



## THE OLKHON GEODYNAMIC PROVING GROUND (LAKE BAIKAL): HIGH RESOLUTION SATELLITE DATA AND GEOLOGICAL MAPS OF NEW GENERATION

V. S. Fedorovsky<sup>1</sup>, E. V. Sklyarov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Geological Institute of RAS, 119017, Moscow, Pyzhevsky Pereulok, 7, Russia

<sup>2</sup>Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS, 664033, Irkutsk, Lermontov street, 128, Russia

**Abstract:** The Olkhon region of the Western Pribaikalie is highly attractive for geologists due to the presence of diverse metamorphic complexes and highly complicated combinations of folded structures in this region. The Olkhon region is located within the area of the Pribaikalsky National Park of Russia. At abundant outcrops in the subject area, various geological aspects resulting from the Early Palaeozoic collision system can be studied in detail. By its parameters, the subject area can be considered a «geodynamic proving ground». In recent years, abundant aerospace materials on the area have been accumulated, and long-term field studies resulted in many discoveries and findings which encourage critical revision of the initial conceptions. The material available allows compilation of a new package of geological maps in hard and electronic versions.

**Keywords:** Lake Baikal, the Olkhon polygon, caledonides, collision, shear tectonics, synorogenic collapse, high-resolution space images, large-scale aerial photos.

**Recommended by** D.P. Gladkochub 8 November 2010

Fedorovsky V.S., Sklyarov E.V. The Olkhon geodynamic proving ground (Lake Baikal): high resolution satellite data and geological maps of new generation // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2010. V. 1. № 4. P. 331–418.

## ОЛЬХОНСКИЙ ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОЛИГОН (БАЙКАЛ): АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ И ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ КАРТЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

В. С. Федоровский<sup>1</sup>, Е. В. Склярв<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, Россия

<sup>2</sup>Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

**Аннотация:** Ольхонский регион в Западном Прибайкалье давно привлекает внимание геологов разнообразием метаморфических комплексов, сложнейшими комбинациями складчатых структур. Он входит в состав Прибайкальского национального парка России.

Высокая степень обнаженности позволяет детально исследовать различные аспекты геологии установленной здесь коллизионной системы раннего палеозоя. По этим и многим другим параметрам регион отвечает оп-

ределению «геодинамический полигон». 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.

**Ключевые слова:** Байкал, Ольхонский полигон, каледониды, коллизия, сдвиговая тектоника, синорогенический коллапс, космические снимки высокого разрешения, аэрофотоснимки крупного масштаба.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	332
1. Материалы дистанционного зондирования Земли .....	335
2. Основные черты геологии и тектоники Ольхонского геодинамического полигона .....	340
2.1. Коллизионный шов системы террейн – континент .....	341
2.2. Коллизионный композит Ольхонского террейна .....	347
2.2.1. Сдвиговые пластины, сложенные породами гнейсово-мигматитового комплекса Шебарта .....	348
2.2.2. Сдвиговые пластины, сложенные породами пестрого (Ольхонского) комплекса .....	356
2.2.2.1. Сдвиговые пластины, сложенные породами Ольхонского комплекса (гранулитовая фация метаморфизма) .....	356
2.2.2.2. Сдвиговые пластины, сложенные породами Ольхонского комплекса (амфиболитовая фация метаморфизма) .....	357
2.2.3. Сдвиговые пластины, сложенные породами Ангинского комплекса (эпидот-амфиболитовая и амфиболитовая фации метаморфизма) .....	385
2.2.4. Сдвиговые пластины, сложенные породами комплекса Орсо (амфиболитовая фация метаморфизма) .....	411
3. Новое поколение карт геологического содержания .....	411
Заключение .....	415
Благодарности и копирайты .....	416
Литература .....	417

## ВВЕДЕНИЕ

Геологическая карта – один из основных, «классических», инструментов исследования, позволяющий интегрировать геологическую информацию. Визуализация геологических данных незаменима при любых тектонических, петрологических, геохимических и прочих исследованиях в науках о Земле. Принципы построения карт геологического содержания отработывались и совершенствовались в течение долгого времени и во второй половине прошлого столетия приобрели некоторую унификацию вне зависимости от различий в геологических воззрениях. На рубеже тысячелетий составление карт и насыщение их дополнительной информацией получили новый импульс в связи с развитием компьютерных технологий, позволяющих «перевести в цифру» многоплановую геологическую информацию, увязать ее в единую систему и сделать трудоемкий процесс подготовки картографической продукции рядовой технологической операцией.

С появлением ГИС-технологий изобразительные средства и возможности геологической картографии серьезно расширились, и это позволило говорить о революции в геологическом картировании и новом поколении геологических карт [Whitmeyer et al., 2010]. Быстро развиваются и дистанционные мето-

ды зондирования Земли. Традиционная аэрофото-съемка, еще недавно доминирующая в геологической картографии, уступает место съемкам с космических аппаратов, и эти новые данные не только позволяют составлять геологические карты невиданной прежде точности, но и открывают новые возможности в дешифрировании разнообразных элементов геологических композиций, картируемых в современном срезе [Longley et al., 2001; Ray, 2002]. Технологический потенциал современных космических аппаратов интересен еще и тем, что позволяет практически одновременно получить и реальный образ крупных геологических структур размерами в сотни и тысячи километров и исследовать конфигурации совсем небольших геологических тел. Прогресс здесь очевиден: высокое и сверхвысокое пространственное разрешение космических снимков уже сейчас перекрывает возможности аэрофотосъемки. Следствие – возросший потенциал геологического дешифрирования дистанционного материала и, как результат, более высокая степень надежности геологических карт.

Объективно ясно, вместе с тем, что хотя технические условия для создания нового поколения геологических карт имеются, реальное освоение новых методов в России идет медленно и серьезных прорывов в этом деле нет. Десятки спутников находят-

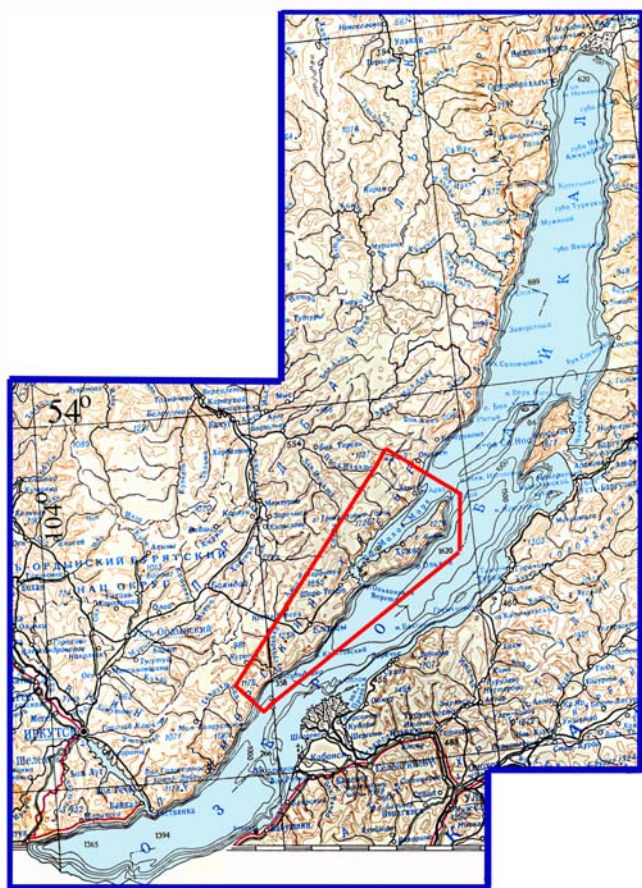


Рис. 1. Ольхонский геодинамический полигон на мелкомасштабной топографической карте.

Fig. 1. The Olkhon geodynamic proving ground on the small-scale topographic map.

ся на орбитах, информационный потенциал аппаратуры, установленной на них, поражает воображение, а в геологии эти бесценные данные используются совершенно недостаточно.

Цель этой статьи – привлечь внимание геологов к возможностям использования аэрокосмического материала для геологической картографии, продемонстрировав их на примере Ольхонского геодинамического полигона на Байкале. Используя возможности электронного формата журнала, авторы сознательно минимизировали текстовую часть статьи, компенсировав это включением максимально возможного объема иллюстративного материала.

Побережье Байкала и остров Ольхон, отделенный от него проливами Малое Море и Ольхонские Ворота (рис. 1, 2), давно привлекают внимание геологов своими пестрыми по составу метаморфическими комплексами и необычайно сложными структурными ансамблями, которые формируют эти породы. В современной структуре метаморфические комплексы составляют перемышку Байкальского рифта, одной из крупнейших в мире зон внутриконтинентального рифтогенеза. Перемышка протяжен-

ностью около 300 км разделяет рифт на две впадины и включает Приольхонье, остров Ольхон и подводный Академический хребет.

Территория Ольхонского региона обладает всеми признаками, которые подразумеваются под определением «геодинамический полигон», и этот потенциал быстро нарастает. На относительно небольшой площади (около 2000 км<sup>2</sup>) природа не только сосредоточила большое разнообразие структур и пород различного генезиса и возраста, но и создала идеальные условия для полевой геологической работы. Прежде всего – это высокая степень обнаженности и легкая доступность любого объекта на территории Ольхонского региона. Для Сибири, с ее бескрайними таежными просторами, это немаловажный фактор. Каменная степь, окруженная лентой прибрежных скал, – таков типичный ландшафт региона.

Территория Ольхонского региона издавна считается одной из ключевых геологических площадей Сибири. Вместе с тем, хотя история геологических исследований региона насчитывает более 100 лет, изучение этой площади происходило как-то «вяло», без азарта. Возраст метаморфических пород по старинке считался раннедокембрийским, и эти взгляды десятилетиями перекочевывали из одной работы в другую, не встречая ни критики, ни попыток найти альтернативные решения. Появляющиеся время от времени палеозойские датировки метаморфических пород К-Аг методом игнорировались, а представления о древнем возрасте метаморфитов Ольхонского региона крепили и казались очевидными. Неудивительно поэтому, что появление первых изохронных датировок, свидетельствующих о раннепалеозойском возрасте метаморфитов Ольхонского региона [Бибикова и др., 1990; Летников и др., 1990], встретило недоверие, сомнения и сопротивление. Это было 20 лет назад, но и до сих пор в печати встречаются попытки вернуться к прежним взглядам. Для подобных сомнений, между тем, нет оснований. Банк геохронометрических данных по Ольхонскому региону располагает сегодня примерно 100 анализами, выполненными разными методами в различных лабораториях России, Германии, Австралии и Южной Кореи. Ни один из этих анализов не позволяет предполагать древний возраст метаморфитов. Проблему можно считать исчерпанной. Метаморфические комплексы Ольхонского региона относятся к ранним каледонидам. Соответствующие датировки будут приведены ниже.

Вместе с тем, прогресс в исследовании территории сдерживало и состояние геологического картографирования, которое проводилось здесь 30–50 лет назад приемами съемки среднего масштаба, в то время как великолепная обнаженность региона и исключительная пестрота комплексов, вскрытых в скалах и на поверхности плато, требуют иного методического подхода. Практически не использовались дистанционные данные. Даже та аэрофотосъемка, результаты которой имелись уже 65 и 50 лет назад (1:100000 и 1:25000), не применялась должным образом. Отсутствие надежной геологической основы приводило к появлению экзотических



Рис. 2. Некоторые географические элементы, упоминаемые в статье.

Fig. 2. Geographic elements mentioned in the publication.

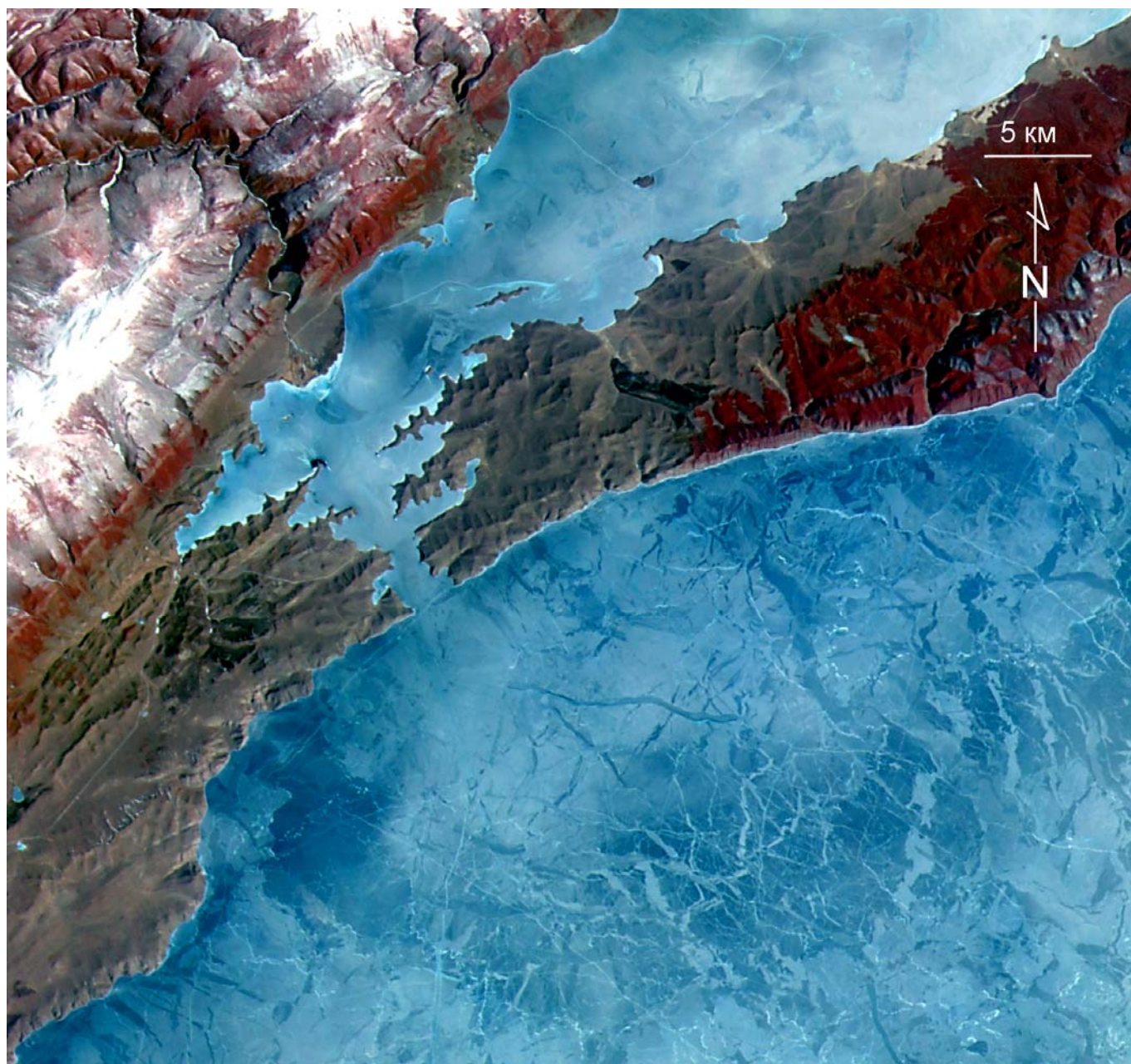
представлений – то, например, об «удивительной» простоте структуры, образованной метаморфитами, то о постепенных переходах между комплексами Сибирского кратона и Ольхонского террейна (в современной понимании этих структур). Если бы геологические исследования сопровождались составлением профессиональных геологических карт, подобные представления не могли бы появиться даже в качестве осторожного предположения.

Не углубляясь в обсуждение этого вопроса, отметим лишь, что составление пакета карт геологического содержания стало основной задачей первого этапа наших исследований. Было очевидно, что без этого надежды на какое-либо продвижение в геологическом изучении региона наивны, да и вообще оно вряд ли возможно.

Наряду с обычными приемами детальной геологической картографии, были применены некоторые

методические новинки. Отметим две из них.

1. Для изучения скальных разрезов побережья Байкала были широко использованы зимние полевые работы. Только это позволяет в деталях, с геологическим молотком в руках, без спешки и приключений работать на скалах, что практически исключено здесь летом. Ольхонские берега нередко лишены пляжей, скалы круто погружаются в воду (глубина Байкала уже в 500–800 м от берега достигает 1000 м). Здесь обычны штормовые и ураганные ветры, а волны, бьющие в скалы, достигают большой высоты и силы. Скалы же протягиваются на многие километры, и попасть в такую ловушку, передвигаясь на лодке, очень просто. В подобных ситуациях исследователю приходится заниматься не столько геологией, сколько собственным спасением. Такой экстрим, интересный, наверное, сам по себе, в профессиональном плане оказывается бес-



**Рис. 3.** Среднемасштабный космический снимок центральной части региона. Ранняя весна, Байкал еще во льду. Характерная деталь: снег и на плато, и на льду практически отсутствует. Это работа ветра и Солнца.

**Fig. 3.** Meso-scale satellite image of the central part of the area. In early spring, Baikal is still covered with ice. A characteristic feature: no snow on the plateau and on the ice is observed. This resulted from wind and Sun activity.

полезным. Выход на лед – единственно правильное решение. С 2003 г. мы провели восемь таких ледовых экспедиций. Работа зимой (ранней весной) по льду Байкала, когда ледяной покров еще крепок (рис. 3–8), но морозы уже отступили, открывает совсем другие возможности.

2. Второй момент в методическом плане – плотное использование данных дистанционного зондирования Земли. Аэрокосмические материалы высокого разрешения обеспечивают ту точность геологического картирования, которая соответствует природной ситуации – пестроте картируемых комплек-

сов и высокой степени их обнаженности и в плане, и в разрезе. По обеспечению данными аэрофотосъемок и космических съемок Ольхонский регион как геологический объект сегодня не имеет себе равных в нашей стране.

#### **1. МАТЕРИАЛЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Ольхонский регион Западного Прибайкалья относится к числу площадей высокого класса дешиф-



**Рис. 4.** Начало крутого спуска к бухте Тажеран (март). Общая протяженность скальных разрезов в регионе равна 400 км. Мест, где возможен спуск автомашины на лед Байкала, немного. Это – одно из них.

**Fig. 4.** The steep slope to the Tazheran Bay (March). This is one of very few sites where a car can descend onto the ice of Baikal. Continuous cliff sections in the area extend for 400 km.

---



**Рис. 5.** Скальное обнажение в районе бухты Тажеран. Скалы вскрывают невероятные по сложности структурные комбинации – и это серьезное предупреждение горячим головам в их попытках представить геологию региона в упрощенном виде.

**Fig. 5.** Coastal rocks in the Tazheran Bay area. Cliffs expose intricate structural combinations, which is the serious warning for hot heads in their attempts to simplify the geology of the area.

---



**Рис. 6.** 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.

**Fig. 6.** Ice cover near the mouth of the Anga River (left) and the Orso Cape (right). Snow is completely removed by winds and practically any place is accessible for a car. Winter works are highly dependent on ice conditions. It is often ideally smooth and transparent. It is evident that working on ice is associated with high danger risks and requires precautions. Numerous fissures extend sometimes for tens of kilometers, being 'live' systems often with open water, but more often with pile-up of ice hummocks.



**Рис. 7.** Восточное побережье острова Ольхон. Торосы льда нередко представляют собой труднопреодолимое препятствие не только для автомашин, но и для продвижения пешком.

**Fig. 7.** The eastern coast of the Olkhon Island. Ice hummocks are often difficult to cross both by car and on foot.



**Рис. 8.** Северо-восточная часть острова Ольхон. Протяженность непрерывного скального разреза составляет здесь более 20 км. Он расположен между мысами Ижимей и Хобой. На снимке – фрагмент этого разреза. В центре – залив Узур – единственное место, где в этом районе можно спуститься на лед на автомашине.

**Fig. 8.** The northeastern segment of the Olkhon Island. A continuous section in cliffs is more than 20 km long. It extends from the Izhimei cape to the Khoboi Cape. The picture shows a fragment of the section. The Uzur Bay in the center is the only place wherefrom it is possible to drive a motor vehicle to the ice cover of the lake.

рируемости дистанционных материалов. Природные условия здесь таковы, что многие компоненты геологических структур и различные типы пород оказались отпрепарированными в рельефе. Использование данных аэро- и космического зондирования позволяет уверенно идентифицировать такие системы, детали их строения и, как результат, проводить их картографирование с большой точностью [Федоровский, 2007б, 2008а].

Многоэтапные структурные комбинации, составляющие тектонический коллаж коллизийной системы, и высокая степень обнаженности региона обусловили необходимость соответствующей детальности полевых исследований и активного применения данных дистанционного зондирования. Все полевые маршруты проводились с использованием аэрофотоснимков масштаба 1:5000. Геологические карты опорных участков составлялись именно в этом масштабе. С этой целью были придуманы специальные планшеты из оргстекла, позволяющие закреплять достаточно большой (42×42 см) аэрофотоснимок и поверх него матовую прозрачную лавсановую пленку, на которой удобно работать карандашом. Позднее, когда у нас появились космические снимки, планшеты были модифицированы, но техника полевой работы оставалась прежней, – каков бы ни был дистанционный материал, главным полевым инструментом оставался карандаш.

Естественно, обычными полевыми приборами стали GPS-приемники. Однако ошибка, свойствен-

ная таким приборам, несравнима с той точностью, которую позволяет достигать использование космических снимков сверхвысокого разрешения и аэрофотоснимков сверхкрупного масштаба. Поскольку весь дистанционный материал попиксельно привязан к мировой системе координат, он объективно обеспечивает привязку того или иного объекта с такой точностью, которая превышает возможности любого GPS-приемника. В свете применения всех этих технологий было бы целесообразно совсем избавиться от карандаша и полностью перейти на цифровой формат работы с использованием компьютера непосредственно в геологических маршрутах, как это практикуется в некоторых университетах США [Knoop, Van der Pluijm, 2006]. Такой опыт у нас есть, но сделать его основным пока не удастся. Этому мешают многочисленные «мелкие» факторы. Например, яркое солнечное освещение (картинка на дисплее ноутбука или нетбука становится невзрачной). Определенное неудобство составляет и необходимость непрерывного наблюдения в ходе маршрута по пересеченной местности с компьютером и молотком в руках. Современное, но пока и бесполое...

В целом дистанционный материал разнообразен. Он включает два пакета (рис. 9, 10):

1) аэрофотоснимки четырех масштабов (1:5000, 1:12000, 1:25000, 1:100000),

2) космические снимки среднего, высокого и сверхвысокого пространственного разрешения с



**ОЛЬХОНСКИЙ РЕГИОН**  
**Обеспечение геологических исследований дистанционными данными**

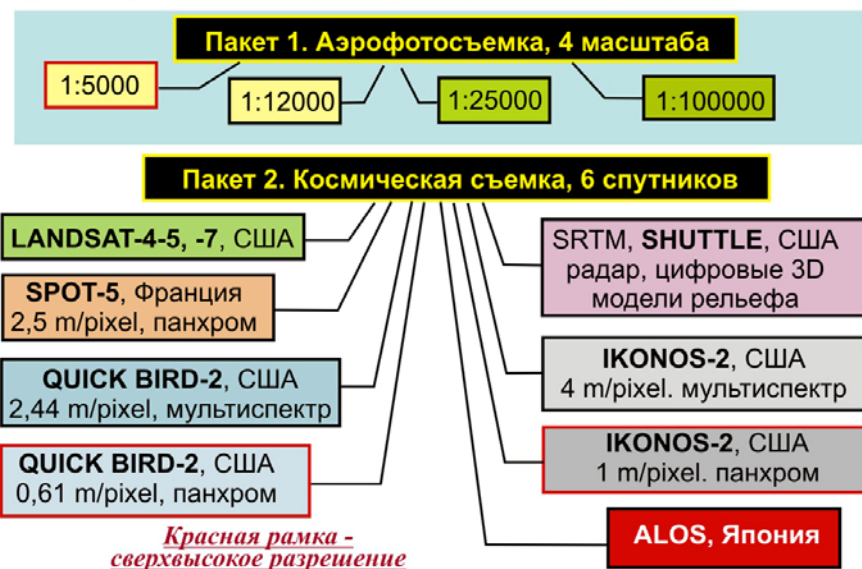


Рис. 9. Два пакета дистанционных данных на площадь Ольхонского региона.

Fig. 9. Two packages of remote sensing data on the Olkhon region.

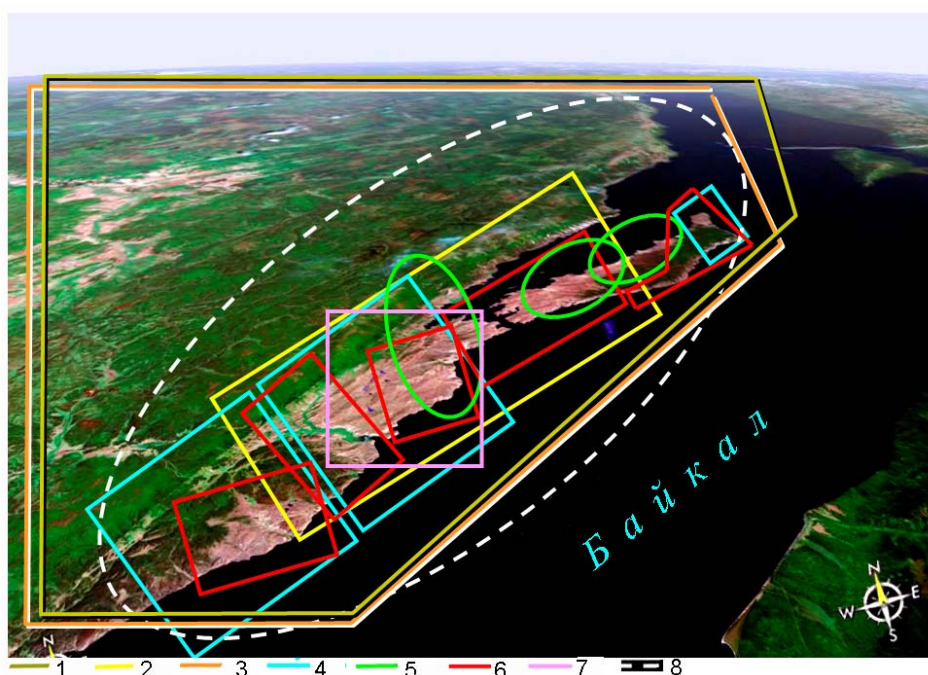


Рис. 10. Площади Ольхонского региона, на которые имеются дистанционные данные, полученные с самолетов и спутников (основа – космический снимок, аксонометрия). 1 – аэрофотосъемка, стандарт (Россия), масштаб 1:25000 и 1:100000; 2 – специальная аэрофотосъемка (Россия), масштаб 1:5000 и 1:12000; 3 – спутник LANDSAT-7 (США), 15 и 30 м/пиксель, мультиспектральный формат; 4 – спутник SPOT-5 (Франция), 2,5 м/пиксель, панхроматический формат; 5 – спутник IKONOS-2 (США), 1 и 4 м/пиксель, панхроматический и мультиспектральный форматы; 6 – спутник QUICK BIRD-2 (США), 0,61 и 2,44 м/пиксель, панхроматический и мультиспектральный форматы; 7 – спутник ALOS (Япония, The Advanced Land Observation System), триплет; 8 – спутник SHUTTLE (США), радарная съемка.

Fig. 10. Sites of the Olkhon region provided with air born and satellite born remote sensing data (the base is space image, axonometry). 1 – aerial photography, standard (Russia), scale 1:25000 and 1:100000; 2 – special aerial photography (Russia), scale 1:5000 and 1:12000; 3 – Satellite LANDSAT-7 (USA), 15 and 30 m/pix, multispectral format; 4 – Satellite SPOT-5 (France), 2.5 m/pix, panchromatic format; 5 – Satellite IKONOS-2 (USA), 1 and 4 m/pix, panchromatic and multispectral formats; 6 – Satellite QUICK BIRD-2 (USA), 0.61 and 2.44 m/pix, panchromatic and multispectral formats; 7 – Satellite ALOS (Japan, Advanced Land Observation System), triplet; 8 – Satellite SHUTTLE (USA), radar surveying.

