

В.С. Федоровский (ГИН РАН)

В настоящее время – главный научный сотрудник Геологического института Российской академии наук (ГИН РАН, Москва). Доктор геолого-минералогических наук.

Е.В. Складов (ИЗК СО РАН)

В настоящее время – директор Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН, Иркутск). Член-корреспондент Российской академии наук, профессор.

Использование аэрокосмических данных высокого разрешения для целей геологической картографии (Ольхонский геодинамический полигон, Байкал)*

Геологическая карта – необходимый инструмент геологического исследования. Без карты прогресс в этом деле сомнителен, а прогноз обнаружения месторождений любых видов полезных ископаемых вряд ли возможен. Появление в середине прошлого века аэрометодов вывело геологическую картографию на новый уровень, несравнимый с тем, что было прежде. Удивительно вместе с тем, что современные космические аппараты, снимки с которых превышают тот потенциал, который обеспечивала аэрофотосъемка, остаются вне поля интересов не только геологов-практиков, но и исследователей, занятых изучением проблем формирования земной коры континентов. Последние десятилетия сопровождалась в геологии потоком новых прецизионных аналитических данных, используется дорогая, а нередко и уникальная аналитическая аппаратура – все эти бесценные материалы открыли новый мир в геологической науке, обеспечили новый взгляд на многомиллиарднолетнюю историю планеты. Но когда дело доходит до интерпретации аналитического материала, эти нередко уникальные данные пытаются совместить с совершенно не соответствующими им по точности и классу, мелко- и среднемасштабными геологическими картами, составленными в прошлом веке. Результат никакой, и мы склонны рассматривать это как утрату профессиональной геологической культуры.

Это общий тренд. И в нашей стране, и за рубежом картина одинакова.

На примере Ольхонского геодинамического полигона на Байкале мы хотим показать возможности геологического дистанционного зондирования, которые позволили приступить к созданию нового поколения геологических карт. По своей точности и надежности (ошибка в нанесении геологических границ не превышает 1–2 м) они открывают невиданные прежде возможности для осмысленного геологического поиска и интерпретации структур, картируемых на земной поверхности.

Территория Ольхонского региона занимает часть западного побережья Байкала (рис. 1). Она издавна считалась одной из ключевых геологических площадей Сибири. Регион отличается сложнейшим геологическим строением, высокой степенью обнаженности кристаллических комплексов (лента прибрежных скал имеет протяженность около 400 км), высоким классом геологической дешифрируемости дистанционных данных и сравнительно небольшой площадью (около 2000 кв. км). Геологическая матрица Ольхонского региона, вскрытая на поверхности, сформирована 460–500 млн лет назад в результате коллизии Сибирского кратона и Ольхонского террейна. В современной структуре регион составляет перемышку Байкальского рифта,

* Расширенный вариант статьи (87 страниц, 125 иллюстраций) опубликован в сети Интернет в электронном журнале «Геодинамика и Тектонофизика» (№4, 2010 г., с. 331–418) по адресу: <http://www.crust.irk.ru/gt/files/4/331.pdf>



Рис. 1. Ольхонский геодинамический полигон на космическом снимке и мелкомасштабной топокарте

одной из крупнейших в мире зон внутриконтинентального растяжения, активно трансформирующей древнюю матрицу. В сумме все это и определяет высокий научный потенциал Ольхонского региона и те параметры, которые позволяют рассматривать его как геодинамический полигон. Он входит в состав Прибайкальского национального парка России.

В последние годы на площадь полигона удалось сконцентрировать обширный аэрокосмический материал, а многолетние полевые исследования принесли немало новых открытий и находок, которые кардинально изменили прежние представления. В сумме весь этот материал позволил приступить к созданию нового пакета «бумажных» и электронных карт геологического содержания.

Дистанционный материал включает два пакета (рис. 2):



Рис. 2. Два пакета дистанционных данных на площадь Ольхонского региона



Рис. 3.

