомеризации энергетических и сигнальных полей геосистемы для обнаружения и идентификации геологических структур и месторождений полезных ископаемых возможно на основе использования модели композиций регистрируемых параметров электромагнитного поля и нетрадиционной комплексной обработки многоканальных изображений [2, 3].

Учитывая, что изомерия порождается всеми семью способами преобразования объектов-систем, кроме тождественных, и является их наиболее чувствительным индикатором среди всевозможных других индикаторов, следует признать изомерийную информационную структуру наилучшим признаком для исследования геосистемы дистанционными методами.

Связь изомерии с симметрией позволяет использовать симметрию-асимметрию изомерийных структур регистрируемого дистанционными методами электромагнитного поля в качестве признака надфоновых энергоактивных образований (месторождений полезных ископаемых).

Эффективность методологии системного синтеза, примененной к исследованию геосистемы дистанционными методами, можно проиллюстрировать результатами анализа сигнального компонента геосистемы, зарегистрированного многоспектральной космической съемкой в видимом диапазоне частот электромагнитного спектра. Схема пространственного распределения изомеров электромагнитного поля, построенная по изображениям, полученным системой Ландсат в каналах 4—7, представлена на рис. 2. Тонем выделены 12 классов изомеров, относящихся к поверхностям. Кольцевые структуры изомеров интерпретируются как кольцевые аномалии геофизических полей, обусловленные структурно-вещественными комплексами. Изоморфизм зонально-кольцевых структур, как известно, связан с тем, что локальные объекты создают условия для когерентности, порождая интерференцию электромагнитных волн и зональную концентрацию энергии. Так создаются чередующиеся зоны различной энергоактивности, оконтуривающие локальный объект.

Схема точечного прогноза нефтяной залежи, построенная по дипольным структурам изомеров электромагнитного поля, представлена на рис. 3. Достоверность прогноза залежи оценивается вероятностью попадания точки в ее контур, равной 0,89.

Анализ четырехкомпонентной модели природных объектов, введенной на основе методологии системного синтеза, и закономерностей функционально-эволюционных преобразований, реализующихся в системах, позволил установить, что отображение пространственной вещественно-энергетической структуры природных объектов в пространственную изомерийную структуру компонентов (частотных, угловых, временных, поляризационных) электромагнитного поля, создаваемого этими объектами, является новым методологическим основанием для этапного развития теории и методов дистанционного исследования природной среды, существенно повышающим их эффективность в различных областях природно-хозяйственной деятельности.

Функциональный изоморфизм между вещественными, энергетическими, сигнальными и генетическими компонентами-системами объекта исследований открывает возможность исследовать пространственную (объемную) структуру (энергетическую и морфологическую) объекта на основе анализа изомерийной пространственной структуры регистрируемого излучения.

Появляется возможность решения множества природоресурсных, природоведческих, экологических и других задач, которые не могут быть решены на основе традиционного подхода — анализа интенсивностей интегральных, спектральных, поляризационных или разновременных излучений и их комплексирования традиционными методами (вычисление различных индексов, синтезирование и др.).

В области геологии и геологоразведки: изучение структуры различных горизонтов земной коры, обнаружение разрывных нарушений, локальных пликтивных и зонально-кольцевых структур, локализация энергоактивных зон и месторождений твердых и нефтегазовых полезных ископаемых с выделением рудных тел, нефтяных и газовых залежей, проектирование сети скважин поисково-разведочного бурения на суше и в шельфовых зонах.

В области экологии и оценки чрезвычайных ситуа-

ций: повышение достоверности оценки экологических ситуаций за счет более высокой дифференциации состояний природной среды, локализации и идентификации загрязнений на суше и в водной среде, картирование патогенных зон, экологическое картирование загрязнений тяжелыми металлами и радиационными выбросами и др.; оценка напряжений в земной коре и прогнозирование землетрясений, селей, оползней.

В области управления природно-техническими комплексами: оценка состояния и прогнозирование аварийных ситуаций по данным мониторинга на основе объективных критериев.

Эти возможности могут быть достигнуты при выполнении комплекса теоретических, методических и технологических работ, открывающих новый этап в разви-

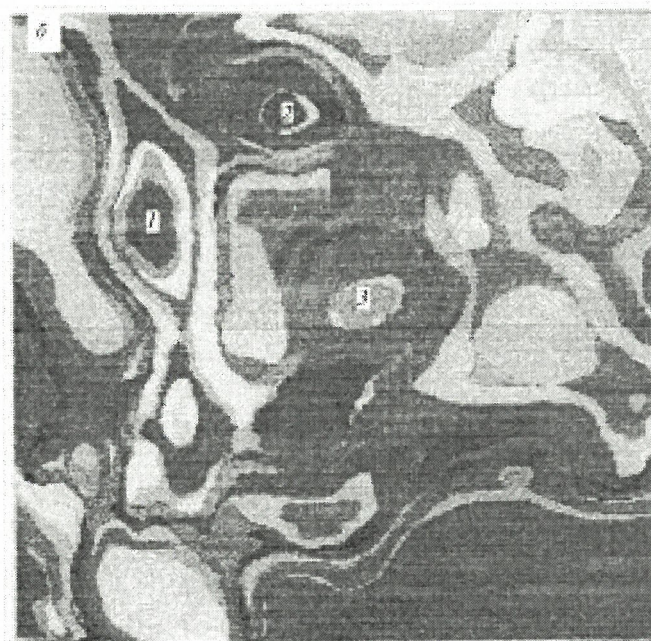
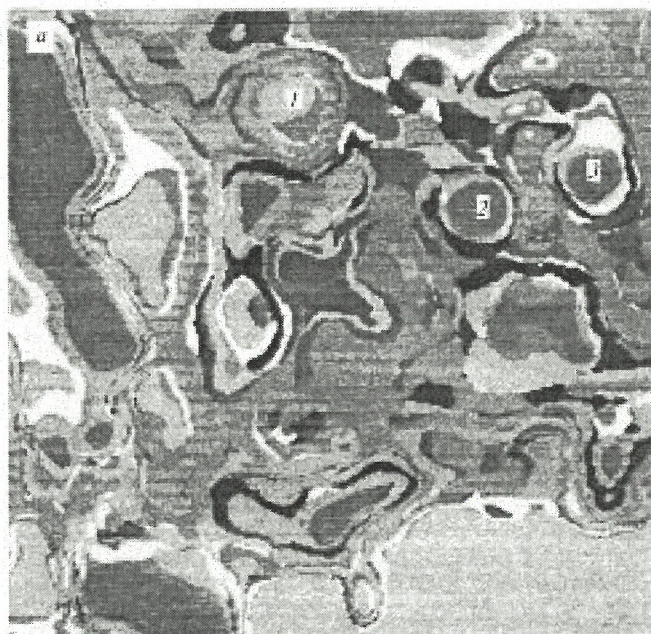