шести спутников – **LANDSAT-7 ETM+**, **IKONOS-2**, **QUICK BIRD-2**, **SHUTTLE** (миссия SRTM) (США), **SPOT-5** (Франция), **ALOS** (Япония).

Широко используем и 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.

Обеспечение площади дистанционным материалом показано на рисунках 9, 10.

Материала много. И все же территория региона, как видно на схеме (рис. 10), неравномерно покрыта дистанционными данными. При заказе снимков мы старались избегать съемки лесных массивов, степень дешифрируемости которых невелика. Зато на одни и те же степные площади удалось получить дистанционный материал с разных самолетов и спутников. Эти снимки сделаны не только в разные годы, но и в разные времена года, в разное время суток, с различных высот и при различной освещенности. Космические съемки, кроме того, выполнены в различных спектральных каналах, в панхроматическом и мультиспектральном форматах. Снимки со спутника **ALOS** (Япония) сделаны в формате **PRISM** (триплет). Со спутника **SHUTTLE** (США) – в рамках миссии *Shuttle radar topographic mission (SRTM)* – с помощью специальной радарной системы (два радиолокационных сенсора SIR-C и X-SAR) получен материал с применением метода радарной интерферометрии (*radar interferometry*). Разрешение 90 м (Level-1, 3 arcseconds), размер элемента 30×30 м, ≤20 м точности по высоте.

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» (капитан – кандидат технических наук А.В. Храмов). Полезный ресурс составляют и многочисленные фотографии ключевых участков, полученные при съемках с вертолетов.

В целом дистанционный материал обеспечивает не только более уверенную расшифровку сложных структурных комбинаций, но и точность нанесения геологических границ. Ошибка не более ±1–2 м [Федоровский, Скларов, 2009].

Разумеется, далеко не все проблемы, возникавшие по мере выполнения исследований в регионе, уже нашли свое решение. Наоборот, число вопросов, на которые пока нет ответов, год от года возрастает. Но многое, вместе с тем, стало более ясно, чем прежде. И главное, постепенно вырисовывается тектоническая матрица региона. Именно она позволяет понять общую конструкцию системы, ее анатомию и постепенно перейти от среднemasштабного 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 кол-

лизионной системы, а нередко и весьма кардинально корректировать саму региональную концепцию. И так – до бесконечности. Хотя в итоге всех этих усилий удалось достигнуть невиданной 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.

## 2. ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ГЕОЛОГИИ И ТЕКТОНИКИ ОЛЬХОНСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА

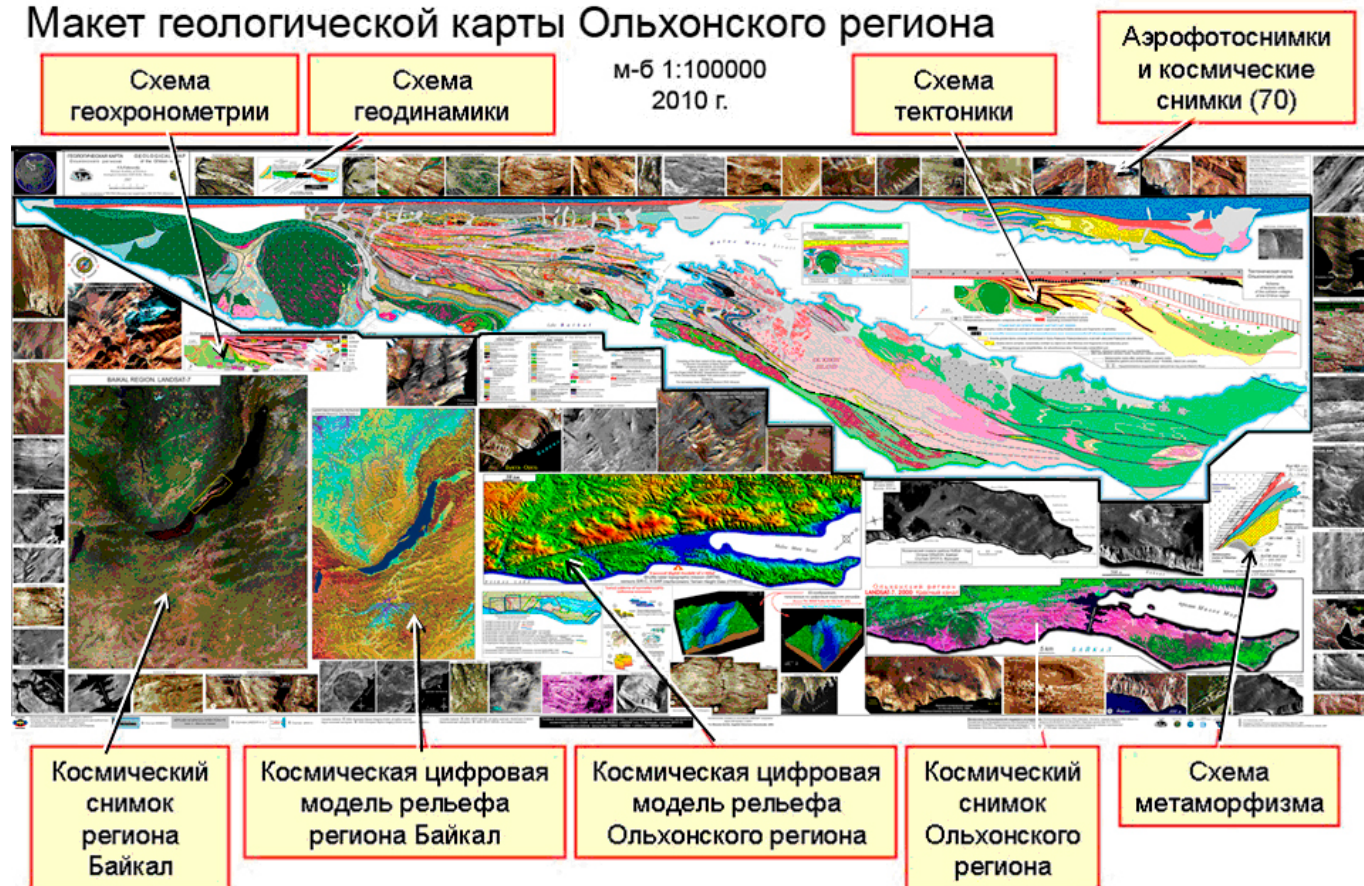
На западном побережье Байкала, между северными широтами N 52°30' и N 53°30', локализована коллизионная система, возникшая в раннем палеозое в результате серии столкновений Сибирского кратона и многочисленных микротеррейнов, составляющих композитный Ольхонский террейн [Федоровский и др., 1995; Федоровский, 2004; Fedorovsky, 2005]. В современном срезе здесь вскрыты глубинные горизонты земной коры, представленные метаморфическими и магматическими комплексами (рис. 11). Данными, которые могли бы свидетельствовать о строении верхних частей коры того времени, мы не располагаем.

Колебания метаморфизма значительны: от эпидот-амфиболитовой до гранулитовой фации включительно (давление от 3.5 кбар до 8–9 кбар, температура от 350 до 780–850 °С). И температура, и давление метаморфизма нарастают по направлению с юго-востока (от побережья Байкала) на северо-запад (к Приморскому хребту). Незатронутыми метаморфизмом оказываются лишь центральные части крупных массивов габброидов (их краевые зоны полностью переработаны, превращены в амфиболиты и кристаллические сланцы основного состава).

На рис. 12 снята вся «лишняя» информация и показаны только основные синметаморфические разрывные структуры. Это позволяет, освободившись от хаоса самых разных элементов геологического устройства территории, отчетливо видеть, что глубинные сдвиги были главным структурорегулирующим фактором, создавшим картируемую в современном срезе тектоническую матрицу региона.

На площади Приольхонья (пример которой здесь приведен) мы выделяем 56 сдвиговых пластин. Это число, конечно, условно. Хотя каждая из сдвиговых пластин реальна и ограничена бластомилонитовыми швами, при желании можно выделить и 560 пластин, и любое другое их количество (тектоническая делимость коллизионного композита очень велика). Все зависит от масштаба карты. Главное достоинство тех пластин, которые показаны на схеме, – они могут быть весьма точно закартированы и без труда идентифицируются на снимках любого

## Макет геологической карты Ольхонского региона



**Рис. 11.** Макет новой геологической карты Ольхонского региона (по состоянию на 2010 г., готовится к изданию). Масштаб карты 1:100000. Размер карты 100×200 см. В зарамочном поле карты размещены схемы тектоники, геодинамики, метаморфизма, геохронометрии, а также цифровые модели рельефа и 70 аэрофотоснимков и космических изображений высокого разрешения.

**Fig. 11.** Montage of a new geological map of the Olkhon region (as of year 2010). The map at a scale of 1:100000 is being prepared for publication. Its size is 100×200 cm. Margin data involve diagrams of tectonics, geodynamics, metamorphism, geochronology, as well as digital models of topography and 70 aerial photograph and space images of high resolution.

типа и масштаба.

Сдвиговые швы неодинаковы по своему рангу. Одни их них разделяют сдвиговые пластины, образованные разными по составу, а нередко и разными по возрасту комплексами. Другие локализованы внутри пластин однообразного состава. Часть швов включает фрагменты офиолитового комплекса (на схеме они показаны специальным знаком), остальные швы таких признаков не обнаруживают.

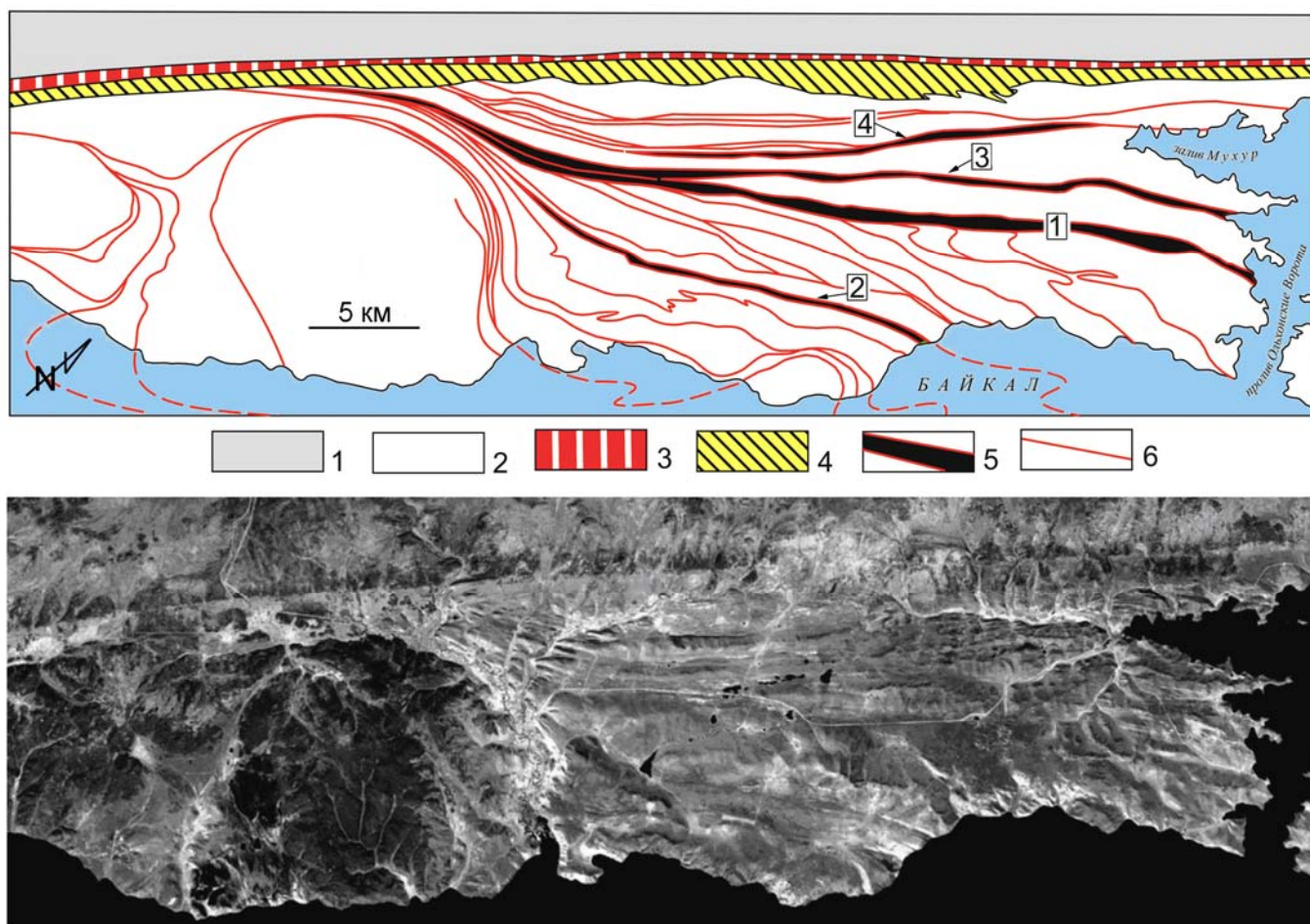
Интересно то, что даже на космическом снимке среднего пространственного разрешения отчетливо дешифрируются многочисленные сдвиговые пластины и разделяющие их бластомилонитовые швы. Это специфическая особенность рельефа региона.

Синтез геологического материала показывает, что коллизионный коллаж региона составляют (кроме собственно Сибирского кратона) пять типов фанерозойских комплексов. Сдвиговые пластины, формирующие эту композицию, отличаются не только составами пород, но и возрастными метаморфическими комплексами (рис. 13).

Сдвиговые пластины разделены швами бластомилонитов, а весь коллаж тектонических единиц отделен от Сибирского кратона главным коллизийным швом системы террейн–континент.

### 2.1. Коллизионный шов системы террейн – континент

Коллизионный шов [Федоровский и др., 1997] представлен бластомилонитами эпидот-амфиболитовой фации по породам и раннего докембрия, и раннего палеозоя. В Приольхонье, в бластомилонитах центральной части коллизионного шва, заключены крупные отторженцы палеозойских гранулитов. Шов, при его ширине в плане всего 1500 м, протягивается на 150 км – от устья р. Бугульдейки на юго-западе региона до района мыса Арал на северо-востоке. Его продолжение в обе стороны скрыто акваторией Байкала. На всем этом протяжении к коллизионному шву примыкают различные зоны (группировки сдвиговых пластин коллизионно-



**Рис. 12.** Схема синметаморфических сдвиговых швов юго-западной части Ольхонской коллизонной системы (Приольхонье) и панхроматический космический снимок этой площади (спутник LANDSAT-7 ETM+). 1 – Сибирский кратон, ранний докембрий; 2 – Ольхонский композитный террейн, ранний палеозой; 3 – уступ современного Приморского разлома Байкальской рифтовой зоны; 4 – коллизонный шов системы Ольхонский террейн – Сибирский континент; 5 – blastomylonitic сдвиговые швы с участием офиолитов (сутуры); 6 – blastomylonitic сдвиговые швы без участия офиолитов. Цифры на схеме: 1 – Главная сдвиговая зона, офиолитовая сутура Горхон-Харикта, 2 – офиолитовая сутура Орсо (сутура Хэтчера), 3 – офиолитовая сутура Гызги-Нур, 4 – офиолитовая сутура Шидабарсой.

**Fig. 12.** Sketch map of syn-metamorphic shear sutures on the southwestern segment of the Olkhon collision system (Priolkhonie) and the panchromatic space image of the area (LANDSAT-7 ETM+). 1 – Siberian Craton, Early Precambrian; 2 – Ol'khon composite terrane, Early Paleozoic; 3 – bench of the present-day Primorskii fault of the Baikal rift zone; 4 – collisional suture of the Ol'khon Terrane – Siberian continent system; 5 – blastomylonitic shear zones with ophiolites (sutures); 6 – blastomylonitic shear zones without ophiolites. Fig.s on the sketch map: 1 – Main shear zone, ophiolitic suture Gorkhon–Kharikta; 2 – ophiolitic suture Orso; 3 – ophiolitic suture Gyzgi–Nur; 4 – ophiolitic suture Shida-Barsoi.

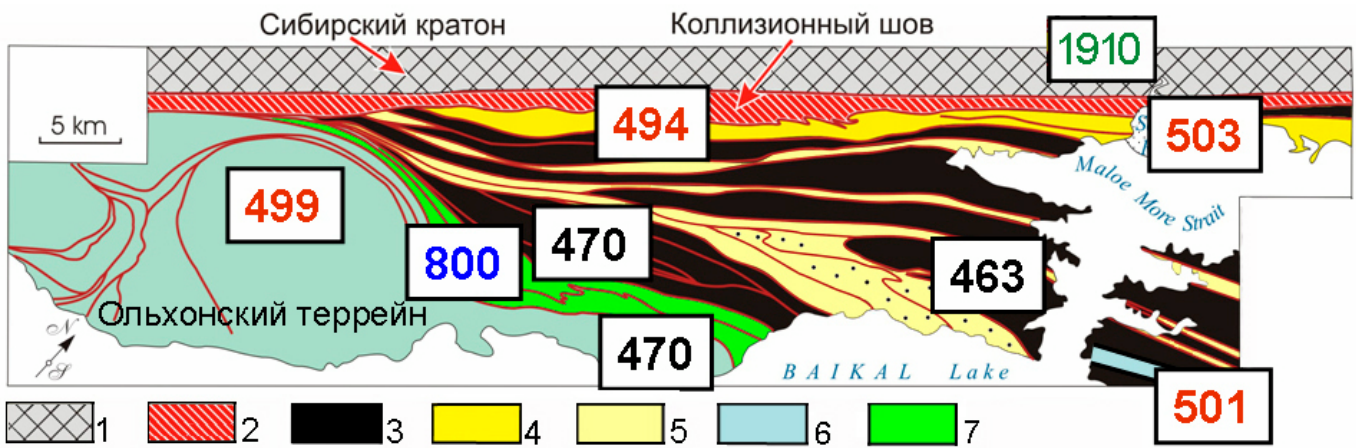
го коллажа) Ольхонского террейна и различные зоны метаморфизма (рис. 14).

Во многих публикациях можно встретить утверждение о том, что в Ольхонском регионе Сибирский кратон граничит с гранулитами Чернорудской зоны. Это верно лишь частично. Картирование показало, что к коллизонному шву под косым углом подходят пять зон Ольхонского террейна. Шов, кроме того, срезает несколько зон метаморфизма, а контакт с гранулитами – не более чем частный случай.

Интересна история открытия шва. Многие годы он оставался незамеченным. Геологов гипнотизировало то обстоятельство, что в рельефе контраст-

но выражен современный Приморский разлом рифтовой системы Байкала, который, как потом оказалось, совпадает с северо-западной границей коллизонного шва. Когда стало ясно, что в Ольхонском регионе мы имеем дело с аккреционно-коллизонной системой палеозойского возраста, возникла и проблема поиска коллизонного шва. Его не могло не быть, и он был обнаружен практически мгновенно, а затем шаг за шагом и откартирован на всем его протяжении.

Радарные снимки региона со спутника SHUTTLE, обработанные в программе Global Mapper (рис. 15), позволяют получать объемные цифровые модели



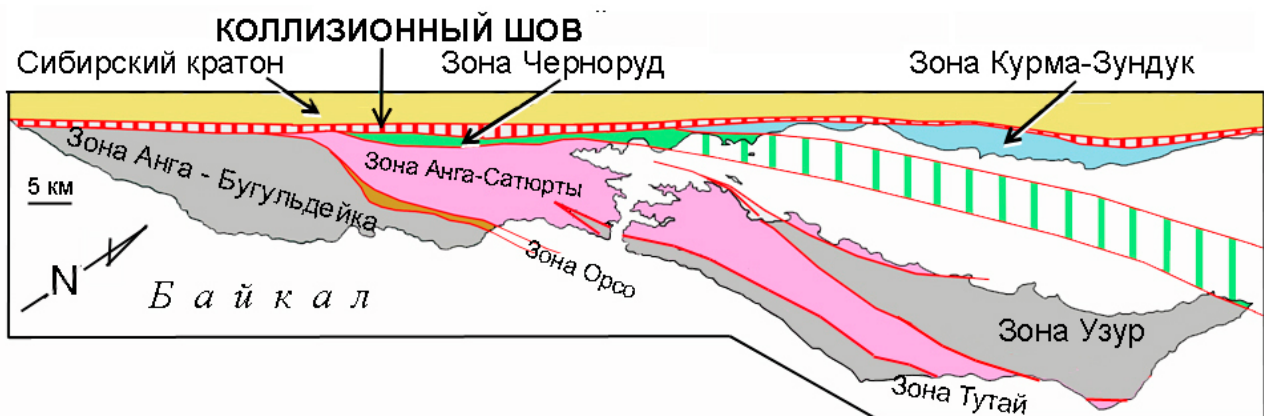
**Рис. 13.** Схема строения коллизионного коллажа в Приольхонье и ключевые геохронометрические датировки (U-Pb метод по циркону). 1 – метаморфический комплекс Сибирского кратона; 2 – бластомилониты главного коллизионного шва; 3 – гранитогнейсовый комплекс Шебарта; 4 – Ольхонский комплекс пестрого состава с участием базитов толеитовой серии (гранулитовая фация метаморфизма); 5 – Ольхонский комплекс пестрого состава с участием базитов толеитовой серии (амфиболитовая фация метаморфизма); 6 – Ангинский комплекс пестрого состава с участием базитов субщелочной серии (эпидот-амфиболитовая и амфиболитовая фации метаморфизма); 7 – комплекс Орсо. Лептиниты и амфиболиты.

**Fig. 13.** The structure of the collision collage in the Priolkhonie, and key geochronometrical datings (U-Pb method on zircon). 1 – metamorphic complex of the Siberian Craton; 2 – blastomylonites of the main collision suture; 3 – the Shebarta granite-gneiss complex; 4 – the Olkhon complex of diversified composition with participation of tholeiitic basic rocks (granulite metamorphic facies); 5 – the Olkhon complex of diversified composition with participation of tholeiitic basic rocks (amphibolite metamorphic facies); 6 – the Anga complex of diversified composition with participation of subalkaline basic rocks (epidote–amphibolite and amphibolite metamorphic facies); 7 – the Orso complex. Leptinites and amphibolites.

рельефа. Масштаб этих изображений невелик (1:250000), и хорошо видны только очень контрастные и крупные структуры. Так, например, современный Приморский разлом выражен весьма резко. Но коллизионный шов, прилегающий к нему, распознается с трудом.

На аэрофотоснимке (рис. 16) коллизионный шов выглядит гораздо менее контрастно, чем Примор-

ский разлом. Но нельзя сказать и о том, что он совсем не дешифрируется. При предварительном дешифрировании он, хотя и не всегда уверенно, обнаруживается, но после первой же полевой проверки надежно распознается на всем протяжении. Коренные выходы вскрывают здесь разнообразные бластомилониты. На космических снимках и аэрофотоснимках разного масштаба (рис. 17–20) про-



**Рис. 14.** Схема тектонического районирования Ольхонского региона. Многочисленные сдвиговые пластины составляют семь группировок (зон); они отличаются друг от друга по внутренней структуре, составу и возрасту.

**Fig. 14.** Tectonic regionalization of the Olkhon region. Numerous shear slabs compose seven groups (zones); they are different in inner structure, composition and age.

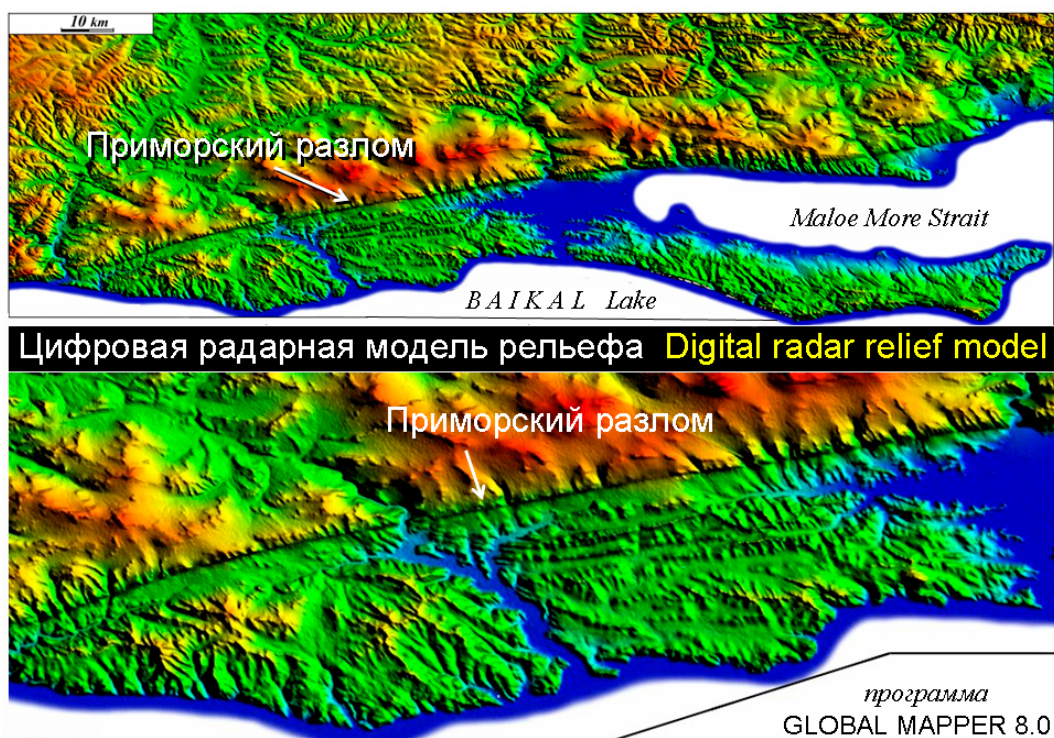


Рис. 15. Радарные снимки региона со спутника SHUTTLE, обработанные в программе Global Mapper.

Fig. 15. Radar images of the area from SHUTTLE satellite, processed in Global Mapper program.