Цифровая объемная модель рельефа

Генерирована в программе ENVI с использованием мультиспектрального космического снимка со спутника QuickBird и альтиметрии с радарного спутника SHUTTLE. В левом нижнем углу – Тажеранский массив сиенитов, нефелиновых сиенитов и святоноситов, окруженный сдвиговой петлей. В центре – сдвиговая пластина Орсо, ограниченная с севера офиолитовой сутурой. В верхней части модели – гранитогнейсы и мигматиты Центральной купольной зоны

1) аэрофотоснимки четырех масштабов (1:5000, 1:12 000, 1:25 000, 1:100 000, Россия);

2) космические снимки среднего, высокого и сверхвысокого пространственного разрешения с шести спутников: Landsat-7 ETM+ (США, мультиспектральный режим), IKONOS (США, панхроматический и мультиспектральный режимы), QuickBird (США, панхроматический и мультиспектральный режимы), SHUTTLE (США, миссия SRTM), SPOT-5 (Франция, панхроматический режим), ALOS (Япония, сенсор PRISM).

Широко используем и объемные цифровые модели рельефа по данным радарных 30- и 3-секундных космических съемок (США), а также цифровые модели крупного масштаба, которые мы генерируем в программном комплексе ENVI, одновременно

используя космические снимки высокого разрешения с различных спутников и данные альтиметрии с радарного спутника SHUTTLE (рис. 3).

Кроме того, специфический дистанционный материал представляет собой непрерывная цифровая стереоскопическая фотосъемка скал побережья (около 200 км), выполненная нами со льда Байкала и летом – с корабля Института земной коры СО РАН «Геолог». Полезный ресурс составляют и многочисленные фотографии участков детальных исследований с вертолетов. В итоге практически все ключевые объекты оказались обеспечены дистанционным материалом, полученным в разные времена года, при различной освещенности и с разных высот (50–1000 м с самолетов и вертолетов; 400–1000 км со спутников). В целом по обеспечению данными дистанционного зондирования Ольхонский регион как геологический объект сегодня не имеет себе равных в нашей стране.

Нужно отметить, что, кроме обычных летних экспедиций, мы широко используем зимние полевые работы. Скалы побережья Байкала, практически недоступные летом из-за штормовых ветров, мож-



Рис. 4.

Ледяной покров в районе устья р. Анги (слева) и мыса Орсо (справа).

Снег полностью сдут ветрами, и автомашина может проникнуть практически в любое место. В зимней работе многое зависит от состояния льда. Нередко он идеально гладкий, совершенно прозрачный. Вместе с тем работа на льду имеет свою специфику; она опасна и требует осторожности. Многочисленны трещины (их протяженность достигает иногда десятков километров), и это «живые» системы, нередко с открытой водой, но чаще с нагромождениями торосов

но исследовать со льда озера на исходе зимы, когда лед еще крепок, а сибирские морозы уже отступили. Ценная информация, полученная в условиях абсолютной обнаженности (рис.4), — важный элемент геологической работы. Единый банк данных составляют, таким образом, четыре компонента:

- результаты детальной геологической съемки на поверхности плато;
- дешифрирование разнообразного дистанционного материала с самолетов, вертолетов и спутников;
- результаты специального изучения геологических разрезов в скалах побережья Байкала;
- результаты петрологического, петрохимического и геохимического изучения горных пород и их геохронологического датирование, выполненное в лабораториях России, Германии, Австралии и Южной Кореи.

И вместе с тем отнюдь не все проблемы, возникавшие по мере выполнения исследований, нашли свое решение. Наоборот — их число непрерывно возрастает. Но многое, однако, стало более ясно, чем прежде. И главное, постепенно вырисовывалась тектоническая матрица региона. Именно она позволяет понять общую конструкцию системы, ее анатомию и постепенно перейти от среднемасштабного картирования всей площади полигона к детальному изучению ключевых участков. В свою очередь, результаты, получаемые в итоге таких детальных исследований, заставляют вносить коррективы в, казалось бы, уже понятный образ всей коллизионной системы, а нередко и весьма кардинально корректировать саму региональную концепцию. И так до бесконечности. Хотя в итоге всех этих усилий удалось достигнуть большой точности геологических карт, нужно всегда быть готовым к тому, что какое-нибудь незначительное на первый взгляд новое наблюдение принесет такую информацию, которая разрушит всю идею конструкции. Но и всякому коллапсу есть предел: закартированные контуры геологических тел останутся навсегда. Они должны «вписаться» в любую новую модель или концепцию. Если этого не происходит, значит, ошибочны и сама модель, и концепция. Именно этому учит дис-



Рис. 5.