Рис. 2. Изомерийная структура многоспектральных изображений, идентифицирующая зонально-кольцевые структуры, соответствующие структурно-вещественным комплексам кровли (а) и подошвы (б) горизонта на глубинах 3,5 и 4,5 км:

1, 2, 3 — зонально-кольцевые структуры

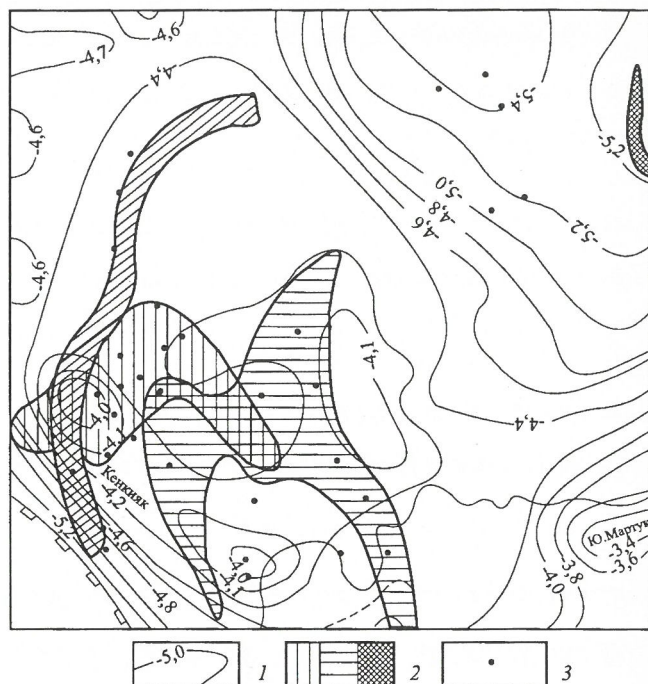


Рис. 3. Схема прогноза нефтяных залежей месторождения по изомерийным структурам многоспектральных изображений, соответствующим различным горизонтам:

1 — изолинии глубины залегания известнякового горизонта P_3 , км; 2 — нефтяные залежи; 3 — точки прогноза

тии аэрокосмических методов исследования природной среды и техногенных процессов. К ним относятся работы по следующим основным направлениям дистанционного зондирования.

В области аэро- и космической съемки:

определение оптимального числа и ширины спектральных, угловых, временных и поляризационных компонентов ЭМИ, регистрируемого системами дистанционного зондирования, для решения различных классов природоресурсных, природоведческих и экологических задач;

обоснование инвариантности частотных, угловых и временных диапазонов зондирования при решении различных классов задач, имея в виду, что все объекты излучают в широком диапазоне спектра ЭМИ и при различных значениях компонентов регистрируемого излучения разным объектам будут соответствовать различные композиции компонентов;

разработка нелинейных и неоднородных физических и информационных моделей взаимодействия зондирующего излучения с физическими полями исследуемых объектов-систем.

В области обработки и интерпретации многоканальных изображений:

развитие теории и методов синтеза оптимальных изомерийных структур ЭМИ по многоканальным изображениям для решения конкретных исследовательских задач;

разработка матриц соответствия изомерийных структур ЭМИ вещественно-энергетическим и информационным моделям исследуемых объектов для обеспечения объективной интерпретации данных зондирования;

анализ изомерийных структур многокомпонентных изображений как описания образов в задачах распознавания информационной ситуации;

создание оптимальных методов и компьютерных систем, реализующих предлагаемый подход в различных отраслях природно-хозяйственной деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимов А.Е., Тарасенко Г.И., Шипов Г.И. Торсионные поля как космофизический фактор // Биофизика. 1995. Т. 40. Вып. 4. С. 939–943.
2. Афанасьев Н.Ф. Композиционное кодирование как способ выделения природных объектов по характеристикам изображений // Автоматизированная обработка данных аэрокосмических съемок при геологических исследованиях. Л., 1984. С. 21–28.
3. Афанасьев Н.Ф. Композиционное кодирование геоинформации при космогеологическом картировании нефтегазоносных территорий // Отечественная геология. 1995. № 2. С. 32–37.
4. Афанасьев Н.Ф. Композиции многоспектральных аэрокосмических изображений Земли как информационные модели структуры геосистемы // Поиск, изучение и освоение открытий в России. С.-Пб., 1992. С. 32–35.
5. Баласанян С.Ю. Динамическая геоэлектрика. — Новосибирск: Наука, 1990.
6. Болдырева Л.Б., Сотина Н.Б. Концепция физического вакуума и экстрасенсорика // Проблемы биополя: Сб. докл. Ростов Ярославский, 1991. С. 82–90.
7. Евзикова Н.З. Концепция дипольного строения геологических тел // Российский геофизический журнал. 1994. № 3–4.
8. Куликович А.Е. Концептуальные основы геологии и геофизики. — Киев: Дом научн.-техн. пропаганды, 1991.
9. Урманцев Ю.А. Общая теория систем (проблемно-теоретический очерк) // Система. Симметрия. Гармония. М., 1988. С. 8–24.
10. Урманцев Ю.А. Поли- и изоморфизм в живой и неживой природе // Вопросы философии. 1968. № 12. С. 77–88.
11. Физические основы и технические средства аэрометодов / Под ред. А.И.Виноградовой, В.Г.Здановича, Е.А.Суппе и др. —Л.: Наука, 1967.

УДК [[519.68:91]+528.8]:551.4.038

© Коллектив авторов, 1999

К вопросу о кадастре морских берегов

С.В.ВИКТОРОВ, Е.И.КИЛЬДЮШЕВСКИЙ, А.А.КИРСАНОВ, А.В.ПЕРЦОВ

Французское слово *кадастр* означает опись и оценку объектов, подлежащих налоговому обложению. В более широком и современном понимании кадастр обозначает характеристику того или иного участка местности и опись, оценку, регистрацию и привязку к местности тех или иных объектов, на ней находящихся. Цель составления кадастра — получение полных и точных сведений о территории и находящихся на ней объектах для рационального хозяйственного использования и планирования развития данной территории. В качестве примера можно привести Единый кадастр Болгарии [1], объектами которого являются: территория страны, полезные ископаемые, прилегающее море, континентальный шельф, воздушное пространство, подземные и наземные сооружения и здания. Единый кадастр состоит из единых специализированных систем, которые должны составляться по единым правилам и на единой основе.