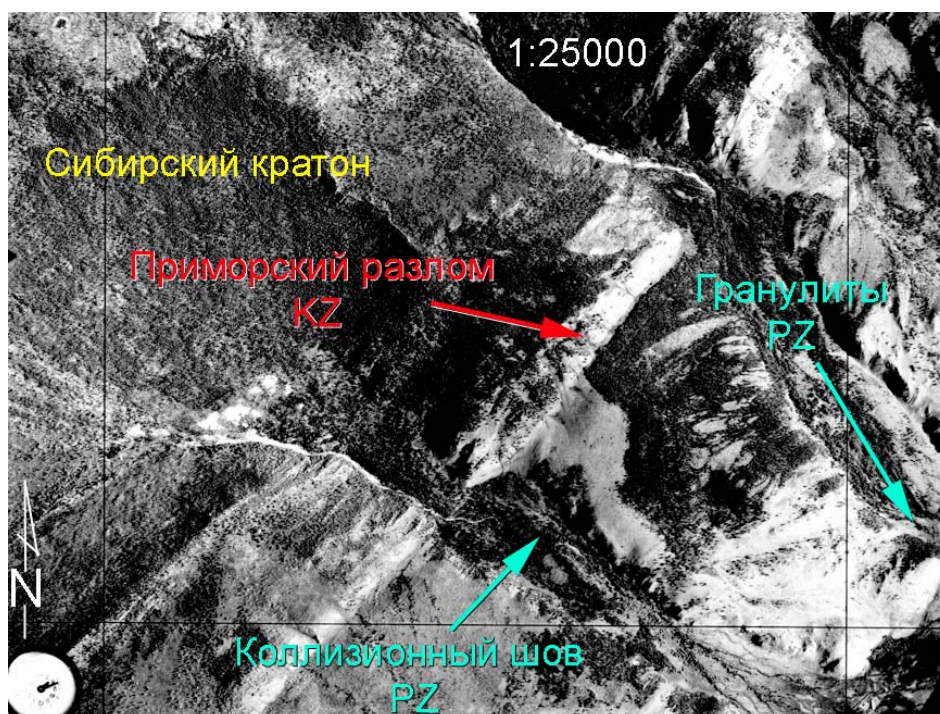
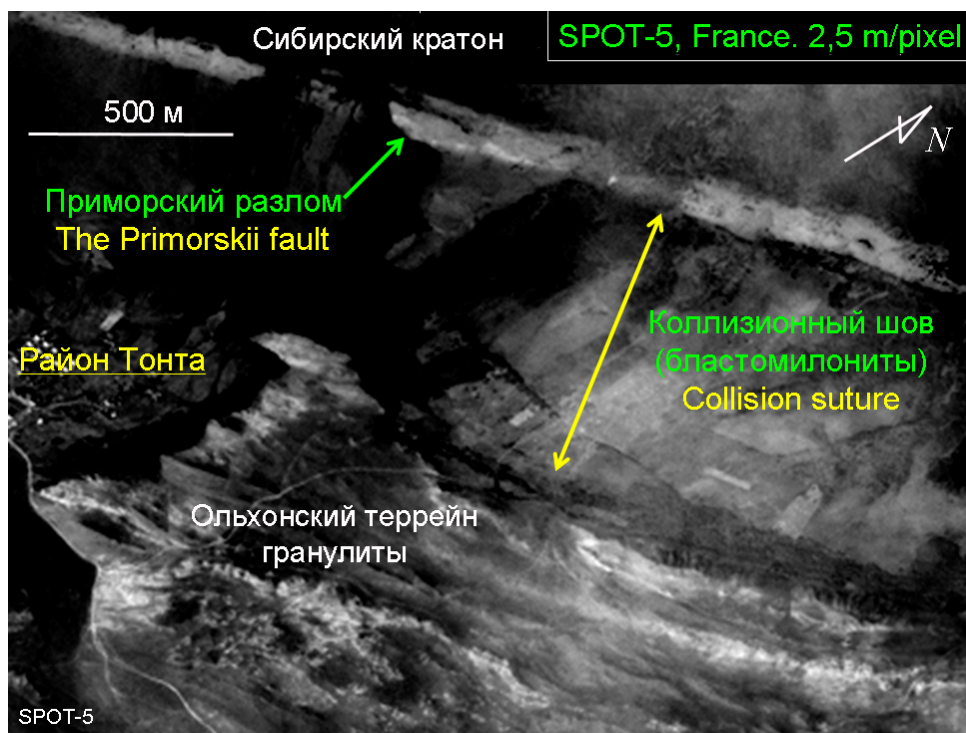


Рис. 16. Приморский разлом на аэрофотоснимке масштаба 1:25000. Широкая темная полоса, примыкающая к разлому с юго-востока, – коллизионный шов. Слева от разлома – Сибирский кратон. Справа от коллизионного шва – раннепалеозойские гранулиты Чернорудской зоны (Ольхонский террейн).

Fig. 16. The Primorskii fault on the aerial photo. Scale 1:25000. The wide dark strip adjoining the fault from the southeast is the collision suture. The Siberian Craton is situated to the left of the fault, and the Early Proterozoic granulites of the Chernorud zone (the Olkhon terrane) occur to the right.



**Рис. 17.** Космический снимок со спутника SPOT-5. Разрешение 2.5 м/пиксель, панхроматический формат. Коллизионный шов распознается уверенно.

**Fig. 17.** Space image from SPOT-5. Resolution is 2.5 m/pix, panchromatic format. The collisional suture is confidently recognized.



**Рис. 18.** Космический мультиспектральный снимок со спутника IKONOS-2, разрешение 4 м/пиксель. На дистанционных изображениях высокого разрешения коллизионный шов определяется без труда. На снимках такого масштаба отчетливо видны и современный Приморский разлом, и коллизионный шов раннего палеозоя.

**Fig. 18.** Multispectral space image from IKONOS-2; resolution is 4 m/pix. On remote sensing imagery of high resolution, the collisional suture is easily recognized. Both the present-day Primorsky Fault and the Early Paleozoic collisional suture are clearly observed on the images of such scale.



**Рис. 19.** Аэрофотоснимок масштаба 1:12000. Верховья р. Кучелги. Верхняя часть снимка – зона коллизионного шва (бластомилониты по породам раннего палеозоя). Нижняя часть снимка – раннепалеозойские гранулиты Чернорудской зоны. В 500 м за верхним краем снимка – Сибирский кратон. Красная линия – граница коллизионного шва и гранулитов Чернорудской зоны Ольхонского террейна. На снимке хорошо дешифрируется серия крупных складок с крутыми шарнирами, локализованная в бластомилонитах эпидот-амфиболитовой фации по палеозойским гранулитам террейна.

**Fig. 19.** Aerial photo of the upper reaches of Kuchelga River. Scale 1:12000. The upper part of the photograph shows the collision suture zone (blastomylonites on the Early Paleozoic rocks). The bottom part of the image shows the Early Palaeozoic granulites of the Chernorud zone. The Siberian Craton is at a distance of 500 m behind the upper edge of the map. The red line denotes the boundary between the collision suture and granulites of the Chernorud zone of the Olkhon terrane. The series of large folds with steep-dipping hinges localized in blastomylonites of epidote–amphibolite facies after the Paleozoic granulites of the terrane is clearly interpreted on the photograph.



**Рис. 20.** Складки на аэрофотоснимке масштаба 1:5000. Структуры сложены бластомилонитами по раннепалеозойским породам. Наклон шарниров около 65°. Степень обнаженности весьма велика, но неравномерна по площади этого участка. Степень дешифрирования – суперкласса. Уменьшено по сравнению с оригиналом.

**Fig. 20.** Folds on aerial photographs. Scale 1:5000. The structures are composed by blastomylonites after the Early Paleozoic rocks. Their hinges dip at about 65°. Bedrocks are well but irregularly exposed. Photo interpretation ability is of the highest degree. Reduced compared to the original.



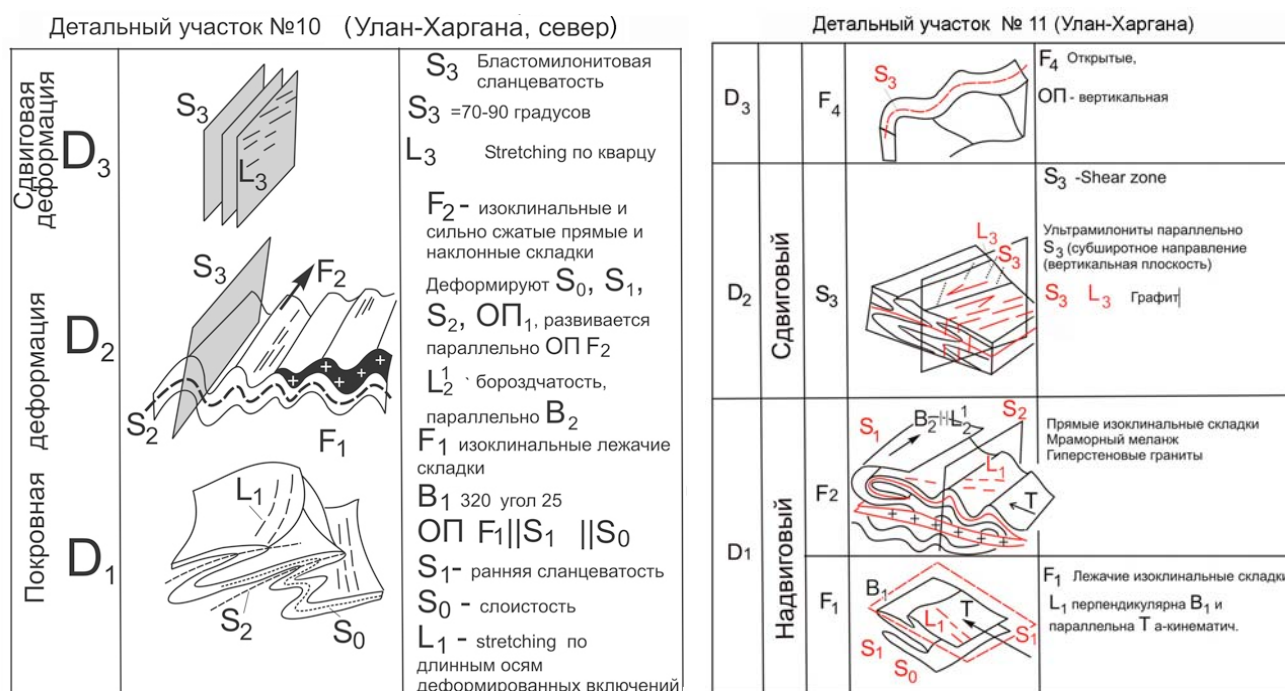


Рис. 21. Два этапа покровных деформаций в зоне метаморфизма гранулитовой фации, предшествовавшие сдвигам [Добржинецкая и др., 1992].

Fig. 21. Two stages of nappe deformations in the zone of granulite facies metamorphism preceding strike-slip faulting [Добржинецкая и др., 1992].

демонстрирована различная дешифрируемость коллизионного шва, нарастающая по мере увеличения пространственного разрешения снимков. Пояснения даны в подрисовочных подписях.

## 2.2. Коллизионный композит Ольхонского террейна

Хотя сдвиговая тектоника – главный мотив деформации, создавшей коллизионный коллаж региона, сдвиговый тектогенез не был единственным в истории его формирования. Сдвиговые деформации были наложены на более ранние (но тоже раннепалеозойские) синметаморфические структурные композиции. Самые ранние из них носили покровный характер и были проявлены повсеместно (рис. 21). Структурный анализ обнаруживает их практически везде [Добржинецкая и др., 1992]. Однако картирование, независимо от степени его детальности, не позволяет уверенно идентифицировать крупные покровные структуры. Удаётся наблюдать лишь их небольшие фрагменты.

Вместе с тем, кроме покровных и сдвиговых деформаций, проявленных практически повсеместно, обширные, но локальные площади занимают гнейсово-купольные структуры. Такие системы обнаружены только в тех местах, где картируются фрагменты раннедокембрийской континентальной коры, вовлеченные в коллизионные деформации раннего

палеозоя. По-видимому, это главный признак, позволяющий выделить два основных типа тектонических единиц в составе коллизионного композита региона. Один тип объединяет сдвиговые пластины с признаками купольного тектогенеза, предшествовавшего сдвиговым деформациям, а другой тип – все остальные сдвиговые пластины, в истории формирования которых купольный тектогенез отсутствовал.

Таким образом, хотя геологическая история региона насыщена эпизодами генетически различных синметаморфических деформаций [Fedorovsky et al., 2005], наиболее яркий и устойчиво картируемый компонент его тектоники связан со сдвиговым тектогенезом, который был проявлен тотально [Федоровский, 2007а].

Синтез материала позволяет структурировать всю систему на два основных типа тектонических единиц:

сдвиговые пластины типа 1 (с проявлениями купольного тектогенеза, предшествовавшего сдвиговому тектогенезу) и

сдвиговые пластины типа 2 (где никаких следов ни купольного тектогенеза, ни самих мигматитов и гранитогайсов не найдено).

В сдвиговых пластинах типа 1 обнаруживаются три стадии деформационного процесса:

первая стадия деформаций – покровный тектогенез;

вторая стадия деформаций – куполообразова-

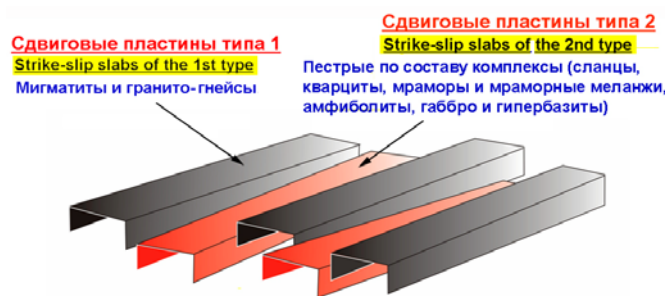


Рис. 22. Принципиальная схема клавишной системы сдвиговых пластин в рельефе.

Fig. 22. Schematic diagram of the keyboard system of shear slabs in the topography.

ние;

третья стадия деформаций – сдвиговый тектогенез (сдвиги деформируют структуры, возникшие в процессе реализации первой и второй стадий).

В сдвиговых пластинах типа 2 установлены следы двух основных тектонических событий, протекавших на фоне регионального метаморфизма:

Первая стадия – покровный тектогенез и формирование лежащих изоклинальных складок двух генераций. В ходе прогрессивной деформации они были сжаты и раздавлены вдоль плоскостей тектонического транспорта. Шарниры испытали вращение с искажением первоначальных ориентировок вплоть до полного параллелизма с направлением движения.

Вторая стадия – сдвиговый тектогенез, формирование региональной системы субвертикальных сдвиговых зон и складчатости, которые трансформируют покровную структуру с образованием системы крутоориентированных макро- и микропластин сдвигового характера.

В итоге все это обеспечивает разную внутреннюю конфигурацию составных компонентов единой в целом сдвиговой системы.

Сдвиговые пластины раннего палеозоя отчетливо видны в современном рельефе. Они образуют клавишную систему. Такой контраст обеспечен разным составом пород тех или иных пластин. Схема на рис. 22 иллюстрирует общую тенденцию: пластины с участием гранитов в их строении возвышаются на 50–200 м над пластинами с преобладанием пород базитового состава. Вместе с тем, пестрый состав пород в пластинах второго типа обуславливает разнообразный рельеф внутри таких зон. Такими, например, массивы габброидов и гипербазитов, занимающие наиболее высокие гипсометрические отметки.

Оба типа пластин хорошо видны на дистанционных изображениях любого масштаба. В рельефе это узкие (500–1000 м), но протяженные (30–100 км) хребты и впадины. Объемная модель рельефа (рис. 23) иллюстрирует эту особенность территории. Белый прямоугольный контур – площадь, показанная на космическом снимке (рис. 24). На мультиспек-

тральном космическом снимке высокого разрешения (2.44 м/пиксель) со спутника QUICK BIRD-2 отчетливо видно линейное чередование «хребтов» и «впадин». Все «хребты» – мигматиты и гранито-гнейсы, «впадины» – пестрый по составу метаморфический комплекс (при полном отсутствии мигматитов и гранито-гнейсов). Хребтами и впадинами эти структуры можно назвать лишь условно: хребты незначительно возвышаются над впадинами (десять метров), но морфологически они выражены очень контрастно. Ширина в плане таких «хребтов» редко достигает одного километра, однако их протяженность превышает ширину в десятки раз. На самом деле и те, и другие структуры – это сдвиговые пластины, отпрепарированные в современном рельефе.

На рис. 25 показан пример «клавишной» структуры рельефа, отражающей гравитационные эффекты в сдвиговой композиции. «Легкие» пластины мигматитового и гранито-гнейсового состава выражены в рельефе в виде узких хребтов. Они разделяют впадины – сдвиговые пластины, в строении которых преобладают породы пестрого состава с участием базитов и гипербазитов. Прямолинейные контакты между пластинами – blastomylonitic швы.

### 2.2.1. Сдвиговые пластины, сложенные породами гнейсово-мигматитового комплекса Шебарта

Практически все структуры такого рода (сдвиговые пластины типа 1) хорошо распознаются на дистанционных изображениях. Нужно отметить важную особенность сдвиговых пластин этого типа: полное несоответствие их внутреннего структурного рисунка (плотная упаковка изометричных или сплюснутых куполов) и ярко-линейной конфигурации тектонических ограничений скоплений куполов. Чем меньше масштаб карты, составляемой на площади развития куполов, тем все более незаметными на них становятся сами купола и объективно картируются лишь линейные зоны тектонических ограничений сдвиговых пластин. Может быть поэтому гранито-гнейсовые купола прежде и не были обнаружены? Впрочем, раньше и сдвиги здесь тоже не были известны.

Различные по составу три комплекса в ближнем инфракрасном канале (NIR) отличаются по цвету и структурному рисунку и уверенно дешифрируются (рис. 26). Специфический рельеф, присущий зонам развития гнейсов и мигматитов, а в инфракрасном канале и «своя» цветовая палитра – все это составляет устойчивый набор признаков, позволяющий с большой точностью картировать гнейсово-мигматитовый комплекс и уверенно отличать его от комплексов иного состава. Площадь, приведенная на этом снимке, интересна еще и тем, что в гнейсово-мигматитовой полосе не обнаружено ни одного купола. Сдвиговый тектогенез и сопровождавшая его синметаморфическая линейаризация проявлены здесь настолько мощно, что следы купольного тектогенеза, предшествовавшего сдвигам, полностью

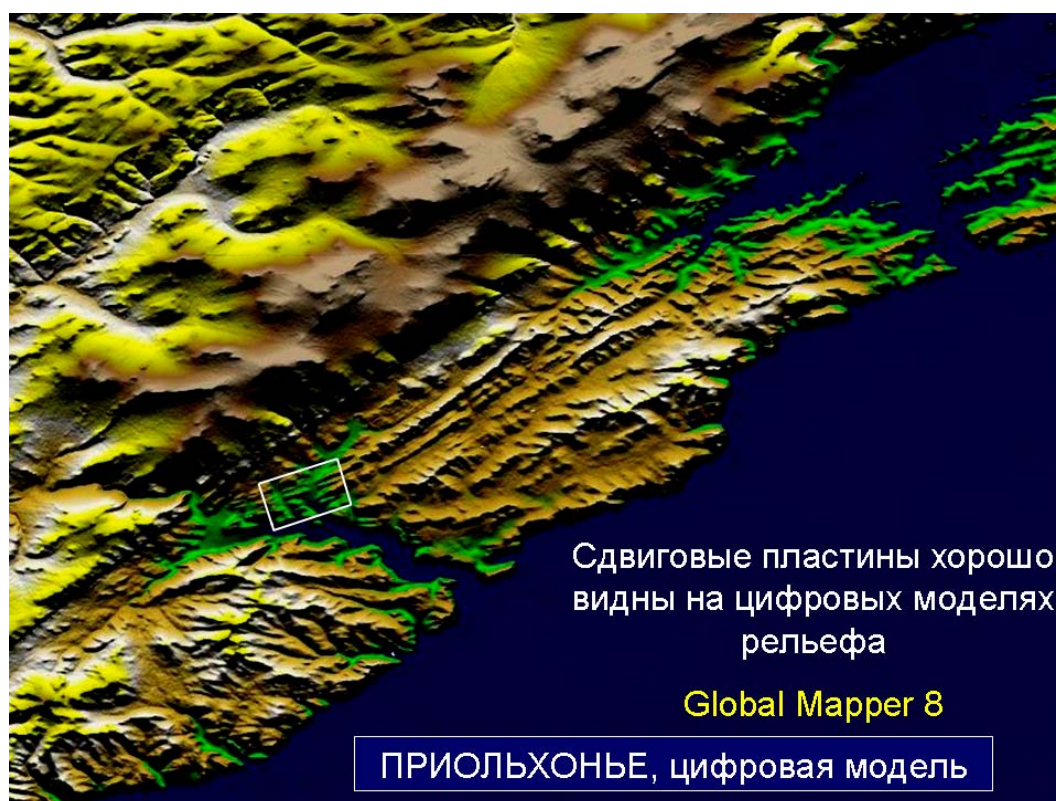


Рис. 23. Объемная модель рельефа Приольхонья. Белый прямоугольный контур – площадь, показанная на космическом снимке (рис. 24).

Fig. 23. 3D model of the Olkhon area relief. The white rectangular is the area shown in the space image (Fig. 24).



Рис. 24. Мультиспектральный космический снимок высокого разрешения (2.44 м/пиксель) со спутника QUICK BIRD-2.

Fig. 24. Multispectral space image of high resolution (2.44 m/pix) from QUICK BIRD-2.

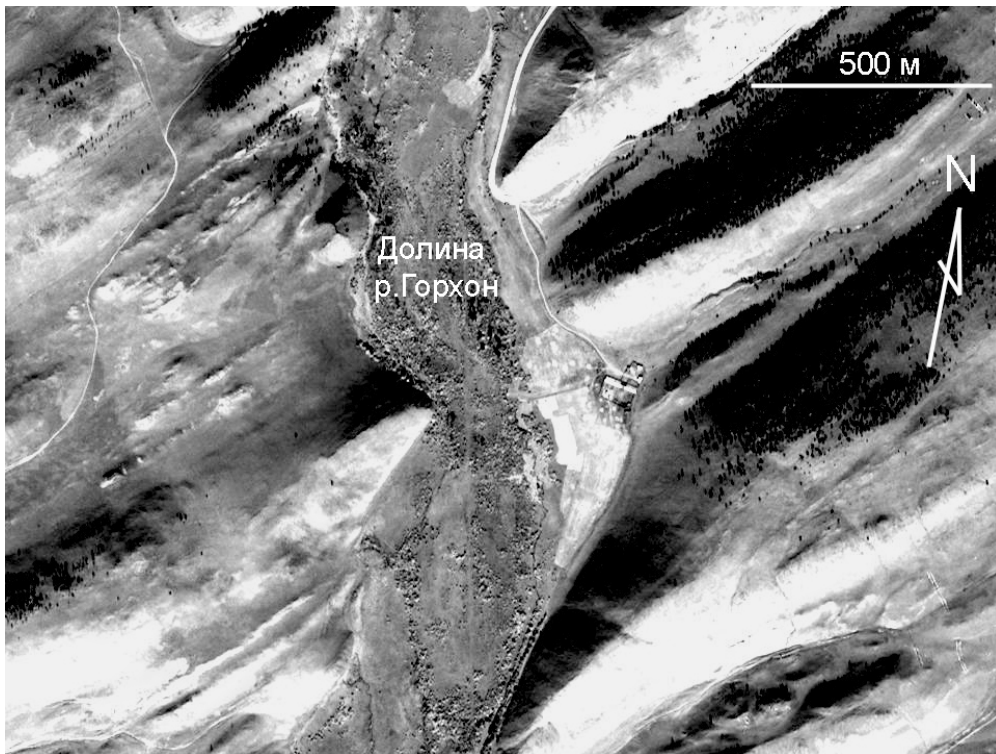


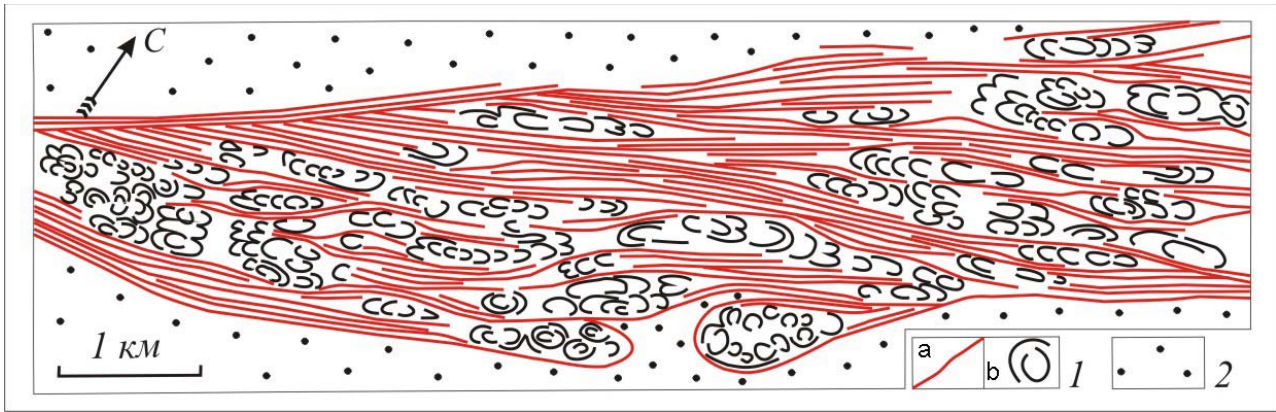
Рис. 25. Фрагмент площади, показанной на предыдущем снимке (в центре – пулл-апарт долина р. Горхон). Панхроматический снимок сверхвысокого разрешения (61 см/пикселе) со спутника QUICK BIRD-2.

Fig. 25. Fragment of the area shown in the previous image. The pull-apart valley of the Gorkhon River is in the centre. Panchromatic image of super-high resolution (62 cm/pix) from QUICK BIRD-2 satellite.



Рис. 26. Космический снимок в ближнем инфракрасном канале (NIR). Спутник IKONOS-2, 4 м/пиксель, мультиспектральный формат.

Fig. 26. Space image in a near infrared channel (NIR). IKONOS-2, 4 m/pix, multispectral format.



**Рис. 27.** Упрощенная схема Центральной купольной зоны [Розен, Федоровский, 2001]. 1 – жилы гранитов (а), гранитогнейсовые купола (b); 2 – силикатно-карбонатные и мафические породы.

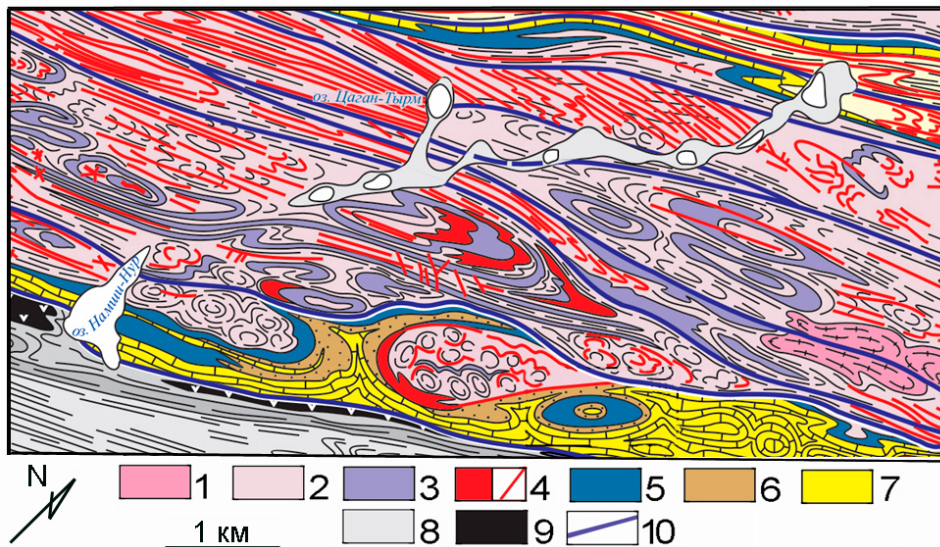
**Fig. 27.** Simplified map of the Central dome zone [Розен, Федоровский, 2001]. 1 – granite veins (a) granite-gneiss domes (b); 2 – silicate-carbonate and mafic rocks.

утрачены. Но и в случае тотального проявления сдвиговой тектоники, как оказывается, структурные рисунки в сдвиговых пластинах разного состава отличаются достаточно четко.

В регионе закартированы сотни куполов. Наиболее контрастно они выражены в рамках Центральной купольной зоны (рис. 27), где впервые и были обнаружены [Федоровский, Соколова, 1986; Федо-

ровский, 1997]

Схема фрагмента Центральной купольной зоны (рис. 28, 29) иллюстрирует соотношения ядер гранитогнейсовых куполов и зон синметаморфических вязких сдвигов, маркируемых, как правило, телами жильных гранитов. Многочисленные гранитогнейсовые и мигматитовые купола составляют структурный каркас зоны. Практически все они раздавлены



**Рис. 28.** Фрагмент геологической карты Центральной купольной зоны. Район озер Намши-Нур и Цаган-Тырм [Федоровский, 2004]. 1 – гранитогнейсы; 2 – гнейсы и мигматиты; 3 – амфиболиты-1; 4 – граниты синметаморфические, жилы гранитов; 5 – амфиболиты-2; 6 – кварциты; 7 – мраморы; 8 – биотитовые, гранат-двуслюдяные микрогнейсы (лептиниты); 9 – метагаббро, гипербазиты; 10 – бластомилониты сдвиговых швов.

**Fig. 28.** Fragment of the geological map of the Central dome zone. The area of Namshi-Nur and Tsagan-Tyrm lakes [Федоровский, 2004]. 1 – granite-gneiss; 2 – gneiss and migmatites; 3 – amphibolites-1; 4 – synmetamorphic granites, veins of granites; 5 – amphibolites-2; 6 – quartzites; 7 – marbles; 8 – biotite, garnet-biotite, garnet-two-mica microgneisses (leptinites); 9 – metagabbro, ultrabasic rocks; 10 – blastomylonites of shear sutures.