Гранито-гнейсовые купола впервые были обнаружены в регионе на аэрофотоснимках масштаба 1:5000 (специальная съемка). Сегодня закартированы сотни таких структур. На рисунке — фрагмент купола Овал. Так он виден на космическом снимке со спутника IKONOS (синтезированное мультиспектральное изображение, сверхвысокое разрешение. Уменьшено по сравнению с оригиналом). Степень дешифрирования — 100%



Рис. 6.

Многократно деформированные сдвигом структурные композиции в районе бухты Орсо на Байкале. В верхней части снимка — фрагмент Центральной купольной зоны, переработанной сдвигами (461 млн лет). В центре снимка — сдвиговая глестина Орсо (лептиниты и амфиболиты, 800 млн лет), отделенная от Центральной купольной зоны офиолитовой сутурой (с гипербазитами). Высокий класс дешифрируемости дистанционных данных



Рис. 7.

Мультиспектральный космический снимок правосдвиговой сигмоиды Нургей со спутника IKONOS (разрешение 2,44 м/пиксель)

танционный материал высокого разрешения – он объективен по своей сути и выступает как критерий надежности. Справедливо, однако, помнить: наивно надеяться на то, что, вооружившись снимками высокого разрешения, удастся автоматически и быстро получить научный результат. Несмотря на огромный информационный потенциал, снимок сам по себе, взятый отдельно, – ничто. Основным инструментом исследователя по-прежнему остаются геологический молоток и мозги. Лишь соединив все эти три ипостаси, можно надеяться на успех. Да и то не всегда. Нужно помнить и еще об одном, может быть самом важном моменте любого научного геологического исследования – везении.

Основной мотив геодинамики, приведшей полмиллиарда лет тому назад к формированию коллизионного композита территории, – сближение Сибирского кратона и Ольхонского террейна, закрытие разделявшего их океанического пространства и косой характер столкновения главных сегментов земной коры. Именно это обстоятельство определило на первых этапах коллизии проявление деформаций покровного и купольного генезиса (рис. 5), а затем тотальное проявление здесь сдвигового тектогенеза (рис. 6). Свидетельства такой кинематики бесчисленны. А между тем прежде, до проведения геологических исследований с использованием ДЗЗ, ни одного сдвига здесь не было обнаружено. Сегод-

ня закартированы сотни таких структур. Даже на космических снимках среднего разрешения сдвиги, составляющие скелет коллизионной системы, распознаются уверенно. Снимки же сверхвысокого разрешения позволяют обнаруживать такие детали их внутреннего строения, которые недоступны при прямом контакте исследователя (с геологическим молотком в руках) с горной породой. Такова специфика объектов наших исследований.

Геологические структуры, составляющие земную кору континентов, имеют и микроскопические размеры (и тогда инструмент геолога – микроскоп), и сотни и тысячи километров в длину. Охватить одним взглядом подобные системы можно только из космоса – и именно поэтому дистанционное зондирование является неприменимым методическим приемом при геологических исследованиях. Сдвиговые композиции Ольхонского региона видны на аэрофото-

снимках и космических снимках любых масштабов как на ладони. Генеральная структура региона, как теперь стало ясно, представляет собой многочисленные узкие в плане (сотни метров, первые километры), но протяженные (десяtkи километров) сдвиговые пластины, спрессованные в едином коллизионном коллаже. Но и это не все. Возникший на ранних этапах коллизионный композит вновь вовлекался в сдвиговые деформации, что привело к формированию более поздних крупных сдвиговых сигмоид (рис. 7). Они и составляют картируемый в современном срезе тектонический образ коллизионной системы региона. Ее яркая особенность, кроме того, – резкая геологическая неоднородность той геологической среды, которая была охвачена коллизионными процессами. Это сегодня различные комплексы и структуры вскрыты здесь, на дневной поверхности, а 500 млн лет назад дело происходило в глубинах земной коры. Эти глубинные горизонты были охвачены метаморфизмом, колебания температур и давлений были весьма значительны (от эпидот-амфиболитовой до гранулитовой фации метаморфизма включительно), заметную часть объемов коры составляли внедрения крупных массивов пород из мантии. Различные вязкостные свойства компонентов коллизионного композита тоже отражены в генеральной структуре: более жесткие геологические тела (обычно это массивы базитов и гипербаз-