В силу огромности территории России задача составления Единого кадастра в обозримом будущем, очевидно, поставлена быть не может, но составление кадастров отдельных, наиболее важных в хозяйственном отношении территорий, безусловно, стоит на повестке дня. К таким территориям относятся, в частности, берега омывающих Россию морей. Разъяснять хозяйственную важность таких территорий, очевидно, нет необходимости. Разговор может идти лишь о первоочередности кадастрового описания того или иного участка побережья того или иного моря, на чем мы здесь останавливаться не будем.

Вопрос о необходимости составления кадастра берегов морей СССР был сформулирован в 1954 г. В.П.Зенковичем [2]. Задачей было поставлено детальное описание берегов на основе анализа природных условий и сбора разнообразного фактического материала для научного описания каждого участка берега, анализа его динамики, прогноза ожидаемых изменений и оценки пригодности для практического использования с учетом того, что морские берега — очень важный и специфический объект, который развивается по присущим только ему закономерностям. Следует отметить, что к экспедиционным исследованиям по сбору данных для составления кадастра берегов Институт океанологии АН СССР приступил еще в 1945 г. на Черном море, так что методика, излагаемая в работе В.П.Зенковича, опирается на опыт этих исследований. В дальнейшем в соответствии с данной методикой аналогичные работы были проведены на многих морях СССР, что позволило значительно развить и усовершенствовать методику изучения морских берегов и получить массу интересного фактического материала по строению конкретных участков морских побережий.

Однако при рассмотрении предлагаемого В.П.Зенковичем содержания кадастрового описания берегов приходится признать, что оно слишком однобоко и страдает явно выраженным «академизмом». Фактически все ориентировано на научное изучение полосы берега ниже уреза воды и процессов, здесь происходящих. Это очень важно и интересно, но для практического освоения *морского побережья* недостаточно. Ведь жизнь и деятельность человека проходят именно в пределах побережья — достаточно широкой полосы прибрежной суши, где расположены жилые и хозяйственные строения, дороги и т.п., и примыкающей к ней зоне морского мелководья, где развиты прибрежное судоходство, прибрежный лов рыбы, добыча водорослей, находятся объекты мариккультуры и гидротехнические сооружения. Это единый хозяйственный комплекс и разрывать его нельзя. Следовательно, кадастровое описание должно включать весь этот комплекс. Только тогда кадастр морского берега будет полностью удовлетворять практическим надобностям.

Некоторую трудность здесь вносит отсутствие зачастую естественных четких границ берегового природного комплекса. В таком случае, очевидно, можно принять какие-то условные ограничения. Со стороны моря, например, изобата 20 или 30 м. А со стороны суши — линия ближайшего прибрежного водораздела либо, в случае отсутствия такового, расстояние, например, 10 км от береговой линии.

Если проанализировать многочисленные работы, опубликованные во второй половине XX в. в СССР и затем в России, касающиеся изучения морских берегов, то можно заметить, что все они рассматривали какие-либо частные вопросы: геоморфологию, геологию, динамику береговой линии, ландшафты и, как правило, либо для надводной, либо для подводной части, т.е. изучались отдельные элементы, недостаточные для составления кадастра морского побережья. Практически нет опубликованных работ, в названии которых фигурирует слово *кадастр*.

Однако в последние годы вопрос о необходимости составления кадастра морских берегов поднимался неоднократно. Так, в программе «Шельф России», рассчитанной на период до 2005 г., предусмотрено составление карт береговой серии (масштаба 1:200 000) и в итоге создание информационных систем «Геологический кадастр «Шельфы России» и «Государственный кадастр береговой зоны». Предлагалось также выделить отдельную программу комплексного изучения морских побережий «Морские побережья России», одним из результатов осуществления которой должно стать создание «Государственного кадастра морских побережий России» [4].

В 1998 г. во ВСЕГЕИ составлены «Методические рекомендации по составлению кадастра морских бере-

гов» [6]. Авторы рассматривают кадастр как информационную базу для освоения и рационального использования берегов, в основу которого должен быть положен геоэкологический принцип. Это систематизированный свод данных о природной, социально-экономической и экологической обстановке в береговой зоне с максимально детальным описанием всех участков берега, с анализом динамики, прогнозом изменений и оценкой его пригодности для практического использования. Он должен периодически обновляться и пополняться на основании обследований, изысканий и научного изучения. Карты и схемы предлагается составлять в масштабах от 1: 50 000 для ненаселенных и морфологически однообразных берегов до 1: 10 000 для освоенных районов и участков, опасных в смысле природных катастроф.

Со всеми этими положениями разработчиков данных методических рекомендаций следует, безусловно, согласиться. Хотя у нас имеется и ряд замечаний и дополнений, основанных на многолетнем опыте исследований морских берегов, проводившихся во ВНИИКАМ практически с момента образования института (ранее Лаборатория аэрометодов — ЛАЭМ), с 1950 г. Эти исследования обычно проводились с упором на изучение геологии, геоморфологии, ландшафтов и полезных ископаемых по материалам дистанционных съемок. При этом разрабатывалась и методика специализированной аэрофотосъемки морского дна. Учитывая многолетний опыт работ на побережьях почти всех морей России, мы пришли к выводу о необходимости организации комплексного картирования морских побережий, которое должно проводиться на основании широкого использования материалов дистанционных съемок [3].

В результате такого картирования, в первую очередь для важных в народнохозяйственном отношении участков морских побережий (а также побережий крупных внутренних водоемов), должен быть составлен комплект карт, схем и других материалов, характеризующих состояние и хозяйственный потенциал данных участков. Все эти материалы, очевидно, логичнее всего объединить в рамках кадастрового описания. Т.е. описание это должно быть комплексным и нацеленным, в первую очередь, не на чисто научное исследование участка, которое обычно бывает слишком узконаправленным, а на нужды практического, но рационального, научно обоснованного и контролируемого использования данного участка побережья как в настоящее время, так и в будущем.