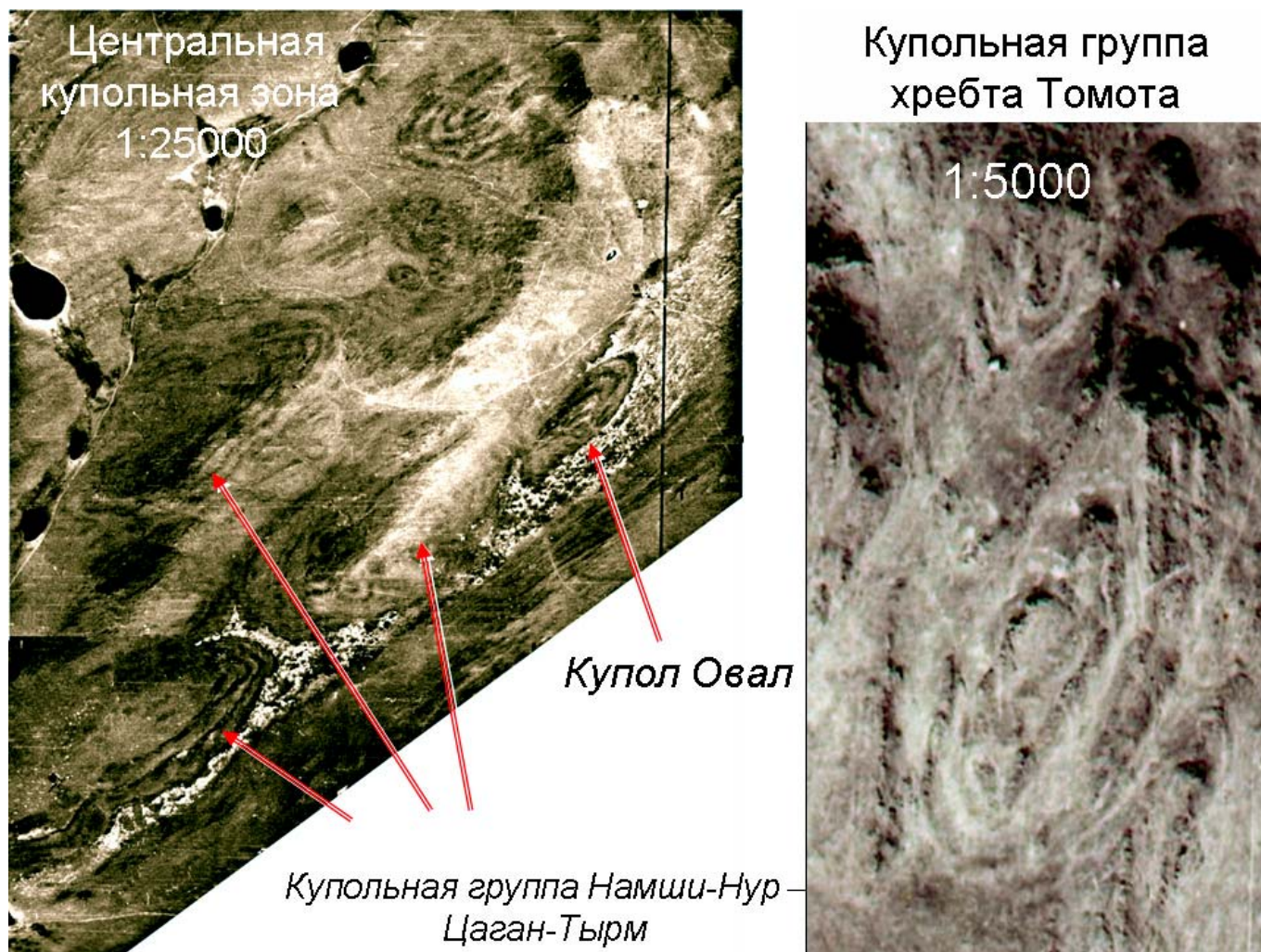


Рис. 29. Внутренняя структура купольных зон в районе озера Намши-Нур (слева) и купола хребта Томота (справа) на аэрофотоснимках разного масштаба.

Fig. 29. Inner structure of the dome zones in the area of Lake Namshi-Nur (left) and the dome of Tomota Ridge (right) on aerial photographs of different scales.

под воздействием более поздней сдвиговой деформации. Сама Центральная купольная зона представляет собой крупную сдвиговую пластину, в составе которой выделяется восемь сдвиговых пластин второго порядка. В границах этой карты видны пять из них. Внутренняя структура куполов реставрирована по окаймляющим поверхностям в мигматитах и гранитогнейсах. Большинство куполов расплющено в ходе сдвиговых деформаций. Они ориентированы параллельно зонам вязких сдвигов, занятым здесь жильными гранитами.

**Внутреннее строение пластин первого типа.** Это узкие, но протяженные многокилометровые горные гряды с ребристой поверхностью. Уверенно дешифрируются на крупномасштабных аэрофотоснимках и космических снимках высокого разрешения. Вместе с тем, хотя на снимках среднего масштаба (1:25000) и космических снимках среднего разрешения сами пластины такого типа выражены

тоже контрастно, их внутренняя структура распознается не всегда уверенно.

Структурный рисунок купольных зон, как упоминалось, своеобразен: отчетливо линейные ограничения большинства таких зон (они имеют сдвиговую природу) совершенно не коррелируют с их внутренним строением, которое отличается плотной упаковкой субизометричных структур.

Гнейсы, мигматиты, гранитогнейсы и амфиболиты, образующие купола, составляют несколько крупных сдвиговых пластин в Приольхонье и на острове Ольхон. Гранитогнейсовые пластины выглядят совершенно «чужеродно», обособленно и как бы самостоятельно в тектоническом месиве метаморфических комплексов региона. Многозначительный факт: только в породах этих пластин среди преобладающих раннепалеозойских цирконов были обнаружены древние цирконы, что позволило уже давно [Бибикова и др., 1990] высказать предполо-



Рис. 30. Купол Овал. Аэрофотоснимок масштаба 1:5000 (уменьшено).

Fig. 30. Oval dome. Aerial photograph, scale 1:5000 (reduced).

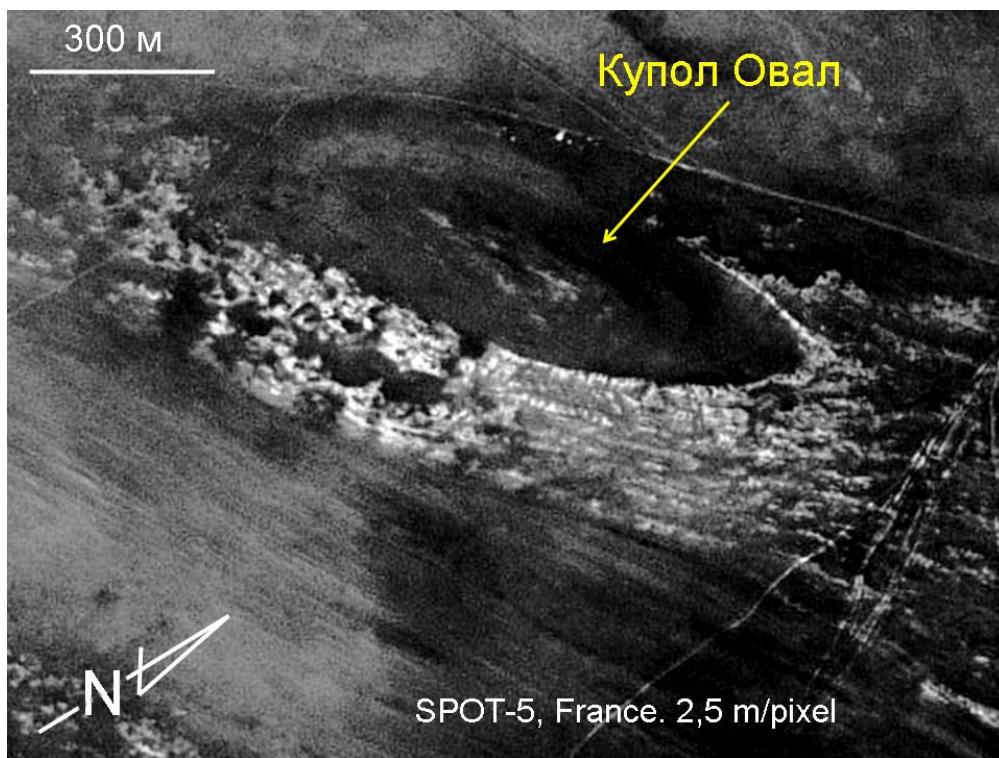
жение о присутствии в раннепалеозойских гнейсово-купольных зонах признаков палеопротерозойского протолита. Данные по Sm-Nd системам куполов [Мишина и др., 2005] показывают, что модельный возраст пород, составляющих купола, еще древнее и отвечает архею (более 3 млрд лет).

Все это позволяет предположить, что гнейсово-купольные зоны или пластины представляют собой отторженцы древней, раннедокембрийской, континентальной коры, интенсивно переработанной в коллизионных ситуациях раннего палеозоя.

Чаще всего в строении купольных зон можно встретить ядра этих структур, в то время как их оболочка развита лишь фрагментарно. Но иногда удается наблюдать и одинаково четко развитые основные компоненты куполов, или наоборот – хорошо вскрытую оболочку этих структур. Таков, например, великолепный купол Овал на юго-восточном фланге Центральной купольной зоны (рис. 30). На всех дистанционных изображениях (рис. 31, 32) хорошо видно структурное несогласие между мраморами (белое) и амфиболитами и гнейсами внешней части купола. Это сдвиговая зона, отделяющая купол Овал от пластины Орсо (нижняя часть рис. 32).

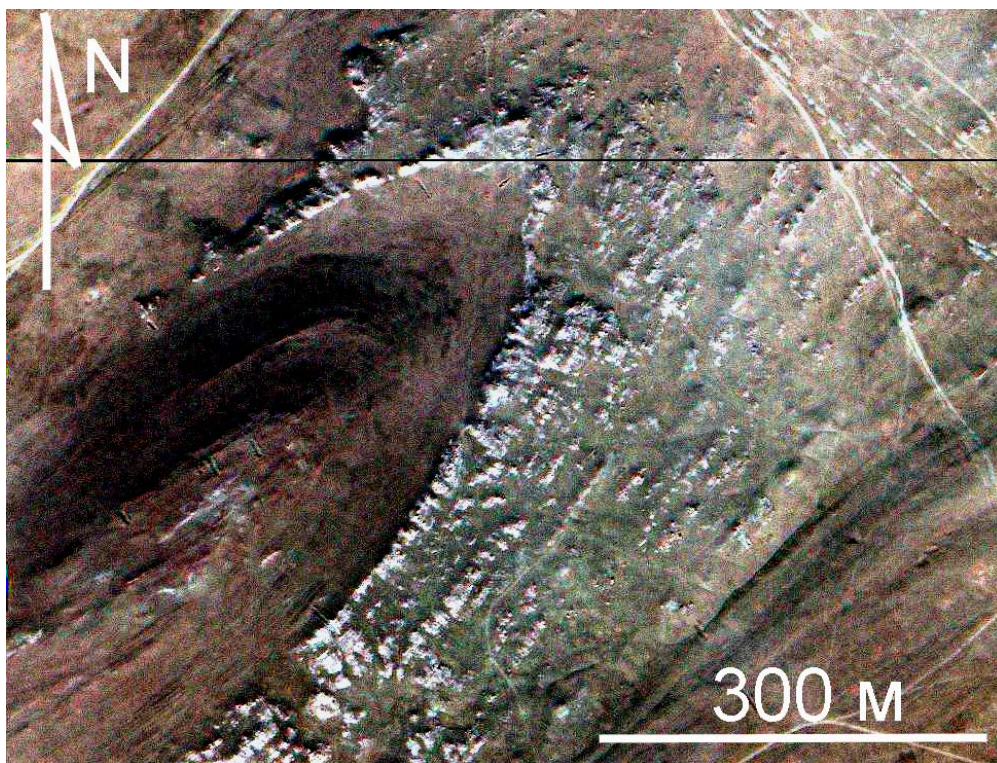
Внешне простая форма купола обманлива. В центре купола, на вершине горы, наблюдается обратная последовательность горизонтов по сравнению с периферией купола. На самом деле истинная структура представляет собой двугорбую кольцевую антиформу с прогнутым замком и с крыльями, опрокинутыми во все стороны от центра замка (рис. 33).

На снимках хорошо видно, что купол Овал расплюснут в зоне вязкого сдвига. Это явление совершенно обычно для площади Ольхонского полигона. Нередко степень расплющивания настолько велика, что изначально изометричная форма куполов в плане полностью утрачивается. Более того, сами расплющенные купола вовлекаются в сдвиговые складки. В таких случаях первичная структура не реставрируется и на местности картируются линейно вытянутые полосы и линзы гранитогнейсов и



**Рис. 31.** Купол Овал на космическом снимке со спутника SPOT-5. Панхроматический формат, разрешение 2.5 м/пиксель.

**Fig. 31.** Oval dome on a space image from SPOT-5. Panchromatic format, resolution 2.5 m/pix.



**Рис. 32.** Фрагмент купола Овал на космическом снимке со спутника IKONOS-2. Синтезированное мультиспектральное изображение, сверхвысокое разрешение (уменьшено).

**Fig. 32.** A fragment of the Oval dome on a space image from IKONOS-2. Synthesized multispectral image, super-high resolution (reduced).



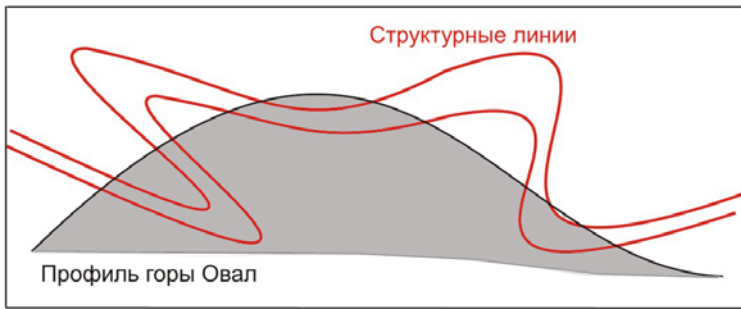


Рис. 33. Принципиальная модель строения купола Овал.

Fig. 33. Schematic model of the Oval dome structure.

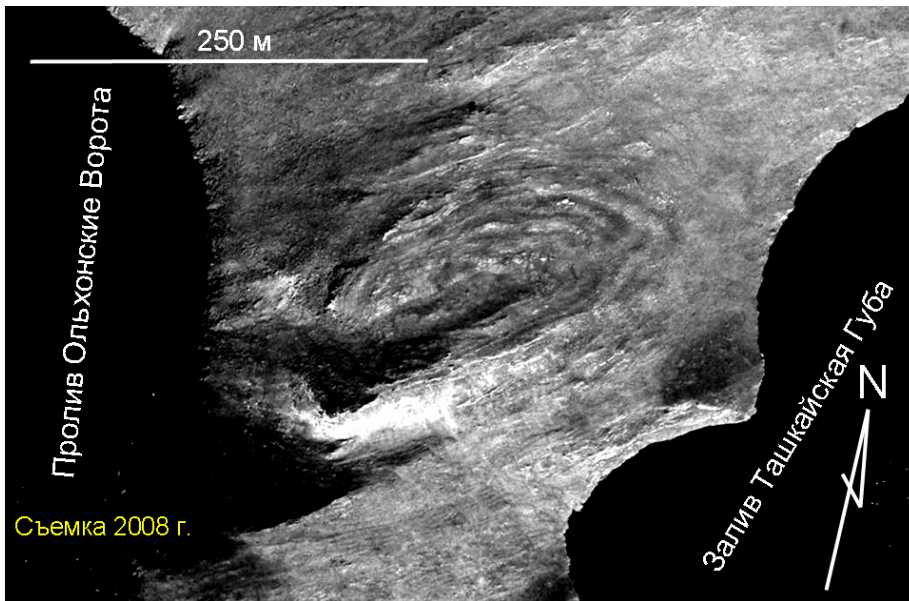


Рис. 34. Расплющенный в зоне сдвига мигматитовый купол. Мыс Уляхта, остров Ольхон. Спутник QUICK BIRD-2.

Fig. 34. A migmatite dome flattened in the shear zone. The Ulyakhta Cape, Olkhon Island. QUICK BIRD-2.

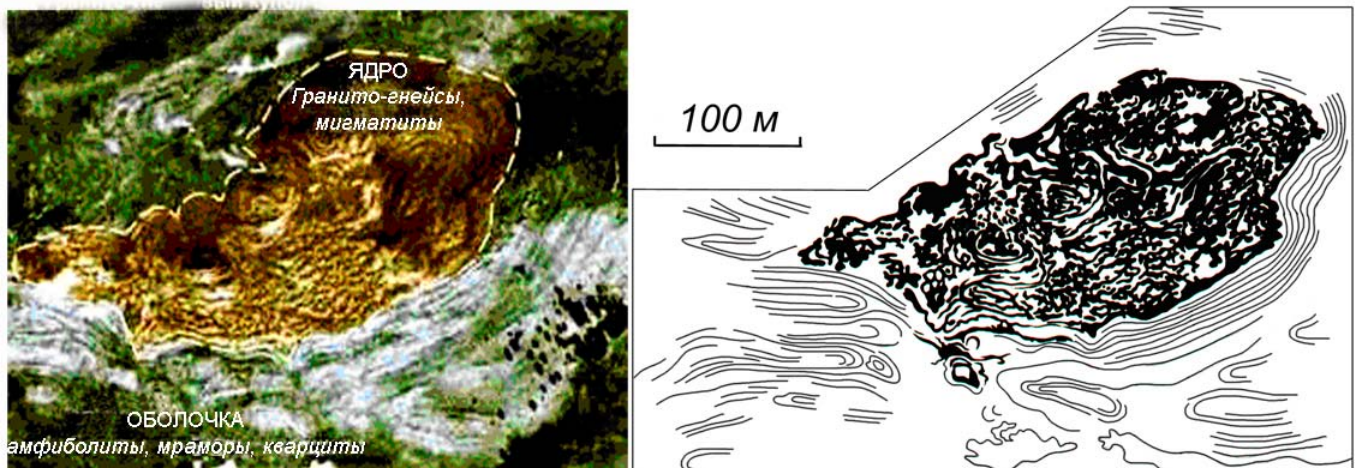


Рис. 35. Структурный муар в ядре гранитогнейсового купола Барсой (Приольхонье). Слева – фрагмент аэрофотоснимка масштаба 1:2500. Светлые пятна и полосы – реальные мелкие антиформы, темные пятна – синформы. Ядро и оболочка купола искусственно подкрашены на снимке прозрачными красками. Размеры ядра купола 200×400 м. Справа – дешифрирование снимка. Контрастно выражено структурное несогласие между ядром и оболочкой. Это явление в огромном числе случаев ускользает от внимания исследователей, а на самом деле оно практически всегда присутствует. Дистанционный материал позволяет в этом убедиться.

Fig. 35. Structural moiré in the nuclei of Barsoi granite-gneiss dome (Olkhon area). On the left – a fragment of an aerial photograph (scale of 1:2500). Light spots and strips are real small antiforms, dark spots are synforms. The nuclei and envelope of the dome are artificially colored on a photograph by transparent paints. Size of the nuclei of the dome is 200×400 m. On the right – interpretation of the aerial photograph. Structural unconformity between the nuclei and envelope is contrast. In an enormous amount of cases, this phenomenon escape from attention of researchers, while it is almost always present, as evidenced by the images.

мигматитов (рис. 34).

Удивительную особенность структуры ядер гранитогнейсовых куполов можно видеть на аэрофотоснимках сверхкрупного масштаба (рис. 35). Невероятной сложности узоры отражают результат интерференции деформаций в мигматитах и гранитогнейсах ядра купола, «запертого» его оболочкой. Никакие пешие маршруты не позволяют составить надежную карту таких структурных узоров – их можно увидеть только с высоты. Эти структуры мы определили как «структурный муар» [Федоровский, Соколова, 1986].

### 2.2.2. Сдвиговые пластины, сложенные породами пестрого (Ольхонского) комплекса

Гнейсово-купольные зоны разделены пластинами иного, пестрого, состава и внутренней конфигурации. В строении таких пластин участвуют:

- \* кристаллические сланцы и гнейсы, амфиболиты, кварциты, мраморы и мраморные меланжи;
- \* большое число тел базитов и ультрабазитов, жильные гранитные серии.

Пластинам второго типа свойственны такие признаки:

- \* господство линейных структурных комбинаций;
- \* отсутствие следов мигматизации;
- \* полное отсутствие куполов;
- \* отсутствие следов палеопротерозойского или архейского протолита.

В пластинах пестрого состава нигде не установлены древние модельные возрасты. Имеющиеся (пока единичные) данные указывают на модельный возраст около 1 млрд лет. Это кардинально отличает пластины пестрого состава от пластин гнейсово-купольного строения.

Такие комбинации наблюдаются, однако, только в северной и северо-восточной частях региона. В его юго-западной части картина резко меняется. По внешней границе Центральной купольной зоны, вдоль четко картируемой сuture с метагабброидами и ультрабазитами (sutura Боба Хэтчера), проходит граница разных комплексов. Здесь полностью исчезают гранитогнейсовые пластины, а также и признаки былого существования континентальной коры; на порядки и резко уменьшается число гранитных жил (они приобретают и иной состав); метаморфизм быстро снижается при удалении от этой границы; появляется большое число крупных массивов метагабброидов. По своему составу (субщелочные базиты) они резко отличаются от толеитовых метагабброидов северных единиц коллажа.

Эти и другие признаки позволяют определить здесь юго-восточную границу распространения в регионе гранитогнейсового и пестрого комплексов (они тесно переплетаются в коллизионном композите) и выделить другие – метабазит-карбонатный (Ангинский) и микрогнейсово-амфиболитовый (Орсо) комплексы.

Тектоническое устройство площади региона оказывается гораздо сложнее этой простой картины. Обратимся снова к рис. 11 (геологическая карта) и

13 (схема зон). Картирование показало, что в северной части региона, среди крупных полей развития пестрого и гранитогнейсового комплексов, обнаруживаются не менее крупные сдвиговые пластины, сложенные метабазит-карбонатным комплексом. Пластины разного состава, как оказалось, перемешаны в коллизионном коллаже. Есть и другие моменты, которые пока не позволяют точно скоррелировать между собой сходные по составу, но пространственно разобщенные сдвиговые пластины. Предлагаемая схема тектонического районирования (см. рис. 14) отражает именно эту особенность региона:

\* Зоны Анга–Бугульдейка, Тутай и Узур сложены метабазит-карбонатным комплексом;

\* Зона Орсо – это единая сдвиговая пластина, сложенная комплексом микрогнейсов и амфиболитов;

\* Зона Анга–Сатюрты представляет собой тесную комбинацию пластин, сложенных пестрым и гранитогнейсовым комплексами. Для удобства пестрый комплекс целесообразно называть Ольхонским, а гранитогнейсовый – Шобартинским;

\* Зона Черноруд объединяет гранулиты пестрого состава и, кроме степени метаморфизма, ничем не отличается от пластин точно такого же состава в композициях зоны Анга–Сатюрты;

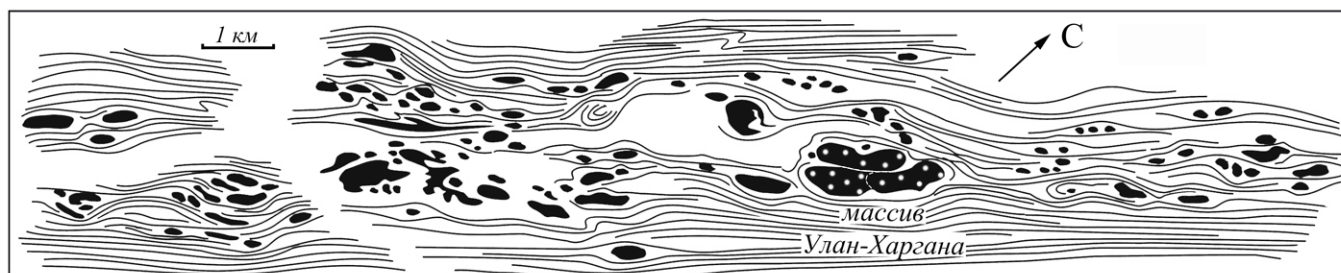
\* Зона Курма–Зундук по набору пород и типу структур – аналог зоны Анга–Сатюрты (эта часть площади полигона изучена пока несравненно слабее остальных единиц региона).

Отметим, что сама эта схема носит временный характер. Это связано с тем, что если в рамках Чернорудской зоны геохронологические датировки по породам пестрого состава показывают две группировки возрастов – 500 и 470 млн лет, то в пределах зоны Анга–Сатюрты мы располагаем только датами для гнейсово-мигматитового комплекса (460–470 млн лет), а для пластин пестрого состава, перемежающихся с мигматитовыми пластинами, датировок (цирконометрия) пока нет. Это серьезный дефект, снижающий уверенность при попытках корреляции. Нет пока радиометрических датировок и для пород зоны Курма–Зундук. Здесь тоже можно ожидать каких-то сюрпризов в будущем.

Как бы то ни было, сегодня достаточно очевидно, что Ольхонский терреин носит составной характер и представляет собою коллизионный композит разновозрастных микротерреинов. По своей морфологии и составу пород эти структуры разнообразны. Имеющийся материал позволяет выделить несколько вариантов отдельных пластин или их группировок, отличающихся теми или иными параметрами. Целесообразно рассматривать их отдельно.

#### 2.2.2.1. Сдвиговые пластины, сложенные породами Ольхонского комплекса (гранулитовая фацция метаморфизма)

Исторически за этой структурой давно укрепилось название Чернорудская зона. При этом трудно понять, что имеют в виду те или иные авторы, ис-



**Рис. 36.** Упрощенная схема строения центральной части Чернорудской зоны (интервал Тонта – Улан-Харгана). Сложная линейно-петельчатая структура метаморфической рамы вмещает здесь около 100 тел базитов и ультрабазитов, вскрытых на поверхности, и еще примерно столько же – не вскрытых, но выраженных кольцевыми и вихревыми структурами в метаморфической раме.

**Fig. 36.** Simplified diagram of the structure of the central part of Chernorud zone (interval Tonta-Ulan-Kharanga). The complex linear-knitted texture of metamorphic frame emplace about 100 bodies of basic and ultrabasic rocks, exposed on the surface and about the same quantity of unexposed ones, but expressed in ring and swirling textures in the metamorphic frame.

пользуя это название. В литературе часто можно встретить название «Чернорудская гранулитовая зона», что вообще неверно, так как для обозначения зон метаморфизма не употребляют собственных названий. Другое дело – тектонические зоны – их как раз принято называть собственными именами. Но и тут не все просто. Из состава Чернорудской зоны, в ее традиционных границах, ныне выделена зона Главного коллизийного шва. Она составляет половину площади бывшей Чернорудской зоны, и, конечно, это отдельная тектоническая единица. Кроме того, на северо-востоке зоны в ее состав ошибочно включалась часть побережья залива Мухур с его гранитогнейсами, составляющими совсем другую зону, отделенную от Чернорудской зоны бластомилонитовым швом. Вместе с тем, мы продолжаем, просто для удобства, использовать это название (Чернорудская зона), не считаем это принципиально важным. Нужно только иметь в виду, что объем и содержание этой зоны имеют мало общего с тем, что понималось под этим названием прежде.

Как показало детальное картирование, линейно-петельчатый структурный рисунок присущ не только Чернорудской зоне (рис. 36). Подобные конфигурации нередко встречаются и в других зонах региона, в составе которых присутствуют тела базитов и гипербазитов. Роллинг, или прокручивание, вращение жестких тел базитов и гипербазитов в маловязком метаморфическом матриксе в процессе реализации сдвиговой деформации – типичное явление для Ольхонского региона.