зитов) в процессе тектонического течения и реализации сдвиговой деформации вовлекались во вращение (роллинг), и это определило дополнительные структурные эффекты, запечатленные в интегральной картине системы. Таковы, например, вихревые рисунки некоторых массивов метагабброидов (они фиксируются на космических снимках), напряженные складчатые сигмоиды в метаморфическом матриксе, возникавшие вокруг массивов базитов и гипербазитов, охваченных роллингом. Размеры таких сигмоидальных структур весьма значительны. Самые крупные из них закартированы вокруг массива монцогабброидов Бирхин (размах ее крыльев достигает 15 км в плане) и вокруг знаменитого массива Тажеран (сиениты, нефелиновые сиениты, субщелочные габбро), известного своими редкими и уникальными минералами. На космических изображениях сдвиговые сигмоиды распознаются практически мгновенно, а их картирование можно вести с такой точностью, которая прежде была вообще недоступна.

Чрезвычайно эффектные и на аэрофотоснимках крупных масштабов, и на космических снимках высокого и сверхвысокого разрешения рои из сотен гранитных жил, заполняющих трещины в жестких массивах габброидов, возникавшие при их роллинге. Нужно отметить, что степень дешифрируемости таких жил и на космических снимках, и на аэрофотоснимках очень велика, а тонкие детали конфигурации таких жил, обнаруживаемые на дистанционных материалах, дают отчетливое представление о кинематике процесса их формирования. Можно утверждать, что без применения ДЗЗ выяснение морфологии таких геологических тел было бы просто невозможно: с космической высоты сами гранитные жилы и мельчайшие изменения их конфигурации фиксируются во всем их разнообразии, в то время как на Земле уловить все эти детали вряд ли удастся. Но даже если это захотелось бы сделать, нетрудно представить себе, сколько времени и сил придется затратить на такую работу. Но точность, которую обеспечивает космический снимок, все равно никогда не будет достигнута.

Поскольку мы имеем дело с коллизионной системой, важной проблемой был поиск главного коллизионного шва, разделявшего в раннем палеозое Сибирский континент и Ольхонский микроконтинент. Он был найден и непрерывно прокартирован на протяжении 150 км.

Ширина этой структуры в плане редко достигает 1000 м. Операция по поиску коллизионного шва напоминает детектив. Выше уже упоминалось, что Ольхонский регион располагается в рамках современной Байкальской рифтовой системы — грандиозной по своим масштабам структуры растяжения материка Азии. Западная граница Байкальского рифта (известный Приморский разлом, обрезающий как ножом Приморский хребет), как оказалось, «села» точно на древний, раннепалеозойский коллизионный шов системы террейноконтинент — и именно это маскировало сам шов, препятствовало на первых порах его обнаружению. Лишь активное использование дистанционных данных позволило разделить эти две структуры и доказать их диаметрально различное происхождение (рифт — это растяжение коры, коллизия — сжатие) и разницу в возрасте почти в полмиллиарда лет.

Здесь перечислены лишь отдельные моменты того принципиально нового видения геологической ситуации, которое стало возможно в результате плотного использования данных ДЗЗ. Преимущество таких приемов работы перед традиционными методиками геологической картографии достаточно очевидно. Опыт, полученный на Ольхонском геодинамическом полигоне, привел нас к идее создания на его площадь пакета карт геологического содержания. Мы намечаем составление и издание 14 карт (в «бумажном» и электронном вариантах) — все на основе космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения, попиксельно привязанных к мировой системе координат. Издание всего пакета карт геологического содержания на площадь Ольхонского геодинамического полигона предполагается выполнить до 2013 г. Это будут шесть региональных карт (геологическая, тектоническая, метаморфизма, геодинамическая, геоморфологическая, неотектоники — все в масштабе 1:100 000) и еще восемь детальных геологических карт (масштаб 1:10 000) на площади ключевых объектов коллизионной системы. Первая, пилотная из этого пакета, геологическая карта массива Тажеран уже издана. Аэрокосмический материал по Ольхонскому региону, который накоплен к настоящему времени, позволяет надеяться на то, что эту работу удастся завершить в намеченные сроки. Ольхонский геодинамический полигон станет тогда надежной стартовой площадкой для дальнейших углубленных геологических исследований.