В связи с этим комплект материалов, предлагаемый к составлению в упомянутых выше методических рекомендациях ВСЕГЕИ, нам представляется неполным. Согласно работе [6], этот комплект должен включать: альбом с текстовой частью (природная и экономико-географическая характеристики бассейна, прилегающей суши и собственно берега с картой-схемой типов берегов; крупномасштабные литоморфодинамические схемы береговой зоны с описанием, фотографиями, промерными профилями и врезками карт различного содержания; текстовые материалы по экологическому состоянию береговой зоны, природоохранным мероприятиям с прогнозной оценкой) и графическую часть.

Как видно, здесь совершенно не учтено то, на чем собственно и развивается морское побережье и от чего в основном и зависит его строение — геологический субстрат и важнейшее производное от него — полезные

ископаемые. Речь, в первую очередь, идет, конечно, о местных полезных ископаемых: песке, глине, щебне, подземных водах и т.д. Здесь следует учитывать и то, что в будущем, с разработкой новых безотходных технологий любая горная порода может, в принципе, стать полезным ископаемым [5]. Так что в любом кадастровом описании местности геологический блок — важнейший, ибо без него невозможна оценка стоимости данной территории, что является одной из основных задач кадастра. А кроме того, имеются еще поверхностные воды, леса, сельскохозяйственные угодья и т.д. Все это, безусловно, должно быть отражено в кадастре.

И последнее. Значительная часть данных для кадастрового описания побережья может быть получена на основе широкого использования материалов дистанционных съемок, в т. ч. разработанной и широко применявшейся ЛАЭМ — ВНИИКАМ специализированной аэрофотосъемки морского дна. При условии широкого использования интегрированных ГИС-технологий сочетание дистанционных данных, материалов полевых проверок и аналитических данных можно значительно упростить и ускорить составление кадастра морского побережья при значительном увеличении точности и надежности результатов. Как нам представляется, вопрос о кадастре морских берегов давно уже пора перевести в плоскость практического исполнения. Первая попытка такого рода, предпринятая во ВСЕГЕИ, и опыт работ по изучению морских побережий во ВНИИКАМ показывают, что назрела необходимость постановки опытных работ по созданию полноценного кадастра одного из конкретных, важных в практическом отношении участков побережья. Например, участка побережья Финского залива. Выбор такого участка представляется оптимальным, т.к. имеется заинтересованная в таких материалах сторона — администрация Ленинградской области, много наработанного к настоящему времени в разных организациях материала и есть специалисты различного профиля, имеющие опыт работы на морских побережьях.

При объединении средств Министерства природных ресурсов РФ, Администрации Ленинградской области и сил некоторых организаций Санкт-Петербурга такая задача представляется вполне выполнимой в короткие сроки.

В дальнейшем, на основании опыта проведенных работ, очевидно, можно ставить вопрос о разработке и принятии Закона РФ «О Государственном кадастре морских побережий России», инициатором и разработчиком которого могло бы стать Министерство природных ресурсов РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жеков Д., Станоев Н. Основные положения Единого кадастра Болгарии // Геодезия и картография. 1990. № 10. С. 35—37.
2. Зенкович В.П. Кадастр берегов морей СССР // Тр. ин-та океанологии АН СССР. 1954. Т. 10. С. 35—43.
3. Кильдюшевский Е.И., Сорокина А.Л., Петров К.М. Комплексное картирование морских побережий как основа рационального природопользования // Отечественная геология. 1994. № 6. С. 69—72.
4. Лопатин Б.Г., Суздальский О.В. Проблемы морских берегов и экологии. Хроника совещаний // Вопросы картирования прибрежного мелководья Баренцева и Белого морей. С.-Пб., 1997. С. 106—110.
5. Шарапов Н.П. Метагеология. — М.: Геоинформмарк, 1996.
6. Шурыгин А.Г., Спиридонов М.А. Методические рекомендации по составлению кадастра морских берегов // Ежегодник ВСЕГЕИ. 1998. С. 75—76.

29—30 марта 1999 г. в Санкт-Петербурге на базе ВНИИКАМ по инициативе Министерства природных ресурсов РФ было организовано совещание «Применение автоматизированных компьютерных технологий получения и обработки данных дистанционного зондирования Земли для ведения мониторинга экзогенных геологических процессов». В совещании приняли участие 35 специалистов из МПР России, СЗРГЦ, Госцентра «Геомониторинг», СЕВМОРГЕО, ВСЕГИНГЕО, ТЦ «Томскгеомониторинг», ГПП «Севосгеологоразведка», МГУ, ПНИИИС Госстроя РФ, ВНИМИ, ВостСибНИИГТИМС (Байкальский РИКЦ), ИТЦ СканЭкс, фирма «Агрохимбезопасность» и ВНИИКАМ. Вниманию присутствующих были предложены 13 докладов, видеофильмы, демонстрация программного обеспечения.

Во вступительном слове М.В.Кочетков, заместитель начальника Департамента геологии, гидрогеологии и геофизики, отметил, что в настоящее время проектируется система государственного мониторинга геологической среды (ГМГС). Именно сейчас и нужно определить место космических методов в общей системе мониторинга экзогенных геологических процессов, опираясь на 50-летний опыт по использованию материалов дистанционного зондирования при региональных геологических работах и картировании. Дистанционные методы приобретают все большее значение для изучения и мониторинга окружающей среды. В частности, велико значение этих методов для контроля за паводком, фиксации и отслеживания динамики инженерно-геологических процессов на территориях, пораженных опасными эрозийными геологическими процессами. Однако система мониторинга развита слабо. Существуют проблемы по интерпретации и количественной оценке.

На совещании было отмечено следующее.

1. Ведение мониторинга экзогенных геологических процессов (ЭГП) в системе государственного мониторинга геологической среды (ГМГС) осуществляется в виде площадного изучения развития и активизации опасных геологических процессов с использованием традиционных наземных методов обследования на опорных стационарных участках и пунктах с оценкой состояния геологической среды. Дистанционные методы при ведении мониторинга ЭГП применяются ограниченно в виде эпизодических аэрофотосъемок. Крайне редко на стадии регионального инженерно-геологического изучения пораженности территории геологическими процессами используются данные космического зондирования Земли.

2. Значительное сокращение объемов работ по ведению мониторинга ЭГП, обусловленное сложностью экономической ситуации в стране, привело к прекращению площадного обследования территорий; существенному сокращению наблюдательной сети; свертыванию стационарных наблюдений на участках III категории.