До сих пор, к сожалению, нет полной ясности с генетической принадлежностью различных тел метагабброидов. В рамках Чернорудской зоны выделяется три типа таких массивов: многочисленные тела разных размеров (тектонические включения, нодулы в метаморфическом матриксе), относительно крупный массив Улан-Харгана и протяженная (более 1 км) эшелонированная дайка метагабброидов в районе пос. Тонта. По структурному рисунку два первых типа одинаковы – они огибаются складчатыми поясами метаморфитов. Эту своеобразную

смесь метаморфитов и включений базитов мы предлагаем называть «метаморфическим минглингом» [Федоровский и др., 2003]. Не обсуждая здесь эту тему, подчеркнем лишь, что степень дешифрирования практически каждого, даже незначительного по размерам, включения метагабброидов очень высока, и это позволило закартировать специфические структурные рисунки с большой точностью. Ниже приведены аэро- и космические снимки участков распространения пестрого комплекса, а также геологические карты (рис. 37–49), демонстрирующие характер проявления габброидных тел. Пояснения даны в подрисуночных подписях.

#### 2.2.2.2. Сдвиговые пластины, сложенные породами Ольхонского комплекса (амфиболитовая фашия метаморфизма)

В центре Приольхонья и в юго-западной части острова Ольхон многочисленны сдвиговые пластины, сложенные таким же пестрым по составу комплексом с участием толеитовых базитов и метагипербазитов (тип пластин 1б). Однако метаморфизм в таких зонах не превышает амфиболитовой фашии. Возраст поздних синметаморфических гранитов, пересекающих этот комплекс, равен 460 млн лет. Возраст метагипербазитов достоверно не установлен. Это серьезное препятствие для уверенной корреляции сходных по составу комплексов, расположенных в различных зонах метаморфизма. Контактуют разновозрастные пластины по системе сдвиговых швов (рис. 50).

Структуры рассматриваемых сдвиговых пластин нередко характеризуются чрезвычайной сложностью и в большинстве случаев не могут быть расшифрованы при использовании только традиционных методов геологического картирования, даже сверхдетального. Необходимо использование аэро- и космических снимков разного масштаба, что мы и попытаемся продемонстрировать ниже на многочисленных примерах (рис. 51–53 и др.), поместив частично необходимые пояснения в подрисуночные подписи.



**Рис. 37.** Аэрофотоснимок района Тонта – Улан-Харгана масштаба 1:5000. «Россыпь» базитовых нодулей (темное), окруженных мраморным меланжем (белое).

**Fig. 37.** Aerial photograph of Tonta – Ulan-Kharanga area. Scale of 1:5000. Scattering of basic rocks nodules (dark), surrounded by marble mélange (white).



**Рис. 38.** «Стадо» базитовых нодулей в метаморфическом минглинге (темные холмы) в районе Тонта – Улан-Харгана.

**Fig. 38.** A «swarm» of mafic rocks nodules in metamorphic mingling (dark hills) in Tonta–Ulan-Kharanga area.

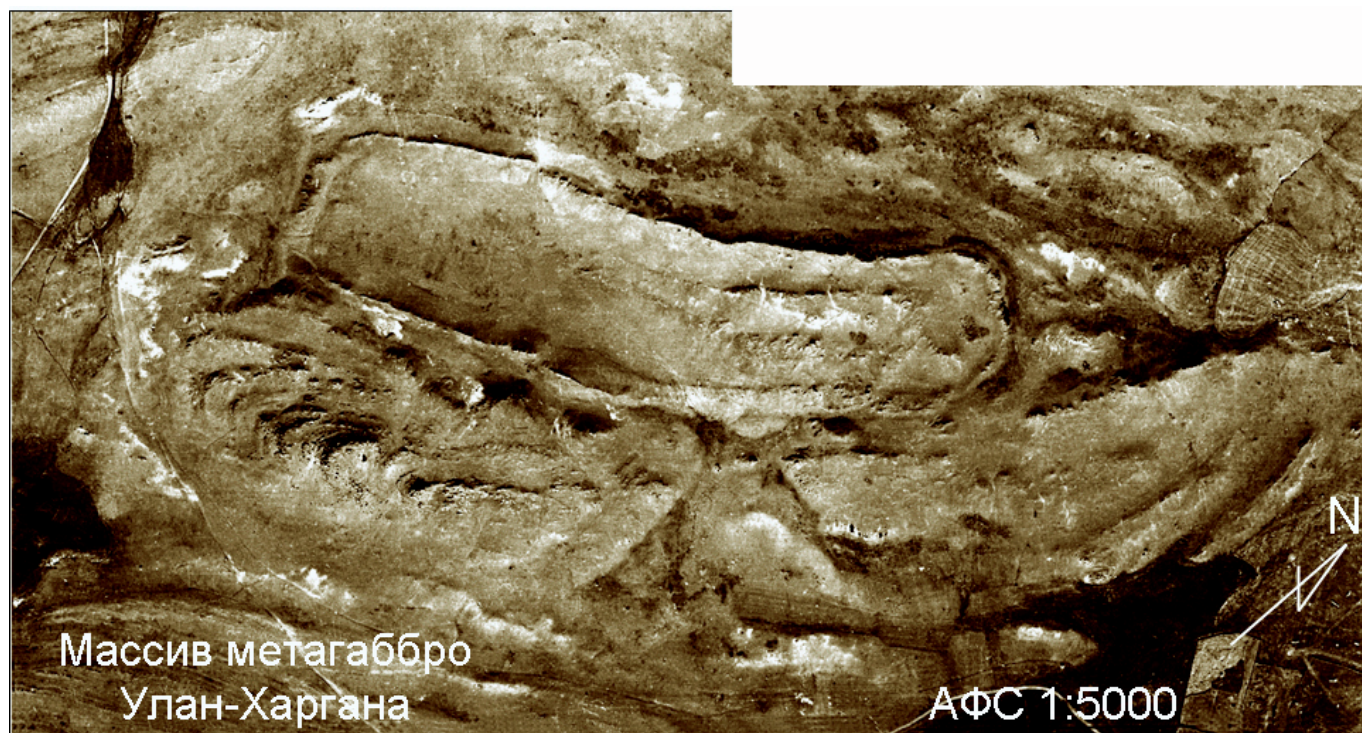


Рис. 39. Аэрофотоснимок массива габброидов Улан-Харгана масштаба 1:5000 (уменьшено).

Fig. 39. Aerial photograph of Ulan-Kharanga gabbro massif. Scale 1:5000 (reduced).

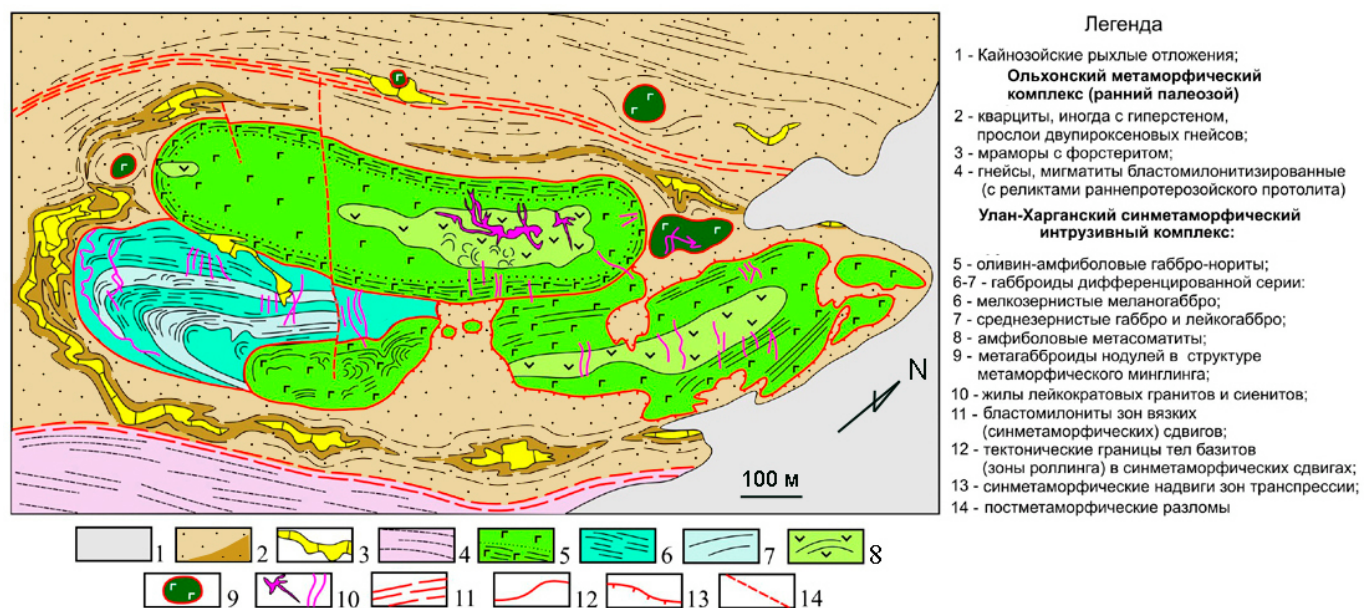
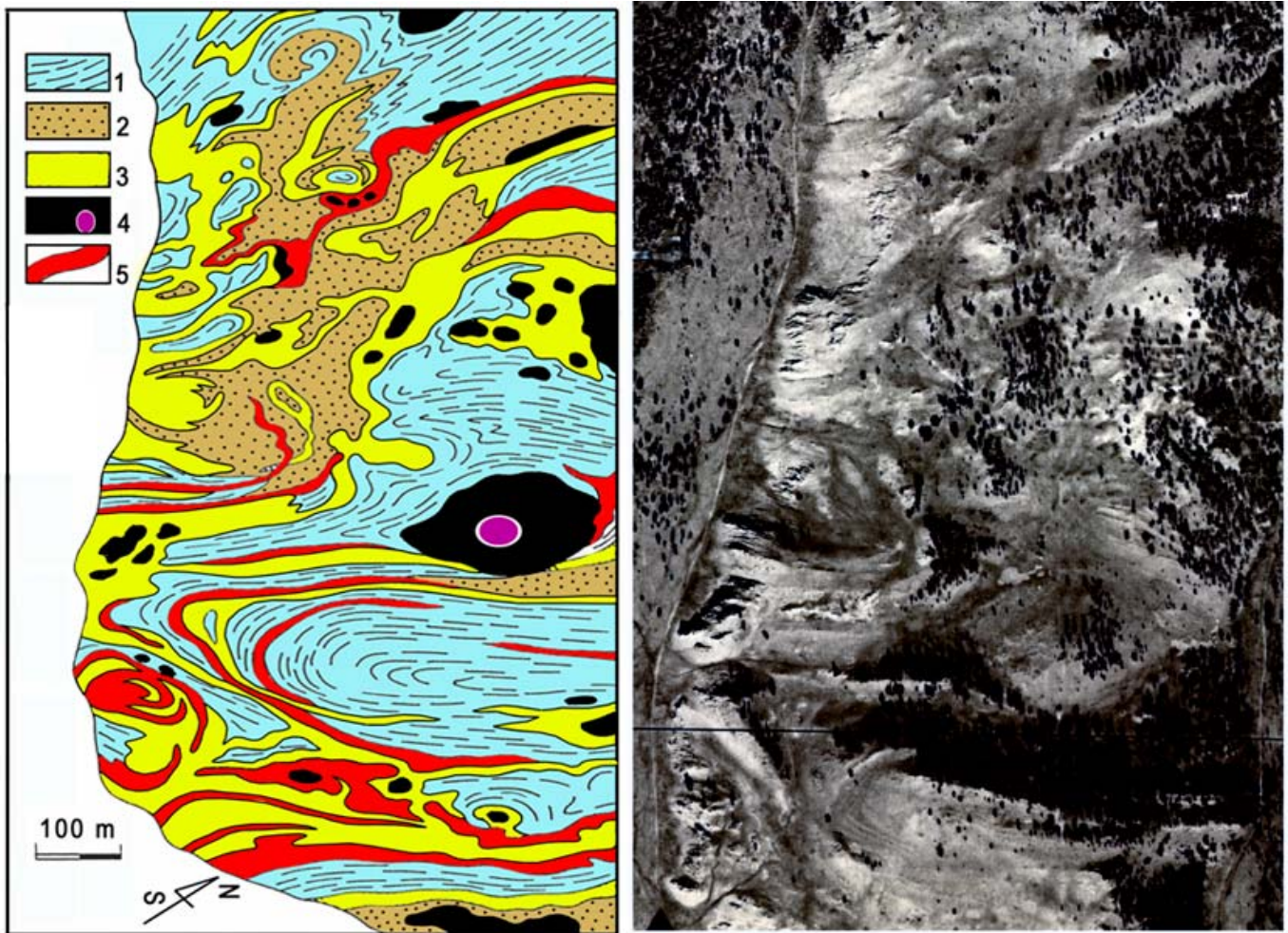


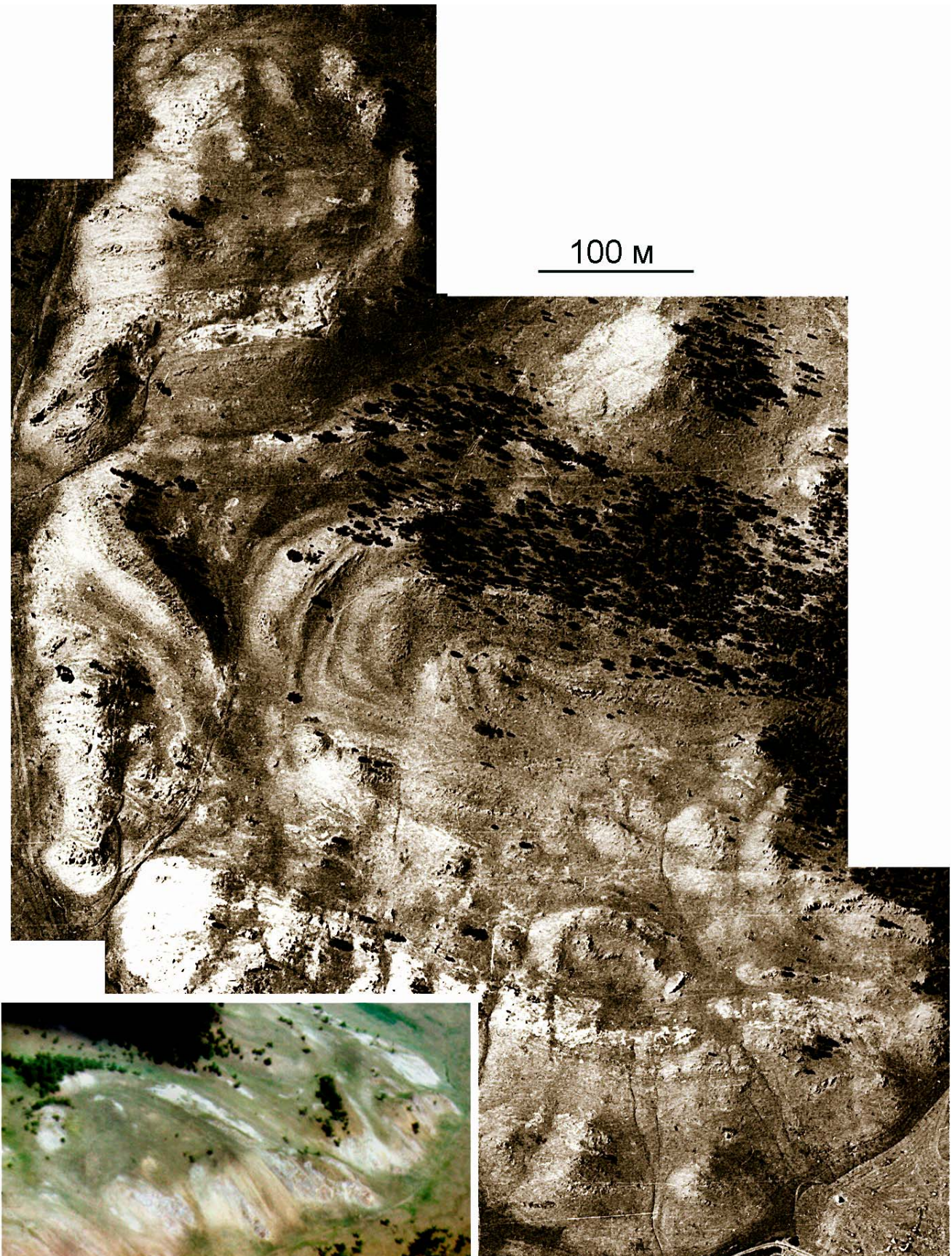
Рис. 40. Геологическая карта массива Улан-Харгана.

Fig. 40. Geological map of the Ulan-Kharanga gabbro massif.



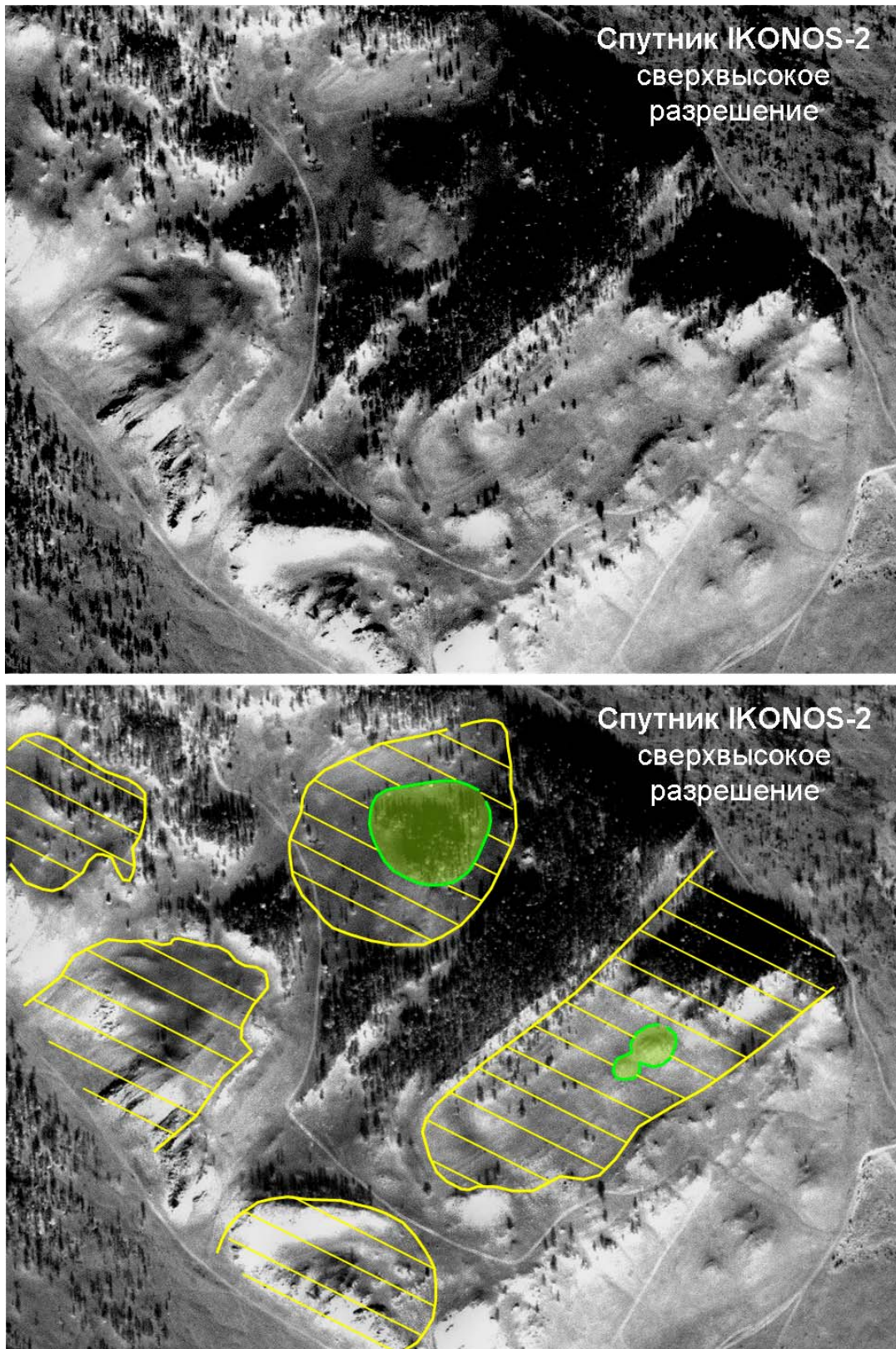
**Рис. 41.** Геологическая карта (слева) и аэрофотоснимок (справа) района Кучелга-3. Роллинг и его отражение в структуре. Зона гранулитовой фации метаморфизма. Многочисленные концентрические структуры, очерченные метаморфическими породами, отражают огибание ими жестких массивов метагабброидов, вскрытых и не вскрытых в рельефе. 1 – амфибол-пироксеновые и дупироксеновые гнейсы; 2 – кварциты; 3 – мраморы и мраморные меланжи; 4 – толеитовые метагабброиды; 5 – синметаморфические граниты.

**Fig. 41.** Geological map (left) and aerial photograph (right) of the Kuchelga-3 area. Rolling and its reflection in the structure. Zone of granulite facies metamorphism. Numerous concentric structures delineated by metamorphic rocks result from rounding of exposed and unexposed meta-gabbroids massifs. 1 – amphibole- pyroxene and dual-pyroxene gneisses; 2 – quartzites; 3 – marbles and marble melanges; 4 – toleiiite meta-gabbroides; 5 – synmetamorphic granites.



**Рис. 42.** Аэрофотоснимок южной части водораздела Кучелга-3 масштаба 1:5000 (фрагмент предыдущего снимка). Отчетливо видны кольцевые структуры вокруг тел габброидов. На врезке внизу слева – фото части водораздела с вертолета.

**Fig. 42.** Aerial photograph of the southern part of the Kuchekga-3 watershed. Scale of 1:5000. Fragment of the previous image. Ring structures surrounding gabbro bodies are clearly observed. Photograph of the watershed segment taken from a helicopter is given in the insert on the bottom left.



**Рис. 43.** Космический снимок сверхвысокого разрешения со спутника IKONOS-2 (уменьшено) и дешифрирование отдельных элементов структуры южной части водораздела Кучелга-3. Кольцевые структуры в раме вокруг вращающихся в зоне сдвига аллохтонных тел габброидов. Зеленый цвет – вскрытые в рельефе тела габбро и гипербазитов. Желтая штриховка – поля кольцевых структур в породах рамы вокруг габбро, в том числе вокруг тел, не вскрытых на поверхности. Вокруг тел габбро нередко присутствуют кольцевые жилы гранитов. Но чаще всего по контактам базитовых включений развиваются мраморные меланжи.

**Fig. 43.** Space image of high resolution from IKONOS-2 (USA) (reduced) and interpretation of some structural elements in the southern part of the Kuchelga-3 watershed. Ring structures in the frame surrounding allochthonous gabbro bodies rotating in the shear zone. Exposed bodies of gabbro and ultrabasic rocks are shown in green. Yellow hatching shows fields of ring structures in the frame rocks surrounding gabbro bodies including unexposed ones. Most often contacts of mafic rocks are accompanied by marble mélangé.



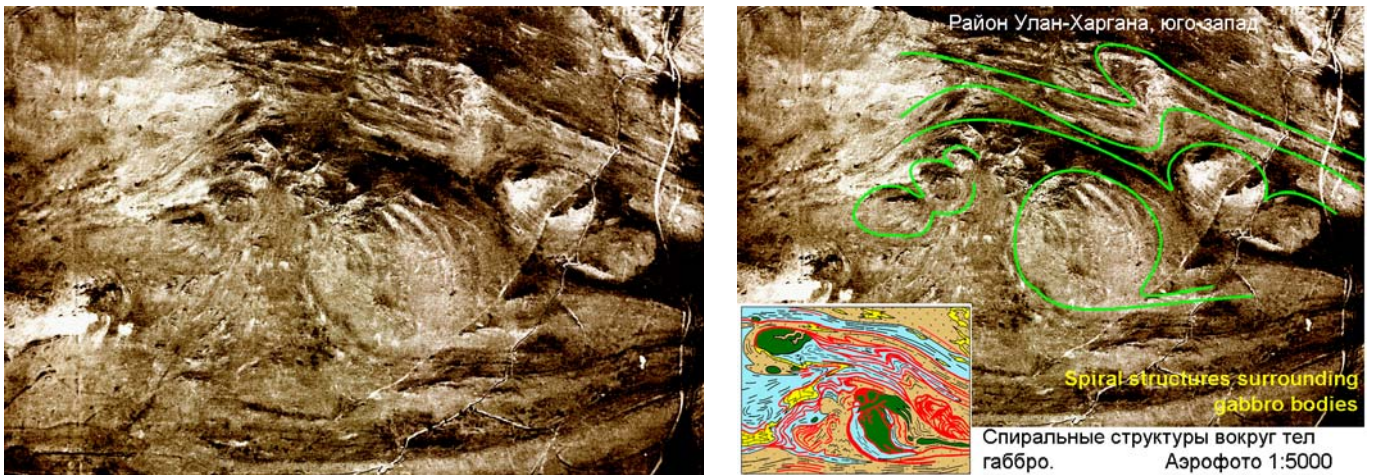


Рис. 44. Аэрофотоснимок масштаба 1:5000 (слева, сильно уменьшено) с элементами дешифрирования структуры (справа). Район Улан-Харгана, юго-запад. Спиральные структуры вокруг тел габброидов.

Fig. 44. Aerial photograph at a scale of 1:5000 (on the left, reduced significantly) with elements of structure interpretation (on the right). The Ulan-Khargan area, southwest. Spiral structures surrounding gabbro bodies.