В этих условиях эффективность мониторинга ЭГП может быть существенно повышена за счет более широкого применения данных дистанционного зондирования Земли (материалов космосъемок, плановых и перспективных аэрофото- и видеосъемок).

Сдерживающими факторами широкого внедрения методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в

практику работ по ведению мониторинга экзогенных геологических процессов являются:

отсутствие единой методологии применения методов ДЗЗ для ведения мониторинга геологической среды;

низкий уровень внедрения современных информационных технологий обработки и дешифрирования материалов дистанционного зондирования для решения задач мониторинга ЭГП;

отсутствие отечественных специализированных космических аппаратов, ориентированных на решение задач природопользования и охраны окружающей среды;

низкая разрешающая способность практически доступных космических изображений.

На совещании были приняты следующие рекомендации.

1. Предложить руководству Министерства природных ресурсов Российской Федерации совместно с заинтересованными министерствами и ведомствами:

сформировать единый подход к комплексному использованию космических технологий для решения задач природопользования и охраны окружающей среды;

рассмотреть вопрос создания и внедрения космической технологии, ориентированной на комплексное решение задач природопользования и охраны окружающей среды, включающей запуск специализированного космического аппарата и организацию единой наземной сети приема и обработки природоресурсных данных ДЗЗ.

2. Предложить Департаменту геологии, гидрогеологии и геофизики, Управлению ресурсов шельфа и Мирового океана, Управлению науки включать в программы региональных геологоразведочных работ на 2000 г. и последующие годы работы по внедрению автоматизированных компьютерных технологий дистанционного зондирования Земли для решения комплекса задач по региональным геолого-съемочным работам и мониторингу геологической среды.

3. ВНИИКАМ, ГЦ «Геомониторинг», ВостСибНИИГТИМС, ТЦ «Томскгеомониторинг» при участии ИТЦ «СканЭкс» разработать в 1999 г. концепцию применения методов ДЗЗ для ведения мониторинга экзогенных геологических процессов.

4. ВНИИКАМ и ГНПП «Аэрогеология» провести инвентаризацию имеющегося фонда данных ДЗЗ с созданием базы метаданных материалов ДЗЗ.

5. Госцентру «Геомониторинг» рассмотреть вопрос централизованного обеспечения подразделений службы ГМГС данными ДЗЗ.

6. Обратить внимание ГлавНИВЦ на целесообразность централизованного обеспечения геологической службы программными средствами обработки и дешифрирования материалов ДЗЗ.

7. Одобрить результаты деятельности ГПП «Севосгеологоразведка» в области разработки технологии цифровой аэровидео- и фотосъемки применительно к задачам мониторинга экзогенных геологических процессов.

8. Подготовить и провести научно-практическую конференцию по использованию методов ДЗЗ для решения задач ГМГС, рассмотреть вопрос о периодическом издании специализированного информационного сборника по рассматриваемому направлению работ.

60-летие Валерия Ивановича Астахова

В июле 1999 г. исполнилось 60 лет ведущему научному сотруднику ВНИИКАМ Валерию Ивановичу Астахову.

Окончив географический факультет ЛГУ (1956—1966 гг.), В.И.Астахов работал в 5-ом Геологическом управлении (сейчас 2-е Гидро-геологическое управление) на геолого-гидрогеологической съемке (масштаб 1:500 000) районов Северо-Востока СССР и Северного Урала (1961—1967 гг.). Параллельно с учебой в аспирантуре ВСЕГЕИ работает геологом на геологической съемке масштаба 1:50 000 на Северном Урале в партиях ГП «Полярноуралгеология» (1968—1971 гг.). С 1971 г. Валерий Иванович Астахов работает в ЛАЭМ-ВНИИКАМ.

В 1972 г. он защищает кандидатскую диссертацию. В настоящее время готовит докторскую диссертацию.

С приходом во ВНИИКАМ В.И.Астахов изучает Красноярский край, разрабатывает и внедряет в производственные организации данного региона комплекс дистанционных методов при групповой геологической съемке масштаба 1:200 000. Затем он исследует проявление нефтегазоносных структур Западной Сибири на материалах дистанционных съемок, изучает строение покрова четвертичных отложений. С 1991 г. Валерий Иванович занимается фотогеологией европейского Севера, первоначально в целях прогнозирования глубинного геологического строения, а затем (с 1993 г.) для картографирования поверхности в масштабе 1:200 000. Он является руководителем различных коллективов, выполняя для геологической службы страны (Мингео СССР, Госкомгеологии РФ, Роскомнедра, МПР) девять научно-исследовательских проектов, принимая участие в подготовке к изданию геологических карт (обзорные, масштаба 1:1 000 000).

В.И.Астахов — один из крупнейших в мире специалистов по геологической интерпретации данных дистанционных съемок закрытых территорий, континентальным отложениям, стратиграфии и палеогеографии плейстоцена Русской Арктики. Автор около 120 докладов для научных конференций, в т.ч. 35 международных, 124 опубликованных работ, в т.ч. 9 монографий и 28 публикаций в международных изданиях.

Валерий Иванович ведет большую преподавательскую работу. С 1991 г. он читает курс четвертичной геологии в Санкт-Петербургском государственном университете (СПбГУ), курсы повышения квалификации геологов-съемщиков при ВСЕГЕИ, с 1993 г. ежегодные курсы четвертичной геологии Севера России для студентов и аспирантов скандинавских университетов, многочисленные лекции по приглашению университетов Скандинавии, геологических служб США, Канады, Швеции и Норвегии.



Основные научные достижения В.И.Астахова: открытие центра плейстоценового оледенения на шельфе Карского моря (1976—1978 гг.); установление влияния ледниковых процессов на неотектонику и распределение углеводородов (1986 г.); построение новой модели ледникового седиментогенеза в Сибири (1986—1988 гг.); создание методики использования линеаментных полей в комплексе с геофизическими данными для прогноза глубинных геологических объектов в Сибири и Тимано-Уральском регионе (1990—1992 гг.); «закрытие» огромных плейстоценовых озер в Западной Сибири (1989 г.) и открытие таковых в Республике Коми (1996—1998 гг.); создание системы диагностических признаков распознавания по МДЗ поверхностных объектов геологического картографирования на европейском Севере (1998 г.); решение проблемы возраста последнего оледенения Русской Арктики (1992—1999 гг.).

*Ученый Совет ВНИИКАМ
Редколлегия журнала*

50-летие Александра Андреевича Кирсанова

В октябре 1999 г. исполнилось 50 лет Александру Андреевичу Кирсанову.

А.А.Кирсанов работает в геологической отрасли более 24 лет. Окончив кафедру геоморфологии географического факультета Ленинградского государственного университета, в 1975 г. он поступил на работу в ЛАЭМ-ВНИИКАМ.

Александр Андреевич начал работу с инженера. С 1991 г. является заместителем директора по научной работе.

В 1982 г. А.А.Кирсанов окончил заочную аспирантуру при ЛАЭМ, а в 1983 г. защитил кандидатскую диссертацию.

А.А.Кирсанов занимался вопросами применения материалов аэрокосмических съемок при изучении структурно-тектонического строения и выявлении перспективных локальных структур в Прикаспийской, Амударьинской и Западно-Туркменской нефтегазоносных провинциях.

С начала 90-х годов Александр Андреевич работает в области создания концепции и методик аэрокосмического мониторинга геологической Среды и составления геоэкологических карт.

По инициативе А.А.Кирсанова во ВНИИКАМ была создана Лаборатория геоинформационных технологий, занимающаяся разработкой компьютерных технологий геоэкологического картографирования и мониторинга природной среды, а в настоящее время работающая над созданием дистанционной основы для новой серии Госгеолкарт-200, -1000. Участвовал А.А.Кирсанов и в геологических работах в составе 28 Советской Антарктической экспедиции.

А.А.Кирсанов руководит контрактными работами по радиолокационной аэросъемке и геологической интерпретации полученных материалов в ГДР, Чехословакии и Болгарии.

С 1993 г. Александр Андреевич участвует в качестве эксперта в Международных программах по верификации материалов космической съемки: JERS-1 и ADEOS (Космическое агентство Японии, NASDA), RADARSAT (Космические агентства Канады и США, CSA NASA).

А.А.Кирсанов — автор более 100 научных работ, 80 из них опубликовано, в т.ч. 24 в зарубежных изданиях. Результаты работ регулярно докладываются на российских и международных конгрессах, симпозиумах и семинарах в США, Великобритании, Японии, Греции, Венгрии, Швеции.

Большое внимание уделяет Александр Андреевич научно-педагогической деятельности на географическом и геологическом факультетах Санкт-Петербургского государственного университета, являясь руководителем курсовых и дипломных работ.

А.А.Кирсанов — член Научно-Экспертного Совета при Государственном Комитете по охра-



не окружающей среды по Санкт-Петербургу и Ленинградской области, Научно-методического Совета по геолого-геофизическим технологиям поисков и разведки твердых полезных ископаемых МПР РФ, а также группы экспертов МПР РФ по направлению — дистанционное зондирование и компьютерные технологии.

Александр Андреевич награжден значком Почетный разведчик недр и Отличник разведки недр, а также Серебряной медалью ВДНХ за внедрение научных разработок по применению дистанционных методов при поисковых работах на нефть и газ. В 1996 г. на конгрессе в Вене Международным обществом фотограмметрии и дистанционного зондирования (ISPRS) А.А.Кирсанову была присуждена премия Эдуарда Долежала и вручен сертификат за значительный вклад в развитие дистанционного зондирования и геоинформационных систем в России.

*Ученый Совет ВНИИКАМ
Редколлегия журнала*

О чем писал наш журнал

40 лет назад опубликованы результаты конкурса Министерства геологии и охраны недр СССР на лучшие предложения и исследовательские работы по направлениям: установление рационального комплекса поисковых методов применительно к конкретным районам и различным полезным ископаемым; разработке новых методов выявления месторождений, не выходящих на дневную поверхность; коренное усовершенствование методики разведки и опробования месторождений полезных ископаемых. Из 69 работ, представленных на конкурс, различными премиями отмечены 19, в т.ч.: *Методика поисков и разведки россыпных месторождений золота на Северо-Востоке СССР* (В.Г.Булычев, И.Е.Драбкин, С.Д.Раковский и др.), *Методика поисков и предварительной разведки жильных гидротермальных месторождений, не имеющих выхода на дневную поверхность на Северо-Востоке СССР* (И.Е.Драбкин, Б.Б.Евангулов, Н.И.Сафронов и др.), *Метод радиометрического опробования радиоактивных руд в естественном залегании* (М.Б.Ширяева, А.Г.Грамаков, В.И.Баранов и др.), *Спектрозолотометрическая съемка как метод поисков золоторудных месторождений, не сопровождаемых механическими ореолами (россыпями)* (Н.И.Сафронов, В.В.Поликарпочкин, А.А.Утгоф).

Я.Н.Белевцев, Ю.М.Енатко, А.Н.Стрыгин показали широкое развитие процессов древнего гипергенеза на железорудных месторождениях Криворожского бассейна. Об этом свидетельствуют: высокая пористость руд, широкое развитие таких минералов, как гётит, гидротит, дисперсный гематит, каолинит, галлуазит и монтмиронит; значительный вынос кремнезема из пород и гипогенных руд; приуроченность многих залежей гётит-гематитовых руд к лежащему боку рудоносных горизонтов; уменьшение с глубиной интенсивности развития процессов мартитизации, разложения железистых силикатов и карбонатов, выщелачивания кремнезема. Процессы окисления проникают на глубину 1300—1500 м от дневной поверхности, приводят к глубоким изменениям первичных метаморфических руд и формированию богатых гётито-гематитовых, гётит-гематит-мартитовых и пористых мартитовых руд за счет джеспилитов и железистых сланцев.

30 лет назад *И.С.Рожков и Е.В.Францесон* обсудили вопросы терминологии и классификации кимберлитовых пород с целью разработки критериев разграничения кимберлитов от близких к ним щелочно-ультраосновных пород. Все породы, составляющие кимберлитовые тела, объединяются под общим названием кимберлитовые породы, среди которых выделяются кимберлиты и кимберлитовые брекчии. Надежно диагностировать кимберлитовые породы можно лишь по сумме признаков важнейшими из них являются: форма залегания в земной коре, набор аксессуарных элементов, химический состав и текстурно-структурные особенности.

В основу классификации кимберлитовых пород авторы положили особенности химического и минерального состава пород и составов отдельных минералов, тесно связанных с составом родственных включений, т.к. именно эти показатели определяют алмазоносность кимберлитовых пород.