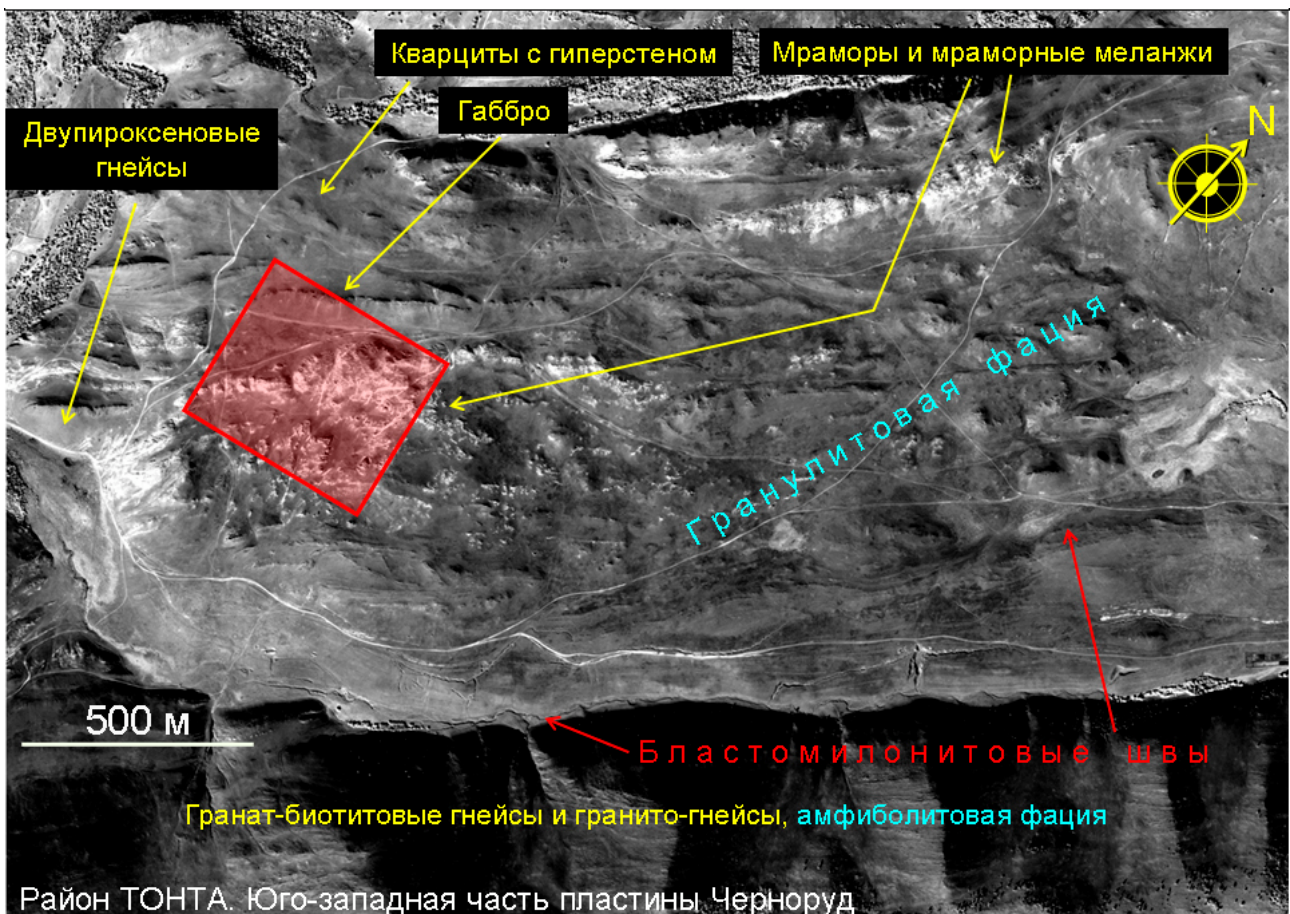
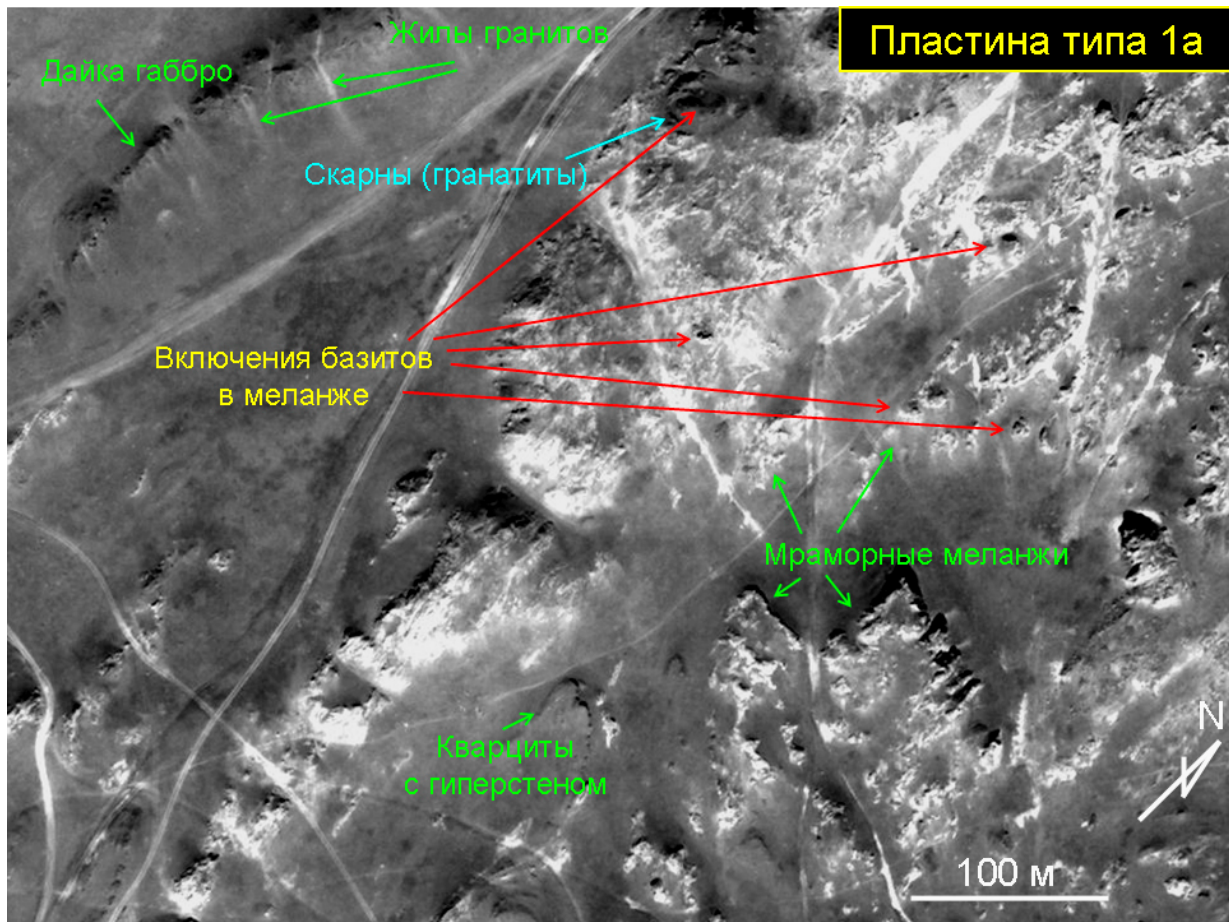


Рис. 45. Фрагмент космического снимка района Тонта (северо-восток) со спутника QUICK BIRD-2. Оригинал – масштаб 1:2000, сверх-высокое разрешение (здесь – сильно уменьшено). Красный контур – фрагмент этой площади, показанный на рисунке 47. Даже в таком уменьшенном виде хорошо видны многочисленные структурные элементы. Степень обнаженности этой площади достаточно высока. Степень дешифрируемости – очень высокого класса.

Fig. 45. Fragment of a space image of Tonta area (northeast) from QUICK BIRD-2. The original is at a scale of 1:2000, super-high resolution (here image is significantly reduced). Red contour delimits the fragment of this area shown in Fig. 47. Numerous structural elements are well observed even in a reduced image. Bedrocks are well exposed; photo interpretation ability is of the highest degree.



**Рис. 46.** Фрагмент космического снимка района Тонта (северо-восток) со спутника QUICK BIRD-2. В оригинале длина этого фрагмента равна 2.5 м. Здесь он уменьшен в десять раз и сильно сжат, естественно с потерей качества. Оригинал же позволяет видеть на снимке любые объекты размером более 61 см (сверхвысокое разрешение). Материал такого класса обладает гигантским потенциалом дешифрирования.

**Fig. 46.** Fragment of a space image of Tonta area (northeast) from QUICK BIRD-2. In the original, the length of this fragment is 2.5 m. Here, it is reduced ten times and significantly compressed, naturally with quality loss. The original allows observation of objects sized more than 61 cm (super-high resolution). Materials of such class possess huge potential for interpretation.



**Рис. 47.** Район Тонта (северо-восток). Вдали – склон Приморского хребта и голец Харгитуй. Здесь развиты метаморфические породы Сибирского кратона. Дальняя на снимке светлая полоса – уступ Приморского разлома. Следующая невысокая, но протяженная гряда – эшелонированная дайка метагабброидов. Ее протяженность 1 км. Ближний план – коренные выходы покровов мраморных меланжей, выжатых из сдвиговой зоны. В меланжах (белое) многочисленны включения метагабброидов (темное).

**Fig. 47.** The Tonta area (northeast). In the distance - a slope of the Primorskii Ridge and Khargitui Golets (bald mountain.) Metamorphic rocks of Siberian Craton are distributed here. Light strip at a distance is a bench of the Primorskii Fault. The next, not high but extended range is an echelon dyke of metagabbro. It extends for 1 km. In the foreground, bedrock exposures of marble mélanges covers, squeezed out of shear zone. In mélanges (white), inclusions of metagabbro are numerous (dark).



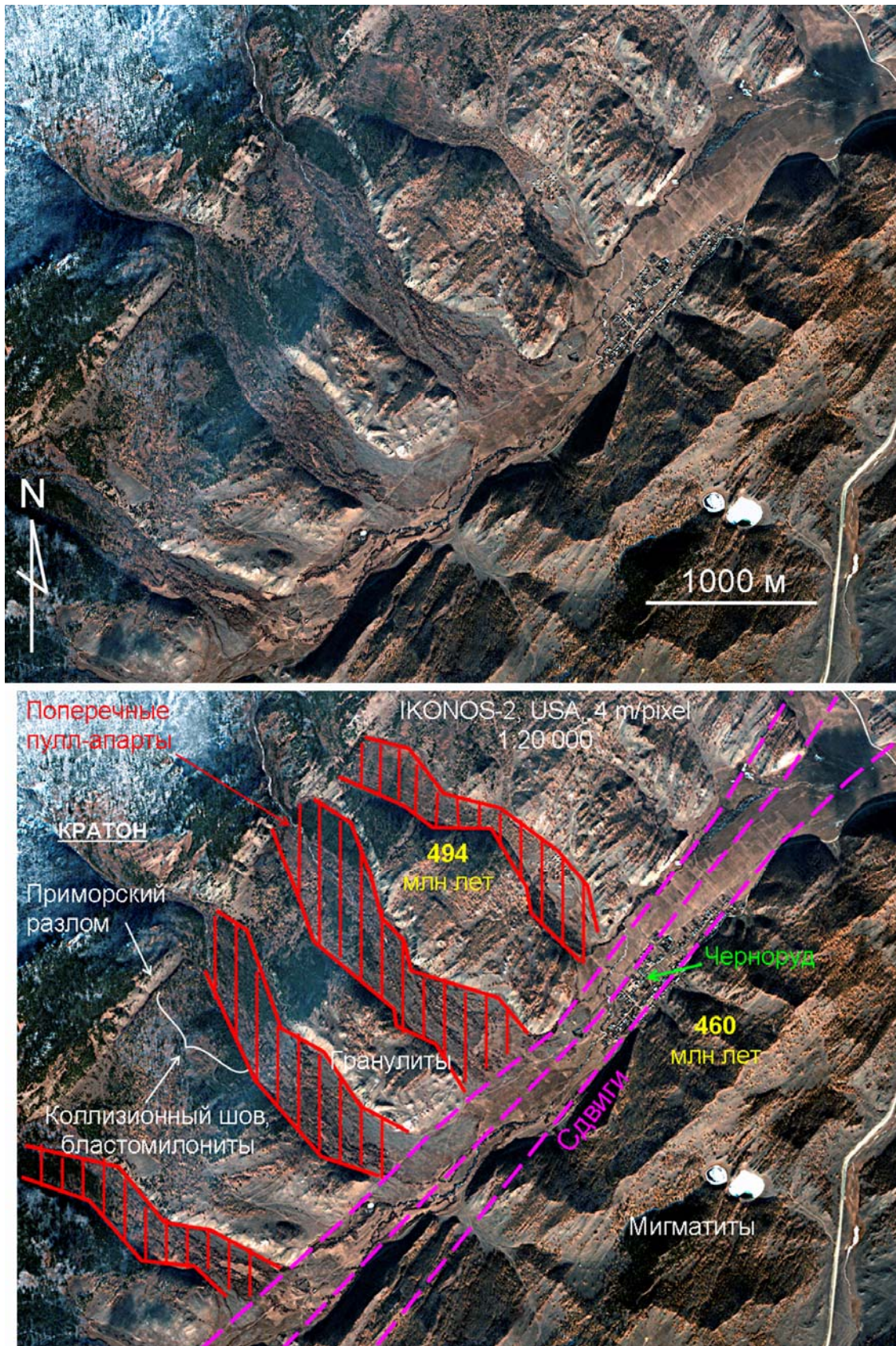
**Рис. 48.** Мраморный меланж в районе Тонта. Крупное включение двупироксенового гранулиты в мраморном матрице.

**Fig. 48.** Photograph of marble mélangé in the Tonta area. A large inclusion of two-pyroxene granulite in marble matrix.



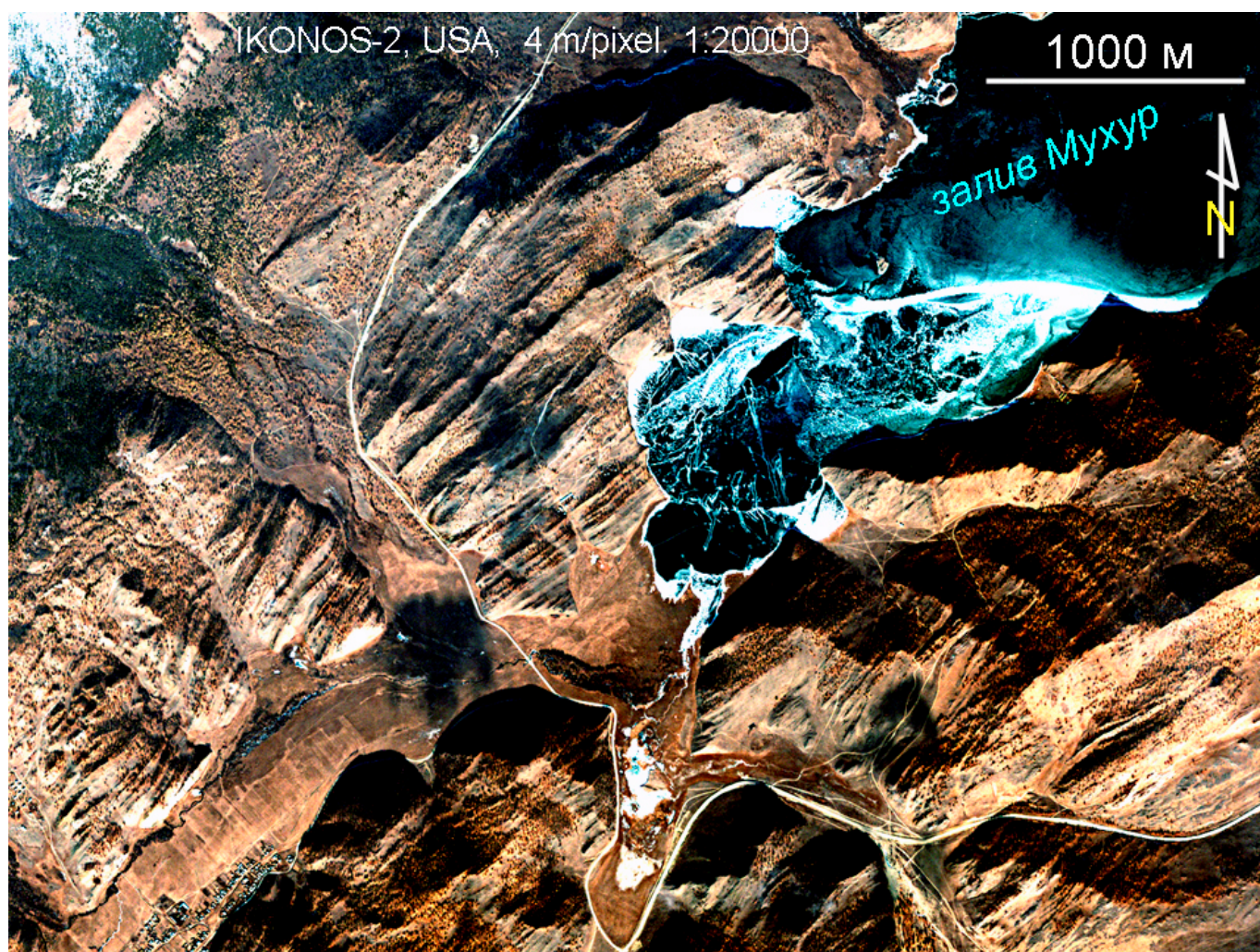
**Рис. 49.** Деталь контакта базитового гранулиты в мраморном меланже. Мрамор ведет себя как протрузия, контакт пересекает гнейсовидность.

**Fig. 49.** A detail of mafic granulite contact in marble mélangé. Marble behaves like protrusion, the contact crosses gneissosity.



**Рис. 50.** Космический снимок района п. Черноруд со спутника IKONOS-2 (вверху) с элементами дешифрирования (внизу). Контакт пластин разного состава. Слева – пестрый комплекс гранулитов Чернорудской пластины (возраст 494 млн лет). Справа – мигматиты пластины Холбо (возраст 460 млн лет).

**Fig. 50.** Space image of the Chernorud settlement area from IKONOS-2 (top) with interpretation elements (bottom). Contact of slabs of different composition. On the left – various in composition granulites of the Chernorud slab (494 Ma). On the right – migmatites of the Kholbo slab (460 Ma).



**Рис. 51.** Космический снимок района залива Мухур со спутника IKONOS-2 (мультиспектральный формат). Высокий класс дешифрируемости. На снимке дешифрируются граница Сибирского кратона и Ольхонского террейна, молодой Приморский разлом, зона коллизионного шва, сдвиговые пластины разного состава и многочисленные структурные элементы, отражающие внутреннее строение пластин.

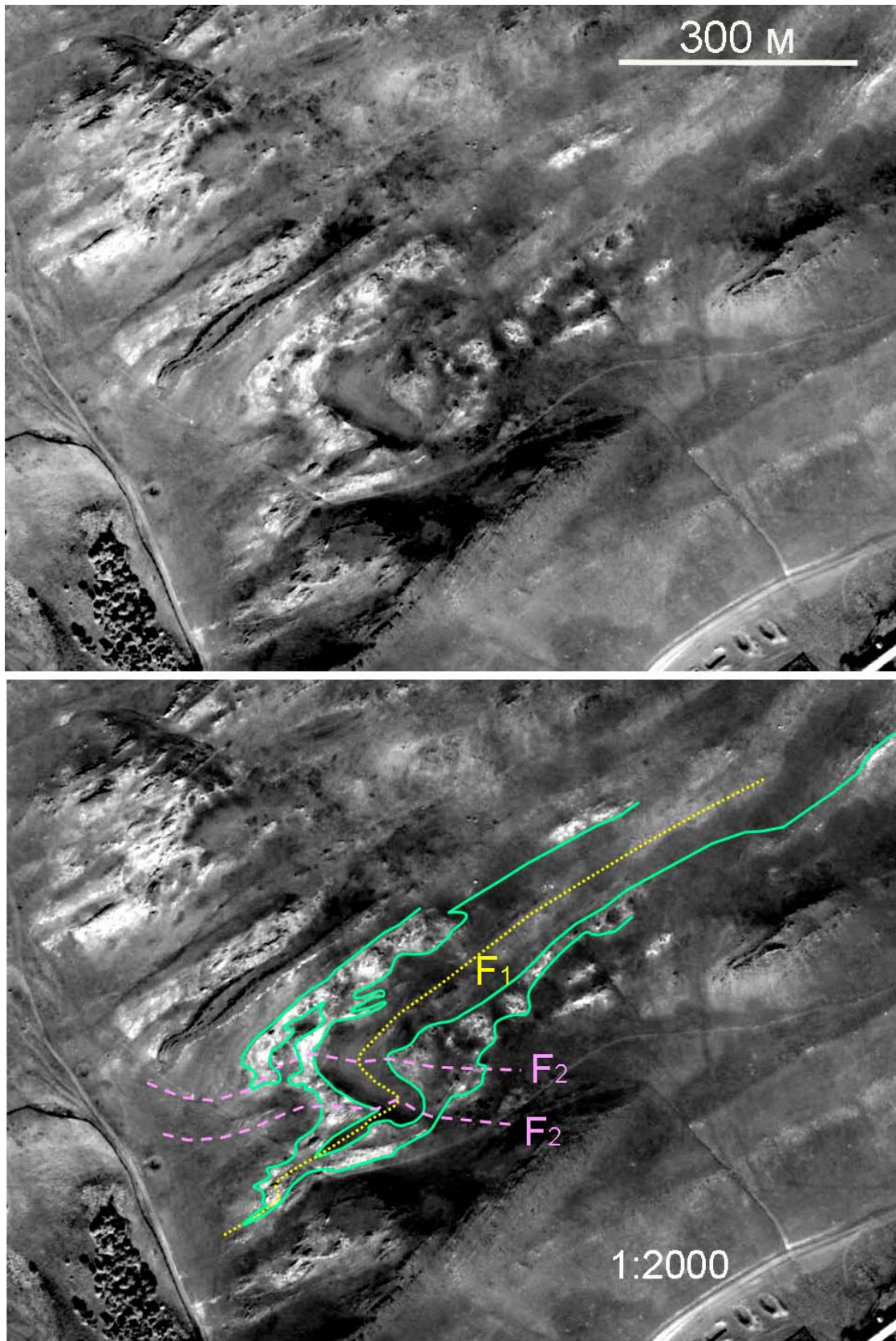
**Fig. 51.** Space image of the Mukhur Bay area from IKONOS-2 (multispectral format). Photo interpretation ability is of a high degree. The boundary of the Siberian craton and the Olkhon terrane, the young Primorskii fault, the collisional suture zone, shear slabs of different composition and numerous structural elements reflecting inner structure of the slabs are interpreted in the image.

В пределах развития пестрого комплекса широко развиты спиралевидные и сигмоидальные структуры, во множестве обнаруженные и на аэрофотоснимках, и на космических снимках. Спирали возникают как следствие роллинга (прокручивания) жестких тел габброидов в пластифицированной метаморфической толще, охваченной сдвиговым тектогенезом.

Картируется два типа таких ситуаций: 1 – со вскрытыми в рельефе массивами габбро, вокруг которых формируются спиральные структуры; 2 – когда массив не вскрыт (он присутствует на некоторой глубине), а структурная спираль в породах рамы картируется. Иногда существование габброидов на глубине можно аргументировать косвенными данными, но нередко это сделать не удастся. По-видимому, можно предположить, что структурные спирали возникали и без участия тел габброидов,

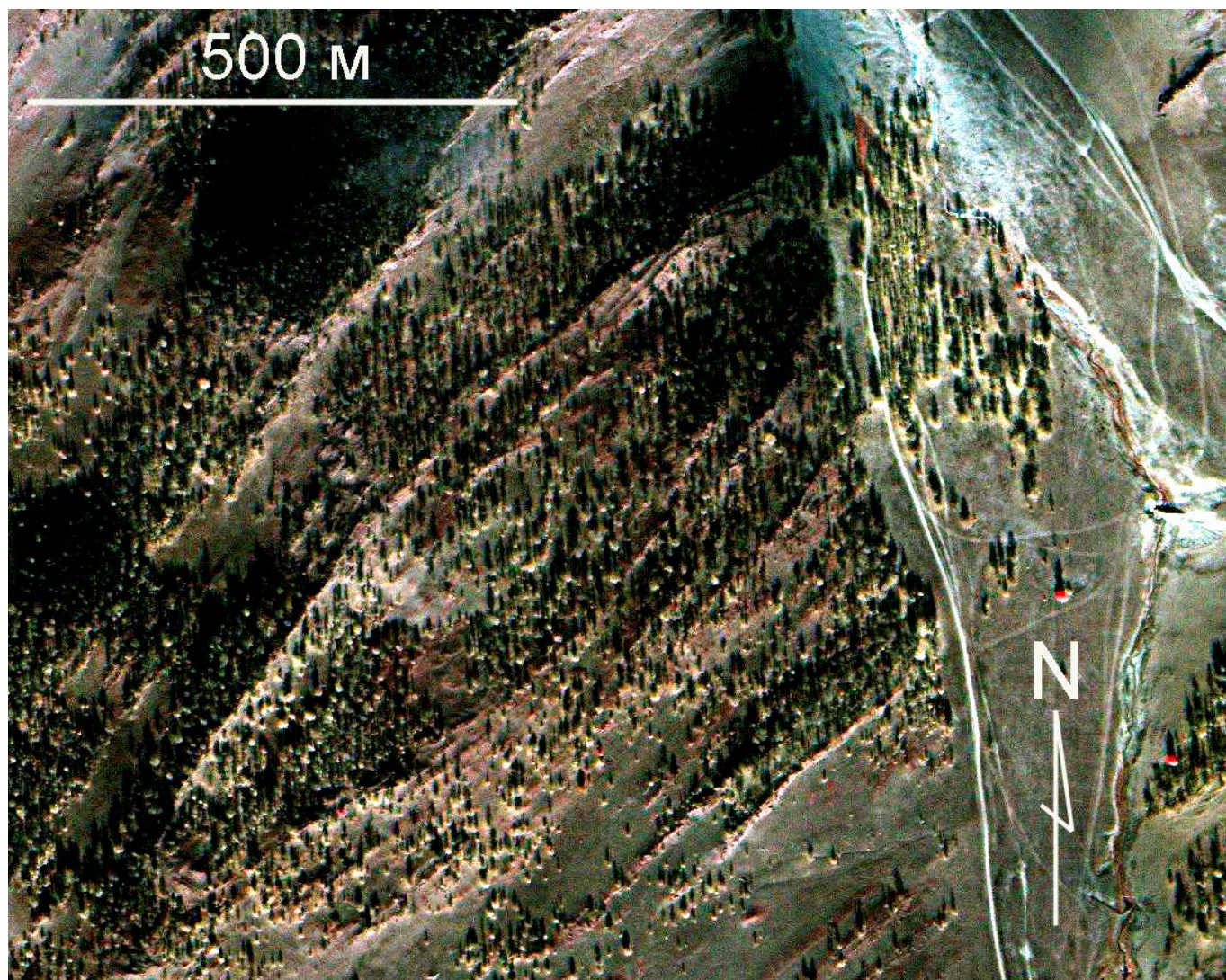
просто как результат самой сдвиговой деформации. Пример именно такого рода – спираль Нутгей-север (рис. 54). Она расположена непосредственно в полосе Главной сдвиговой зоны региона, к которой под косым углом примыкают десятки мелких и крупных сдвиговых пластин различного состава. В составе одной из них – крупная сигмоида Нутгей; от структурной спирали Нутгей-север она отличается не только размерами, но и несравненно более сложным внутренним строением.

Степень обнаженности района около 70 %. Бросается в глаза пестрота пород, участвующих в строении сигмоиды (рис. 55, 56). В левом верхнем углу площади виден фрагмент Главной сдвиговой зоны с ее амфиболитами, кварцитами, мраморами, гипербазитами и жилами гранитов. Сама складчатая сигмоида сформирована силикатно-карбонатными гнейсами, амфиболитами, кварцитами, мраморами.



**Рис. 52.** Космический снимок зоны Черноруд в районе Мухор-Булык со спутника QUICK BIRD-2 (уменьшено) (вверху) с элементами дешифрирования (внизу). Структуры «складка в складке» уверенно дешифрируются только на снимках сверхвысокого разрешения. Зеленые линии – контуры горизонта мраморов. Желтые точки – след осевой поверхности изоклиальной складки ранней генерации. Розовый пунктир – след осевой поверхности складок поздней генерации.

**Fig. 52.** Space image from QUICK BIRD-2 (reduced) of the Chernorud zone in Mukhor-Bulyk area (top) with interpretation elements (bottom). «Fold in fold» structures are reliably interpreted on images of super-high resolution only. Green lines are marble horizons contours. Yellow dots denote trace of axial surface of isoclinal fold of early generation.