А.И.Лисицин охарактеризовал металлогению Кубы, систематизировал основные эндогенные и экзогенные месторождения и показал их пространственное положение в главнейших структурах.

Автор выделил собственно магматические, пневматолитовые, скарновые, гидротермальные вулканогенно-осадочные типы месторождений, а также экзогенные, связанные с корами выветривания. Рассмотрел магматические литологические и тектонические факторы рудного контроля, сформулированы основные зако-

номерности пространственного размещения известных рудных районов и благоприятные предпосылки для открытия новых месторождений.

Металлогения центральной части Русской платформы на основе новых данных освещена *Е.Е.Захаровым и Е.М.Крестиным*. Авторы рассмотрели перспективы открытия в этих районах месторождений медно-никелевых сульфидных руд в базитах и гипербазитах и полиметаллических месторождений телетермального типа.

В.Г.Гарьковец призвал к пересмотру представлений, согласно которым металлогения Тянь-Шаня определяется только герцинским гранитоидным магматизмом. По мнению автора многие рудопроявления в Зарафшано-Туркестанской, Байсунской и Бешторской зонах относятся к допалеозойской металлогенической эпохе, имеются рудопроявления золота и меди метаморфогенного типа, а также возможности обнаружения редкометалльных проявлений такого же типа.

20 лет назад *В.Е.Хаин, А.Б.Ронов и А.И.Булаховский* провели анализ распределения и количественных соотношений основных групп литологических формаций неогена. За неогеновый период в пределах континентов накопился значительный объем осадочных и вулканогенных пород ($28 \cdot 10^6$ км³). Авторы подсчитали, что по сравнению с палеогеном средняя скорость седиментации в неогене значительно возросла, причем в основном за счет формирования континентальных молассовых формаций. Неогеновые отложения на 87,1% состоят из обломочных, 7,3% — из карбонатных, 10,1% — из вулканогенных пород и 1,5% — из эвапоритов. Неогеновый период (особенно плиоцен) выделяется как экстремальный геократический этап в истории Земли.

Н.Г.Патык-Кара рассмотрела значение различных факторов, контролирующих формирование оловоносных россыпей, при оценке основных параметров прогнозируемых объектов. Наибольшей информативностью при оценке россыпей ближнего сноса обладают показатели пространственной совмещенности долины и коренного источника, отражающие суммарный объем эродированного и переведенного в россыпь полезного компонента. Их соотношение позволяет судить о степени «соответствия» выявленной россыпи известным коренным источникам и может служить одним из критериев при поисках источников питания россыпи, а также для оценки рудно-россыпных узлов. Критерии оценки, выработанные на примере Якутской оловоносной провинции, применимы для различных россыпных районов, где их использование для количественного прогнозирования должно опираться на уточнение граничных условий, определяющих появление россыпей определенного класса.

Я.Д.Готман, А.К.Мизута, Э.В.Петросян, А.К.Прусс, А.О.Смилкстын проанализировали геологические условия уранового рудообразования в щитах докембрийских платформ. Разнообразие и характерные особенности различных промышленных типов урановых месторождений докембрийских щитов обусловлены спецификой и длительностью истории геологического развития этих наиболее древних структурных элементов земной коры. Авторы выделили пять главных групп урановых месторождений щитов: полигенно-стратиформные в протогеосинклинальных образованиях, метасоматические завершающих этапов гранитизации, гидротермально-метасоматические в областях протоактивизации, позднедокембрийской и фанерозойской активизации, гидрогенные в наложенных и эрозионных впадинах.

10 лет назад *Е.М.Шмариович, К.Г.Бровин, Б.И.Натальченко* разработали термодинамические основы гео-

технологической оценки полиэлементных пластово-инфильтрационных месторождений, которые помимо урана содержат эпигенетические накопления молибдена, рения, скандия, иттрия и ряда лантаноидов, ванадия и селена. Для разработки пластово-инфильтрационных месторождений способом подземного выщелачивания выделены пять типовых обстановок: сернокислотная с окислителем (выщелачиваются все полезные компоненты); сернокислотная без окислителя (выщелачиваются Mo, U, V, Se); слабощелочная карбонатная с окислителем (выщелачиваются Mo, Re, U, Se); слабощелочная без окислителя (выщелачиваются Mo, частично U, Re, I); сильнощелочная с восстановителем (выщелачиваются Se, Re).

С.В.Галюк предложил технологию моделирования околорудного признакового геохимического поля. Процедура моделирования включает построение признаковых геолого-геохимических моделей (признаковых моделей) ряда эталонных объектов, их обобщение на статистической основе, отражающее постоянство важнейших подсчетных характеристик конкретных таксонов геолого-генетических типов месторождений, и отработку методов экстраполяции полученной модели на конкретные объекты. Формирование признаковой геолого-геохимической модели опирается на фунда-

ментальные теоретические представления о генезисе данного типа оруденения (генетическая модель) и строится относительно естественных геологических осей моделируемого объекта. Экспрессная методика локального геохимического прогноза оруденения на этой основе заключается в идентификации параметров случайных сечений геохимических аномалий с информацией обобщенной модели аналогичного таксона, определяющей объемный геологический образ.

Е.А.Ельянова рассмотрела особенности формирования состава и строения руд при современном и древнем колчеданообразовании, протекающем в условиях сложного пространственно-временного переплетения гидротермально-осадочных и гидротермально-метасоматических процессов. Формирование состава и строения рудных тел продолжается и после отложения первичных руд, в течение всего периода функционирования гидротермальной системы, а частично и после его прекращения. При этом одним из основных рудоформирующих процессов является перераспределение вещества гидротермальными растворами. Отмечено сходство процессов современного и древнего колчеданообразования.

Материалы к публикации подготовил Г.В.Ручкин



ЦНИГРИ

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ ИНСТИТУТ
ЦВЕТНЫХ И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОСРЕДЫ В ВЕРХНИХ ЧАСТЯХ РАЗРЕЗОВ

1. Геологические задачи.

Выявление и прослеживание по площади и в разрезе (на глубине) от 0—5 до 30—50 м и более:

- карстовых воронок, провалов и полостей;
- подземных промоин и пустот;
- зон тектонических разломов;
- определение мощности рыхлых отложений на устойчивых плотных породах;
- пльвунов, зон повышенной трещиноватости и обводненности, зон засоления;
- водоносных и водоупорных горизонтов, русел подземных рек и ручьев;
- мониторинг зон оползневой и сейсмической опасности;
- картирование литологических разностей пород (глины, пески, галечники) и выделение в них границ фациальных неоднородностей с определением их мощностей;
- трассировка подземных коммуникаций (трубопроводы, электрокабели, тоннели, горные выработки и т.п.);
- обнаружение подземных металлических и неметаллических (контрастных с вмещающей средой) локальных объектов, а в благоприятных условиях и определение их конфигурации;

- мониторинг зон техногенного загрязнения, зон техногенного разрушения («выветривания») горных пород в их естественном залегании.

2. Технология радиоволнового геозондирования.

Мобильная радиоволновая технология профилирования осуществляется зондированием среды без необходимости заземлений (контактная, ненарушающая) путем изменения расстояния между излучателем и приемником или путем изменения частоты излучаемого в геосреде высокочастотного радиополя (частоты от 0,625 до 62,5 мГц). Технология обладает высоким разрешением по всем направлениям.

Аппаратура радиоволнового зондирования (Геозонд) компьютеризована, с автономным питанием, переносная, общим весом не более 9 кг, обслуживается двумя техниками-операторами.

Результатирующие данные предоставляются в виде геоэлектрических поглубинных разрезов при профильных съемках, карт и объемных томографических изображений (при площадных съемках).

Производительность (при производстве линейного профилирования) — 300—500 метров за рабочий день в зависимости от требуемой детальности съемок.

Вид реализации — инжиниринг.

R-13.14

Адрес: 113545, г. Москва, Варшавское шоссе, 129«Б», ЦНИГРИ

Телефон: (095) 313-18-18, 315-43-47, 315-43-29

Факс: (095) 313-18-18

E-mail: tsnigri@pol.ru

© Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов, 1998



ЦНИГРИ

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ ИНСТИТУТ
ЦВЕТНЫХ И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

МЕТОДИКА ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ЗОН ДЕЙСТВИЯ ОБЪЕКТОВ ГОРНОРУДНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Методика изотопно-геохимического мониторинга объектов горнорудной промышленности разработана на ряде горнообогатительных золотоперерабатывающих комбинатов, применяющих различные технологические схемы золотодобычи.

Основные положения методики изложены в виде методических рекомендаций и могут быть использованы при оценке влияния ГОКов на окружающую среду вне зависимости от природно-климатических и ландшафтных условий.

Основу методики составляет комплексирование данных по геохимии стабильных изотопов серы и углерода в компонентах окружающей среды, с результатами по содержаниям в них металлов 1, 2, и 3 групп токсичности, в том числе тяжелых.

Использование изотопно-геохимического мониторинга на практике позволяет:

- ранжировать геохимические аномалии на «природные» и «техногенные»;
- устанавливать пути распространения техногенных потоков;
- идентифицировать источники загрязнения;
- оконтуривать аномалии в средах, депонирующих загрязнение;

- составлять геоэкологические паспорта вновь осваиваемых горнорудной промышленностью районов;
- проводить оценку масштабов развития ореолов техногенного загрязнения с выявлением зон техногенеза различной интенсивности;
- осуществлять краткосрочный (более 5 лет) прогноз развития экологической ситуации на урбанизированных территориях.

Методика может быть применена при:

- оценке экологического состояния почв, поверхностных и подземных вод, донных отложений при сельскохозяйственном, селитебном, водохозяйственном рекреационном использовании территорий;
- оценке эффективности природоохранных мероприятий - очистных сооружений, качества сельскохозяйственных угодий после рекультивации почв и пр.

Предлагается использование методики и проведение изотопно-геохимического мониторинга в зонах действия объектов горнорудной промышленности, в областях интенсивного земледелия, в зонах интенсивного селитебного водохозяйственного рекреационного использования территорий.

R-13.20

Адрес: 113545, г. Москва, Варшавское шоссе, 129«Б», ЦНИГРИ

Телефон: (095) 313-18-18, 315-43-47, 113-18-11

Факс: (095) 313-18-18

E-mail: tsnigri@pol.ru

© Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов, 1998

Contents

<i>Pertsov A.V.</i> Methodological basis for using remote sensing data in geology	3	<i>Rusanova A.A., Smirnov M.Yu., Pupkov O.M.</i> Application of digital air-borne and satellite images in geologic- structural studies of the Sortavala-Pitkyarant uplift zone	46
<i>Pertsov A.V., Antipov V.S., Kirsanov A.A.</i> Concept of development of remote sensing methods in natural resources studies	9	<i>Samsonova V.V., Kirsanov A.A., Filippov V.N.</i> Some results of the RADARSAT data interpretation for geological purposes in the northern part of the Prince Charles Mountains.	54
<i>Pertsov A.V., Zakharov V.I., Strel'nikov S.I., Antipov V.S., Gal'perov G.V.</i> Remote sensing base of the State Geological Map of Russian Federation, 1:200 000, Second edition	14	<i>Popova T.A., Semenova N.N., Leontieva E.V.</i> Geodynamics of the Ladoga Lake shore under the effect of the cellulose-paper industrial sewage from remote sensing data . . .	60
<i>Pertsov A.V., Gal'perov G.V., Antipov V.S., Turchenko S.I.</i> Space structural criteria of localization of ore giants	17	<i>Kil'dyushevsky E.I., Voronov P.S.</i> New method of remote geological study of offshore areas . . .	68
<i>Rukoyatkin A.A.</i> Deep lineament sounding in metallogenic studies	21	<i>Afanasiev N.F., Pertsov A.V.</i> New trends in the development of remote sensing methods for geological studies	72
<i>Vostroknutov E.P.</i> «GENESIS» — an expert system for predictive geological studies	27	<i>Viktorov S.V., Kil'dyushevsky E.I., Kirsanov A.A., Pertsov A.V.</i> On the inventory of sea shores	77
<i>Smirnova I.O., Rusanova A.A.</i> GIS-technology of processing and interpretation of remote sensing data for the study of tectonic criteria of hydrocarbon deposit distribution	32	Information	79
<i>Bychkova I.A., Viktorov S.V., Kil'dyushevsky E.I., Sukhacheva L.L.</i> Synergetic approach to the use of satellite data for coastal zone studies	40	60th anniversary V.I. Astakhov	80
		50th anniversary A.A. Kirsanov	81
		ON THE TERCENTENARY OF THE GEOLOGICAL SURVEY OF RUSSIA	
		A backward glance on the papers of our journal	82