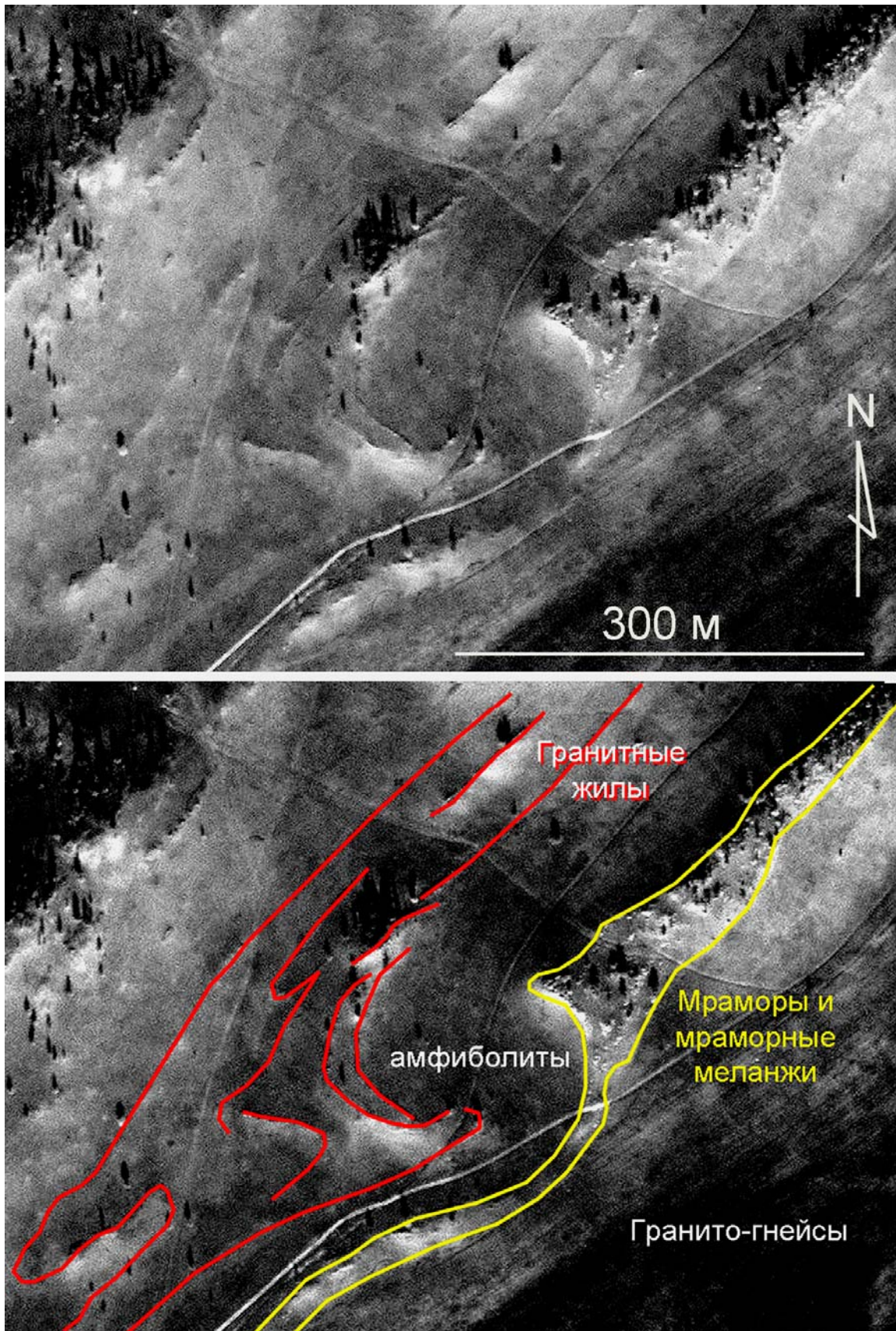
**Рис. 53.** Космический снимок района Тагот со спутника IKONOS-2. Сверхвысокое разрешение (1 м/пиксель, синтезированное изображение, NIR – ближний инфракрасный канал). Внутренняя структура массива метагабброидов Тагот. Кольцевая форма массива отражена в рельефе – это чередование скальных гряд и разделяющих их впадин. Следует обратить внимание на сходство структурных рисунков массива Тагот (амфиболитовая фация метаморфизма) и кольцевого массива Улан-Харгана, локализованного в зоне гранулитовой фации (см. рис. 39, 40). Среди огромного числа небольших аллохтонных тел метагабброидов, развитых и в гранулитовой, и в амфиболитовой зонах метаморфизма, массивы Улан-Харгана и Тагот представляют собой, скорее всего, автохтонные магматические тела типа интрузивных штоков.

**Fig. 53.** Space image of the Tagot area from IKONOS-2. Super-high resolution (1 m/pixel, synthesized image, NIR – near infrared channel). The inner structure of Tagot metagabbro massif. Ring structure of the massif is reflected in topography – this is an alternation of rocky ranges and separating depressions. Pay attention to similarity of structural patterns of the Tagot massif (amphibolite facies metamorphism) and the ring-shaped Ulan-Kharga massif situated in the zone of granulite facies metamorphism (see Figs 39, 40). Among huge number of small allochthonous metagabbro bodies occurring both in granulite and amphibolite metamorphism zones, the Ulan-Khargan and Tagot massifs are most probably autochthonous magmatic bodies (intrusive stocks).

морами и мраморными меланжами, рассланцованными телами гипербазитов. Многочисленны крупные и протяженные (сотни метров и километры в длину) субвертикальные жилы синметаморфических гранитов.

Интересно отметить, что в процессе картирования для обозначения подобных структур мы стихийно использовали разные нетрадиционные термины: структурная спираль, складчатая сигмоида, сдвиговая петля и т.д. Необходимых слов в терминологическом арсенале не оказалось, и теперь нам самим

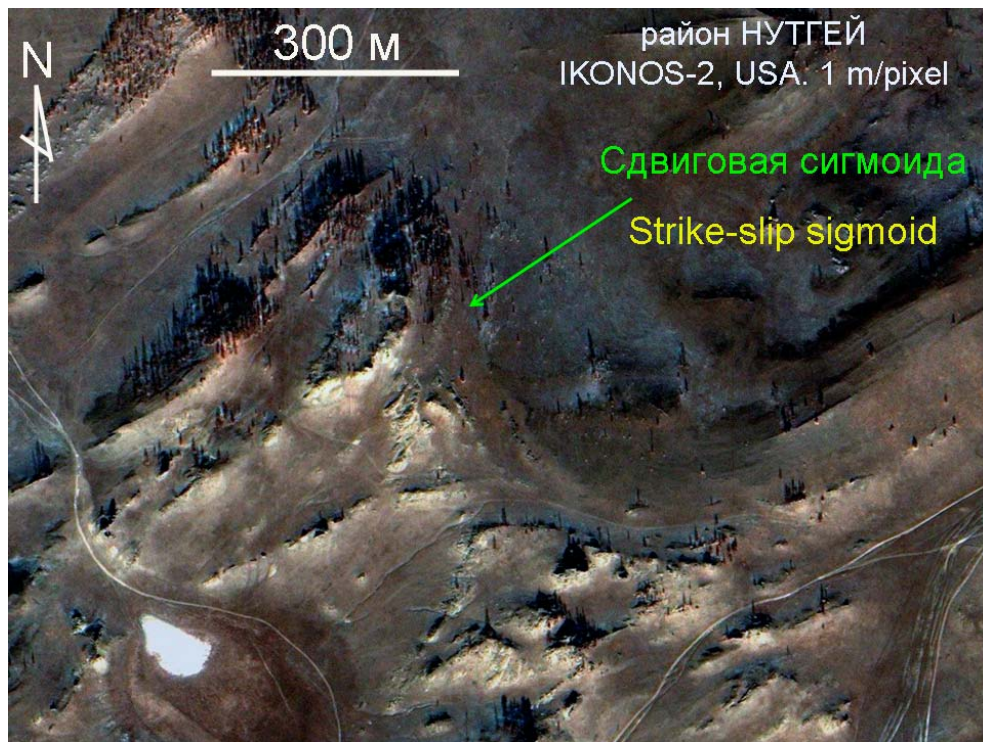
стало ясно, что разные термины мы применяли не случайно. Они отражают разные размеры этих сдвиговых структур. Спирали – самые небольшие из них, сигмоиды чрезвычайно разнообразны по морфологии, и они крупнее спиралей. А сдвиговые петли – это структуры, поперечник которых измеряется километрами. Такова, например, складчатая петля вокруг Бирхинского массива габброидов (диаметр 15 км), вокруг Тажеранского массива сиенитов и нефелиновых сиенитов (3–4 км). Но тут нет и никакого особого принципа. В полевой работе эти



**Рис. 54.** Космический снимок северной части района Нутгей. Спутник QUICK BIRD-2. Панхроматический формат. Сверхвысокое разрешение (61 см/пиксель, масштаб 1:2000). Левый сдвиг. Небольшая (300 м в поперечнике) спиральная структура Нутгей-север. Каркас этой спирали составляют жильные граниты и мраморы.

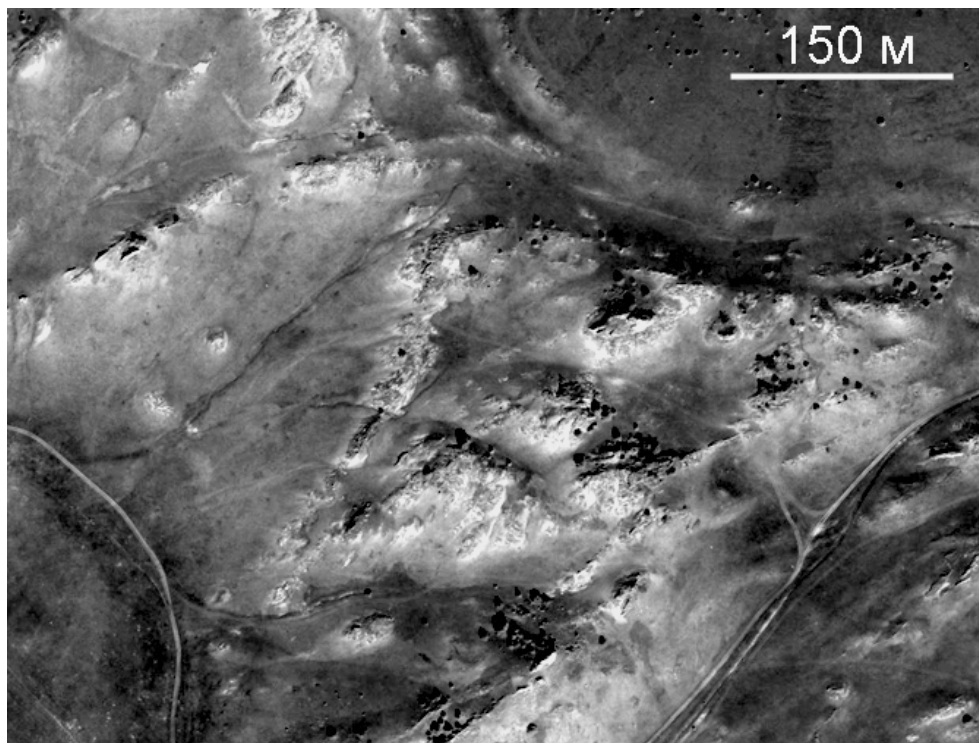
**Fig. 54.** Space image of the northern part of Nutgei area from QUICK BIRD-2. Scale 1:2000. Panchromatic format, super-high resolution (61 cm/pixel). Left-lateral shear. Small (300 m across) spiral structure Nutgei-north. Carcass of this spiral consists of vein granites and marbles.





**Рис. 55.** Мультиспектральный космический снимок правосдвиговой сигмоиды Нутгей со спутника IKONOS-2 (разрешение 2.44 м/пиксель).

**Fig. 55.** Multispectral space image of right-lateral shear sigmoid Nutgei from IKONOS-2 (resolution 2.44 m/pixel).



**Рис. 56.** Космический снимок фрагмента сдвиговой сигмоиды Нутгей. Спутник IKONOS-2. Панхроматический формат. Сверхвысокое разрешение (1 м/пиксель, масштаб 1:5000), съемка – июль 2008 г.

**Fig. 56.** Space image of the fragment of shear sigmoid Nutgei. Scale 1:5000. Satellite IKONOS (USA). Panchromatic format. Super-high resolution (1 m/pixel), image taken in July 2008.



Рис. 57. Аэрофотоснимок гранит-базитовой минглинг-дайки в районе полуострова Крест (в центре снимка) масштаба 1:5000. Уменьшен по сравнению с оригиналом.

Fig. 57. Aerial photograph of granite–mafic rocks mingling-dyke in Krest Peninsula area. Scale 1:5000. Reduced relative to original.

же структуры мы называем и сигмоидами. Например, Большая сигмоида острова Ольхон по размерам не уступает тем структурам, которые мы определяем как сдвиговые петли. Вся эта неопределенность отражает поиск нужных терминов, и в скором времени их число сократится. Вместе с тем очевидно и то, что какой-то термин для обозначения такого класса структур необходим. Они просто существуют в природе помимо нашего желания, и нам остается лишь применять какой-то термин для их обозначения или не делать этого.

Практически все снимки высокого и сверхвысокого пространственного разрешения, сопровождающие эту статью, приходится уменьшать. Сами оригиналы несравненно большего размера (для примера, полоса панхроматических снимков со спутника IKONOS-2 на район Тажеран-Черноруд имеет длину 21 м!).

Отметим высочайшее качество этого дистанционного материала в оригинале (рис. 57). Он позволяет видеть и мельчайшие детали структуры, и саму крупную структуру в целом. О точности картирования при использовании подобного материала мы уже упоминали выше. Ошибка не превышает  $\pm 1\text{--}2$  м.

Дешифрирование аэрофотоснимков позволило в свое время выявить в Приольхонье интереснейшее и практически малоисследованное в отечественной литературе явление – минглинг (механическое смешение) гранитных и базитовых магм [Скляров и др., 2001; Скляров, Федоровский, 2006]. Одна из описанных в статьях минглинг-дайка расположена у полуострова Крест (рис. 57), ее протяженность составляет более 1 км.

На панхроматическом снимке со спутника QUICK BIRD-2 (рис. 58) дайка прослеживается еще более отчетливо. Эти два снимка разделяют 40 лет. На побережье пролива Ольхонские Ворота рядом с дайкой появились туристические кемпинги (они видны на снимке).

Как упоминалось, сдвиговые зоны региона подразделяются на две группы: с участием офиолитов (сутуры) и без оных. Фрагменты офиолитов, представленные отдельными массивами габбро и гипербазитов, в большинстве случаев прекрасно дешифрируются на аэрофотоснимках, а особенно на космических снимках разного масштаба, что мы и попытаемся продемонстрировать на рисунках 59, 60.

На мультиспектральном снимке со спутника IKONOS-2 (рис. 59) хорошо видна серия гипербазитовых массивов.

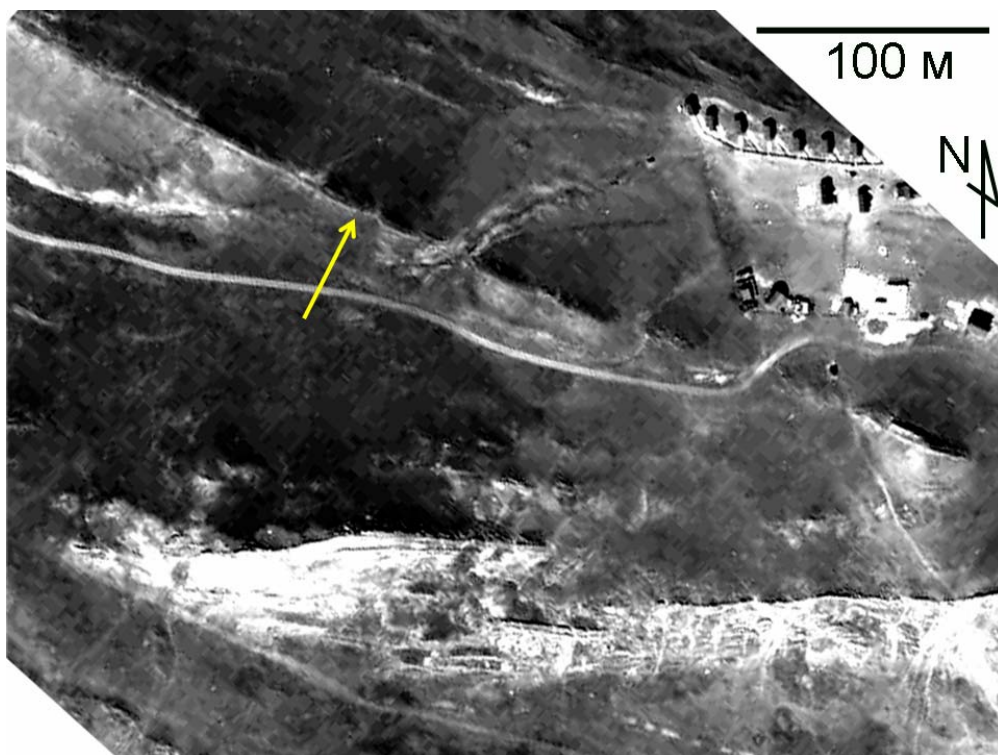


Рис. 58. Панхроматический снимок района минглинг-дайки со спутника QUICK BIRD-2. Сверхвысокое разрешение (61 см/пиксель, масштаб 1:2000).

Fig. 58. Panchromatic image of mingling-dyke area from QUICK BIRD-2. Scale 1:2000. Super-high resolution (61 cm/pixel).



Рис. 59. Мультиспектральный снимок серии массивов гипербазитов Харикта со спутника IKONOS-2 (два из них обозначены стрелками).

Fig. 59. Multispectral image from IKONOS-2 of the series of Kharikta massifs of ultrabasic rocks (two of them are marked by arrows).



Рис. 60. Гипербазитовый массив Харикта-2. Фото с вертолета.

Fig. 60. Ultrabasic massif Kharikta-2. Photographed from a helicopter.

товых массивов Харикта. Цепь таких массивов, закатанных в мраморные меланжи, обнаруживается на всем протяжении Главной сдвиговой зоны в Приольхонье (примерно 50 км) и кое-где на ее продолжении на острове Ольхон. На фотографии массива Харикта-2 (рис. 60), диаметром около 70 м, отчетливо видны признаки роллинга. Сам массив закатан в оболочку карбонатных пород – это протрузивные мраморы и мраморные меланжи. Хорошо видно и срезание контактами массива горизонтов вмещающей рамы (амфиболиты).

Необычная форма («запятая»), образованная в процессе сдвигового тектогенеза, характерна для гипербазитового массива Барсой (рис. 61) на юго-западном фланге Главной сдвиговой зоны региона.

Примером сдвиговых деформаций габброидов является сигмоидальный изгиб массива Крест (зеленый контур) у пролива Ольхонские Ворота (рис. 62–64). Степень обнаженности здесь очень велика, дешифрируемость – высокого класса. И все же окончательно и надежно расшифровать структуру нам не удастся. Слишком много воды... Наземные структуры уходят в море, и это заставляет больше фантазировать, чем уверенно аргументировать. На рис. 64 показан один из вариантов «раскрутки» сдвиговой структуры. Возможно, это правильная догадка. А может быть, она и ошибочна. Полуостров Крест – хорошая площадь для структурных упражнений. Но летом геологу здесь не удастся нормально поработать: сотни и тысячи автомашин, палаток, туристов заполняют все это пространство. Народ отдыхает и расслабляется, и на человека с молотком в руках смотрят как на марсианина. С удивлением и... сожалением. Единственный выход – идти сюда зимой. В это время здесь нет никого. Абсолютное безмолвие.

Массивы габбро и ультрабазитов широко распространены в районе Мраморного плато, в цен-

тральной части зоны Оргойта – Змеиная падь (рис. 65). Здесь получили развитие складчатые сдвиговые сигмоиды различной конфигурации и размеров. Великолепная обнаженность на плато и прибрежных скалах позволяет детально исследовать анатомию этих структур.

Материал свидетельствует, что каскад специфических сигмоидальных структур Мраморного плато связан, скорее всего, с реализацией роллинга габброидных массивов в сдвиговых ситуациях. Для расшифровки таких структур космические снимки среднего разрешения (рис. 66) хороши лишь на первых этапах работы. Детали на них неразличимы. Попытки увеличения этих снимков бесполезны. Они приводят лишь к ухудшению качества.

Степень дешифрируемости вырастает на порядки, если обратиться к крупномасштабным аэрофотоснимкам или космическим снимкам сверхвысокого разрешения (рис. 67–69). Размер оригинала этого фрагмента космоснимка равен 4×4 м, здесь он уменьшен в 15 раз и сжат в 40 раз. Конечно, такие экзекуции над снимком приводят к неизбежной потере его качества. Несмотря на это, даже на таком изуродованном изображении видна масса структурных элементов, которые не обнаружить на снимках среднего разрешения (как на предыдущем снимке, например).

В северной части Мраморного плато расположен двоянный массив метагаббро, который мы называем Гантели. Картируется очень напряженная деформационная ситуация. Предполагаем, что здесь происходило затягивание в зону транспрессии между двумя вращающимися массивами габбро пакета метаморфических пород и, как следствие, его раздавливание. Интересно обратить внимание на то,



Рис. 61. Космический снимок гипербазитового массива Барсой. Спутник QUICK BIRD-2, сверхвысокое разрешение, панхроматический (уменьшено).

Fig. 61. Space image of Barsoi ultrabasic massif. Satellite QUICK BIRD-2. Super-high resolution, panchromatic format, reduced.

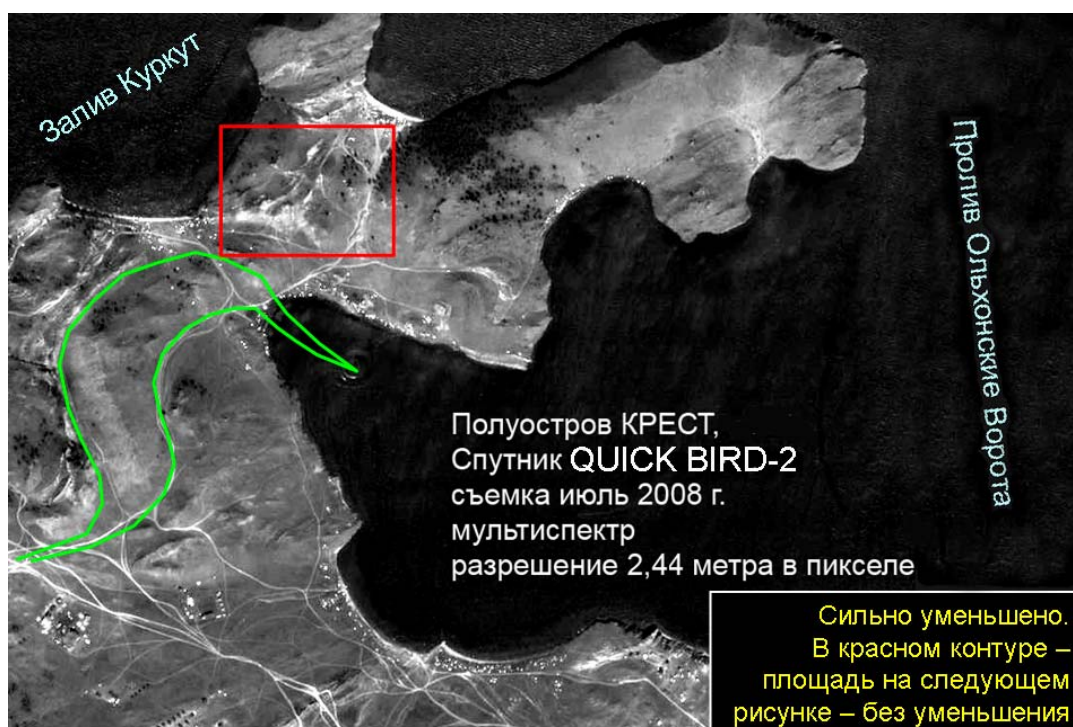


Рис. 62. Космический панхроматический снимок габброидного массива Крест сверхвысокого разрешения со спутника QUICK BIRD-2. Сильно уменьшено.

Fig. 62. Panchromatic space image of super-high resolution from QUICK BIRD-2 of Krest gabbro massif. Significantly reduced.

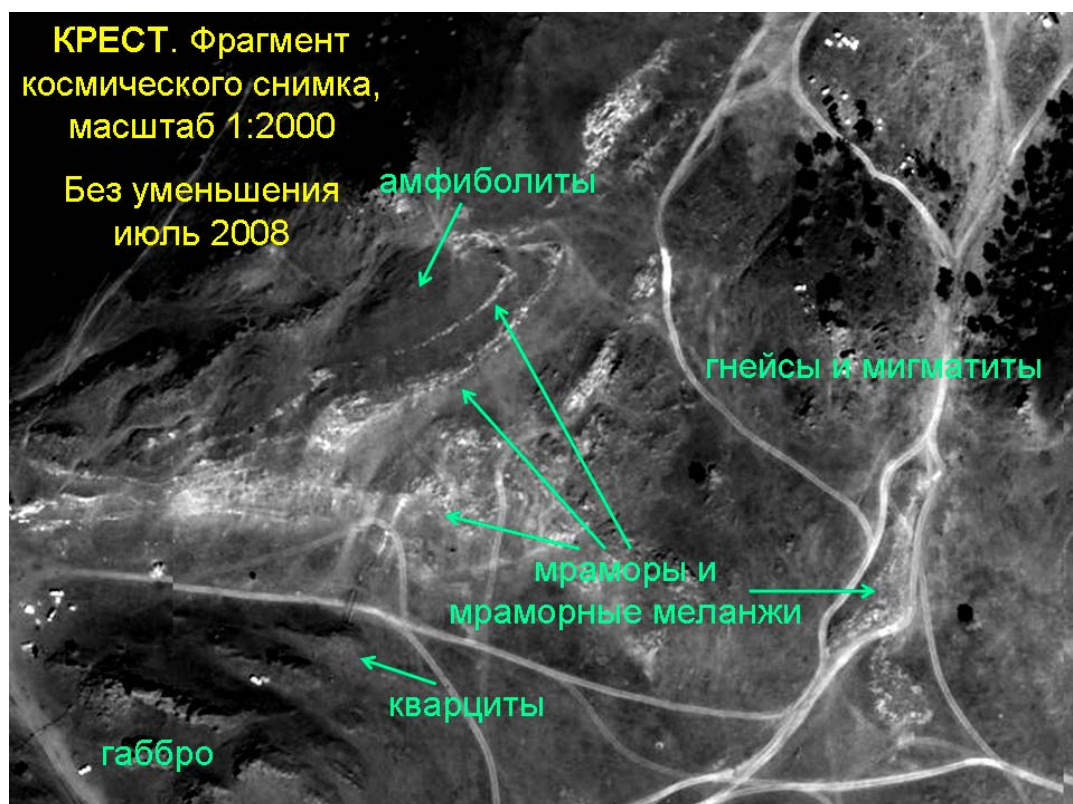


Рис. 63. Фрагмент рис. 62, без уменьшения.

Fig. 63. The fragment of Fig. 62 without reduction.

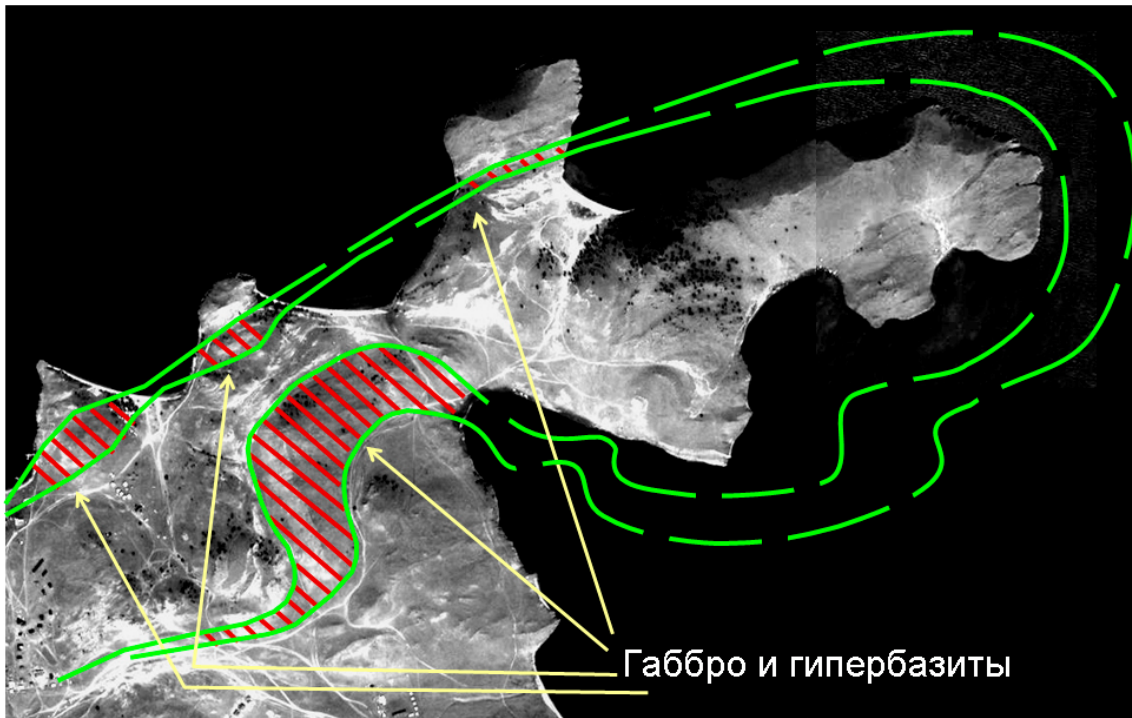


Рис. 64. Вариант «раскрутки» структуры габброидов полуострова Крест в проливе Ольхонские Ворота.

Fig. 64. A version of «untwisting» of gabbro structure of the Krest Peninsula in the Olkhonskie Vorota Strait.



Рис. 65. Мраморное плато (разные ракурсы).

Fig. 65. Marble plateau (in different perspectives).



Рис. 66. Район Мраморного плато. Космический снимок среднего разрешения со спутника LANDSAT-7.

Fig. 66. Area of the Marble plateau. Space image of medium resolution from LANDSAT-7.

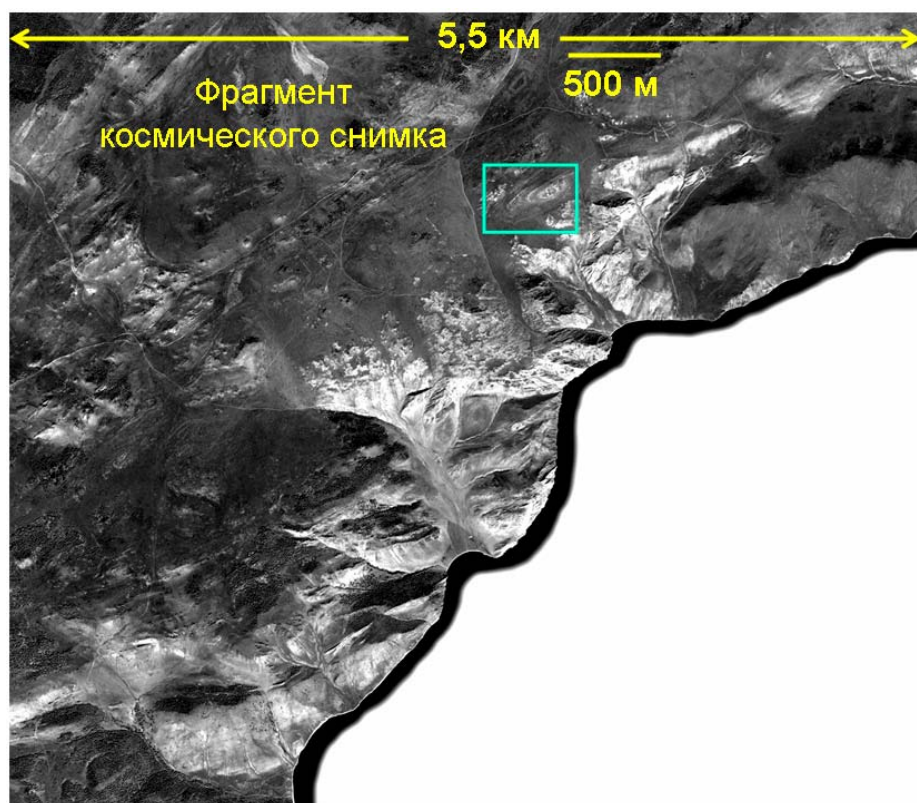


Рис. 67. Космический снимок Мраморного плато со спутника IKONOS-2, июль 2008 г. Сверхвысокое разрешение – 100 см/пиксель. Масштаб 1:5000. В голубой рамке – площадь, показанная на следующем рисунке.

Fig. 67. Space image of Marble plateau at a scale of 1:5000 from IKONOS-2 taken in July 2008. Super-high resolution (100 cm/pix). The area shown in the next figure is in a blue frame.



Рис. 68. Фрагмент рис. 67 без уменьшения. Комментарии излишни. Преимущества сверхвысокого пространственного разрешения очевидны.

Fig. 68. Fragment of Fig. 67 without reduction. No comments required. Advantages of super-high resolution are obvious.

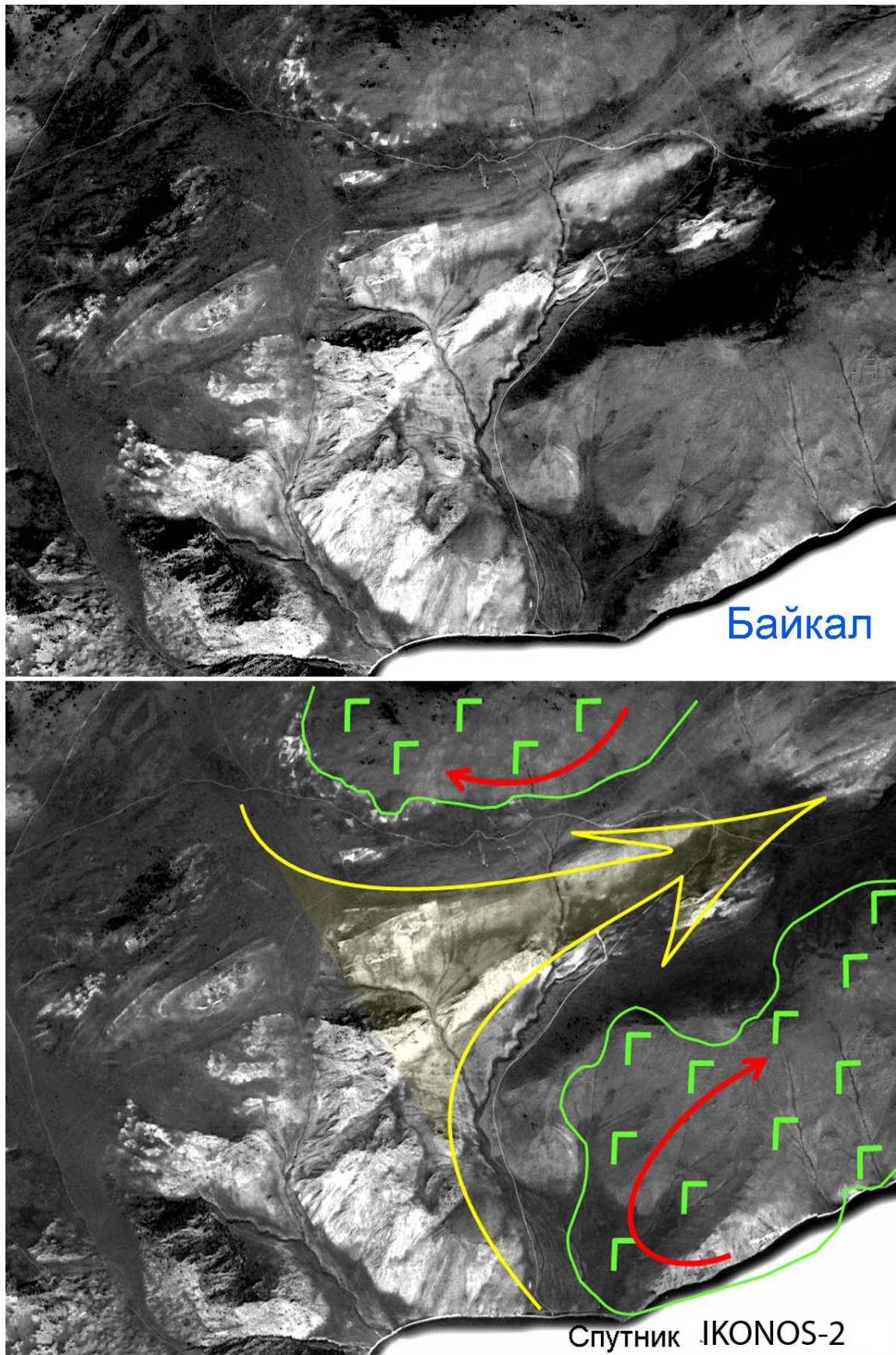
что оба массива метагабброидов вращаются одинаково – по часовой стрелке. В зоне их максимального сближения, между тем, фиксируем противоположные векторы движения. Пластические породы матрикса затягиваются в эту «мясорубку» (желтая стрела) и полностью расплющиваются. То, что получается на выходе, можно видеть на следующих иллюстрациях.

Наиболее ярко выраженными являются серии сигмоид Танхан и Змеиная Падь в северо-восточной части Приольхонья (рис. 70–75). Они расположены непосредственно за массивом Гантели, на северо-восток от него. На фотографии, снятой со стороны Байкала с корабля в июле 2010 г. (рис. 72), хорошо виден тесно сжатый пакет ранних покровных складок, деформированный вокруг более поздних субвертикальных шарниров сдвиговых складок. Пласты нередко разорваны, разодраны на фрагменты и линзы. Протяженность скального разреза около 1 км.

В районе Змеиная падь – Тутайский залив обнажена серия сдвиговых сигмоид. В позднюю сдвиговую сигмоиду (рис. 73) «затянуты» более ранние сдвиговые пластины и гранитогнейсового (правая часть снимка), и пестрого породного состава (слева). Дешифрируемый и картируемый в плане структурный рисунок кажется достаточно простым, но такое впечатление обманчиво. Структурный анализ обнаруживает многоэтапный характер складчатого процесса, а картируемая в этом масштабе ситуация отражает лишь последние события.

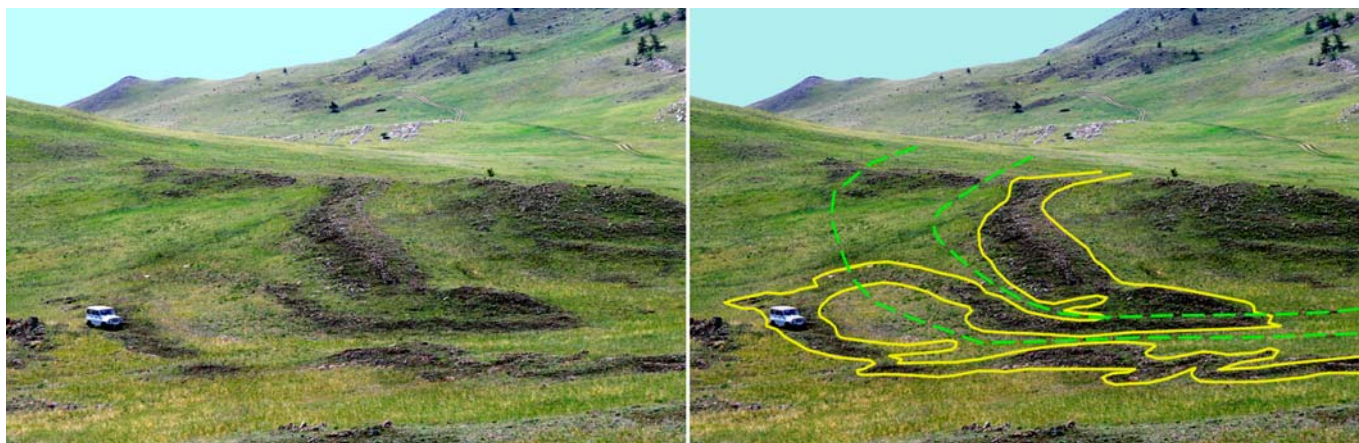
В юго-западной половине складчатого пакета (рис. 74) хаос многоэтапных складок составляет сложнейшие структурные узоры сигмоиды. Далее, северо-восточнее этой скалы (рис. 75), в сплошном скальном разрезе и на хорошо обнаженном плато над ним вскрыта цепь следующих друг за другом сдвиговых сигмоид. Бесконечное число вскрытых здесь складок создает ощущение – наконец,





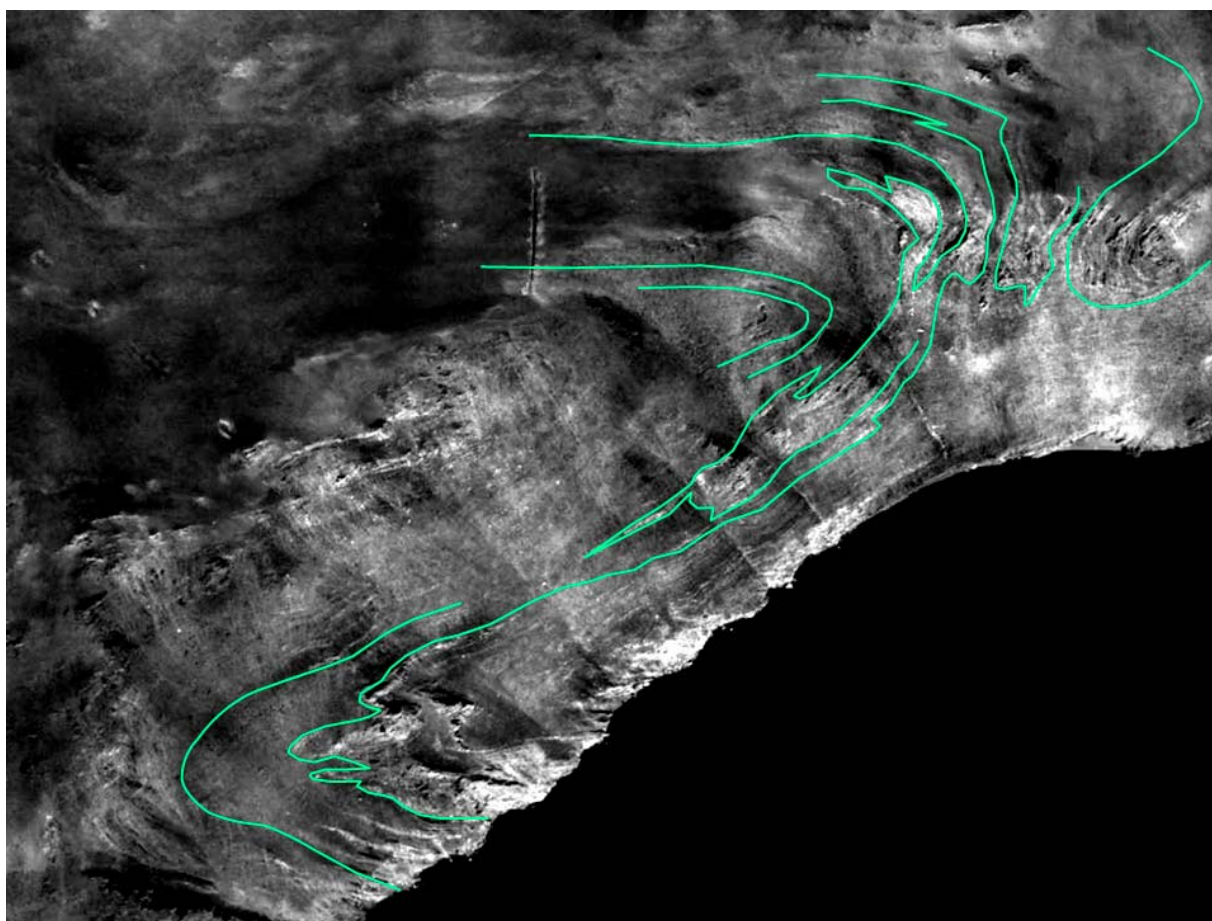
**Рис. 69.** Вверху – космический снимок массива Гантели со спутника IKONOS-2, июль 2008 г. Сверхвысокое разрешение – 100 см/пиксель. Масштаб 1:5000. Внизу – интерпретация структуры.

**Fig. 69.** Top: space image of the Ganteli massif at a scale 1:5000 from IKONOS-2 taken in June 2008. Super-high resolution (100 cm/pix). Bottom: structural interpretation.



**Рис. 70.** Сигмоида Танхан-1 (слева) с элементами дешифрирования (справа). Пакет крупных многоэтапных складок сложной конфигурации к юго-востоку от массива Гантели. Желтый контур – границы тел амфиболитов. Зеленый пунктир – следы осевых поверхностей ранних складок  $F_1$ , деформированных  $F_2$ . Фотография сделана с соседнего склона. Целая серия подобных складок с крутыми шарнирами развита здесь на всем пространстве от Гантелей до Байкала и пролива Ольхонские Ворота. Примеры – на следующих рисунках.

**Fig. 70.** Sigmoid Tankhan-1 with elements of interpretation (at the right). Packages of large multistage folds of complex configuration at the foot of the northwestern Ganteli mountain. Yellow contour denotes amphibolites bodies' boundaries. Green dash line marks traces of axial surfaces of early folds  $F_1$ , deformed  $F_2$ . The photo was taken from the neighboring slope. The whole series of similar folds with steep hinges occur here from the Ganteli Mountains to Lake Baikal and the Olkhonskie Vorota Strait. Examples are given in the following Fig.s.



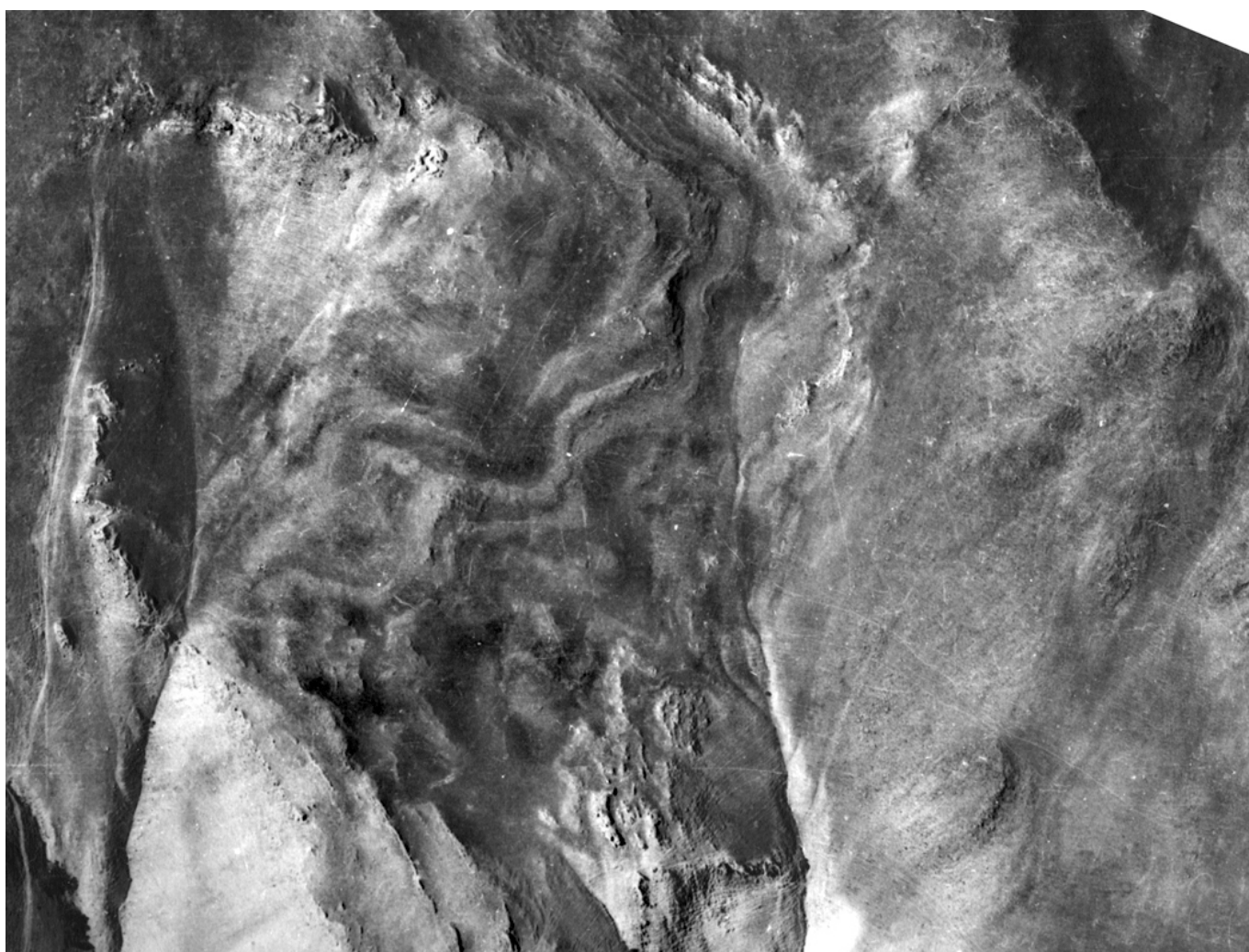
**Рис. 71.** Сигмоида Танхан-2 на космическом снимке со спутника QUICK BIRD-2. Великолепно обнаженная структура, высокий класс дешифрируемости. Цветными линиями здесь для примера обозначены некоторые элементы складки.

**Fig. 71.** Sigmoid Tankhan-2 on a space image from QUICK BIRD-2. Perfectly exposed structure, photo interpretation ability is of a high degree. Some elements of folds are marked by colored lines as examples.



**Рис. 72.** Сигмоида Танхан-2. Снято со стороны Байкала, с корабля, июль 2010 г.

**Fig. 72.** Sigmoid Tankhan-2. Photographed from a ship on Lake Baikal in July 2010.



**Рис. 73.** Сигмоида Змеиная падь. Аэрофотоснимок масштаба 1:5000 (уменьшено).

**Fig. 73.** Sigmoid Zmeinaya Pad'. Aerial photograph, scale 1:5000 (reduced).



**Рис. 74.** Сигмоида Змеиная падь в береговых скалах (фотография со льда Байкала).

**Fig. 74.** Sigmoid Zmeinaya Pad' in cliffs (photographed from ice cover of Lake Baikal).

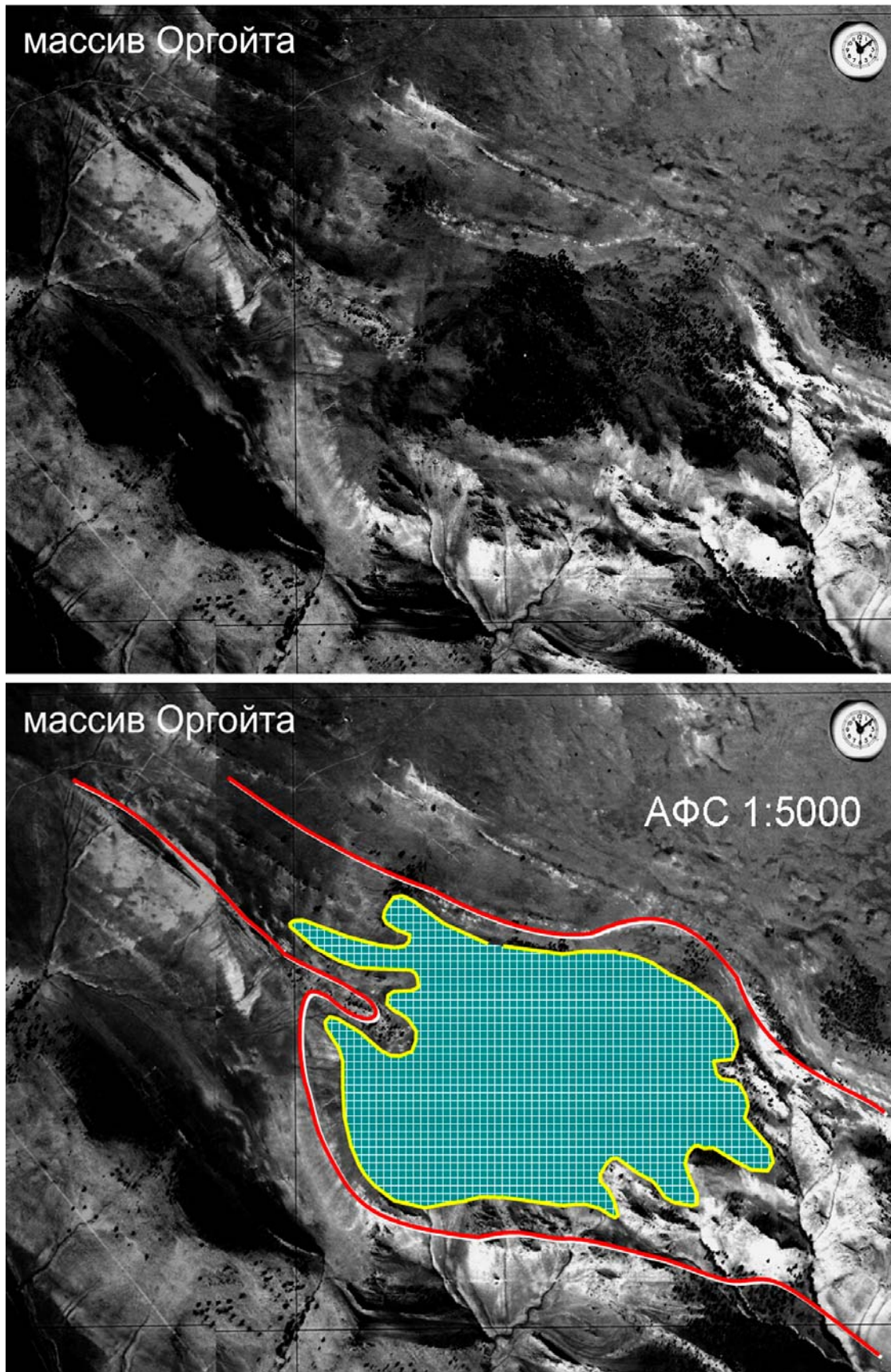
---



**Рис. 75.** Сигмоида Змеиная падь в береговых скалах (северо-восточнее предыдущего участка. Фотография со льда Байкала).

**Fig. 75.** Sigmoid Zmeinaya Pad' in cliffs (to the northeast of the previous site; photographed from ice cover of Lake Baikal).

---



**Рис. 76.** Сигмоидальная структура вокруг массива метагабброидов Оргойта. Аэрофотоснимок масштаба 1:5000. Красными линиями внизу показаны изгибы тел мраморов вокруг габбро (зеленое поле). Черное пятно в центре – небольшой лес. Все остальное – сплошное обнажение.

**Fig. 76.** Sigmoid structure around Orgoita metagabbro massif. Aerial photograph, scale 1:5000. The red lines at the bottom denote bends of marble bodies around gabbros (the green field). Black spot in the center refers to a small forest. All the rest is a continuous exposure.

удастся разобраться в общей структуре... Такое ощущение очень наивно.

Хотя космические снимки сверхвысокого разрешения и аэрофотоснимки сверхкрупного масштаба позволяют получить о структуре гигантскую по своему объему информацию, она, на первый взгляд, не идет в сравнение с тем, что можно видеть и изучать непосредственно в обнажениях. Но зато даже в скалах, в условиях полной обнаженности, в паутине многоактных складок, не уловить стиль генеральной структуры. Никакие детальные структурные исследования неспособны выйти на расшифровку такой крупной структуры. Она не только лучше видна из Космоса. Она вообще видна только оттуда.

Мы приближаемся, таким образом, к методически важному выводу: крупномасштабные космические и аэрофотоснимки не лучше и не хуже среднемасштабных снимков или наблюдений непосредственно в обнажениях. Это просто разный инструментарий. Разная информация. Только совместное использование того и другого приносит эффект, многократно превышающий их раздельное применение.

Сигмоидальные структурные рисунки возникают в матрице, по-видимому, в двух ситуациях: вокруг массивов габброидов и гипербазитов (1) и вне связи

с такими массивами – как следствие прогрессивной сдвиговой деформации (2). Приведем еще один очевидный пример изгибания складчатых пакетов вокруг массивов габброидов (рис. 76).

А вот пример второго рода. На острове Ольхон закартирована большая сдвиговая сигмоида (рис. 77). Структура настолько велика, что здесь пришлось использовать аэрофотоснимок масштаба 1:25000. Наблюдается изгиб пакета складок (голубое – структурные линии) и ранних сдвиговых пластин разного состава вдоль поздней левосдвиговой зоны (красный пунктир). Нужно отметить, что Большая сигмоида острова Ольхон не связана с огибанием каких-то жестких массивов габбро, как это можно наблюдать в других местах региона. Наоборот, присутствующие здесь тела габбро сами «затянуты» в сигмоидальную структуру, повторяя ее конфигурацию. Они расположены как раз между голубыми линиями, показанными на рисунке. Можно предположить, что ранние сигмоиды вокруг тел габбро здесь существовали, но были сжаты и расплющены в процессе прогрессивной сдвиговой деформации и теперь не распознаются.

На космических снимках сверхвысокого разрешения выявляются детали их строения. Интересно

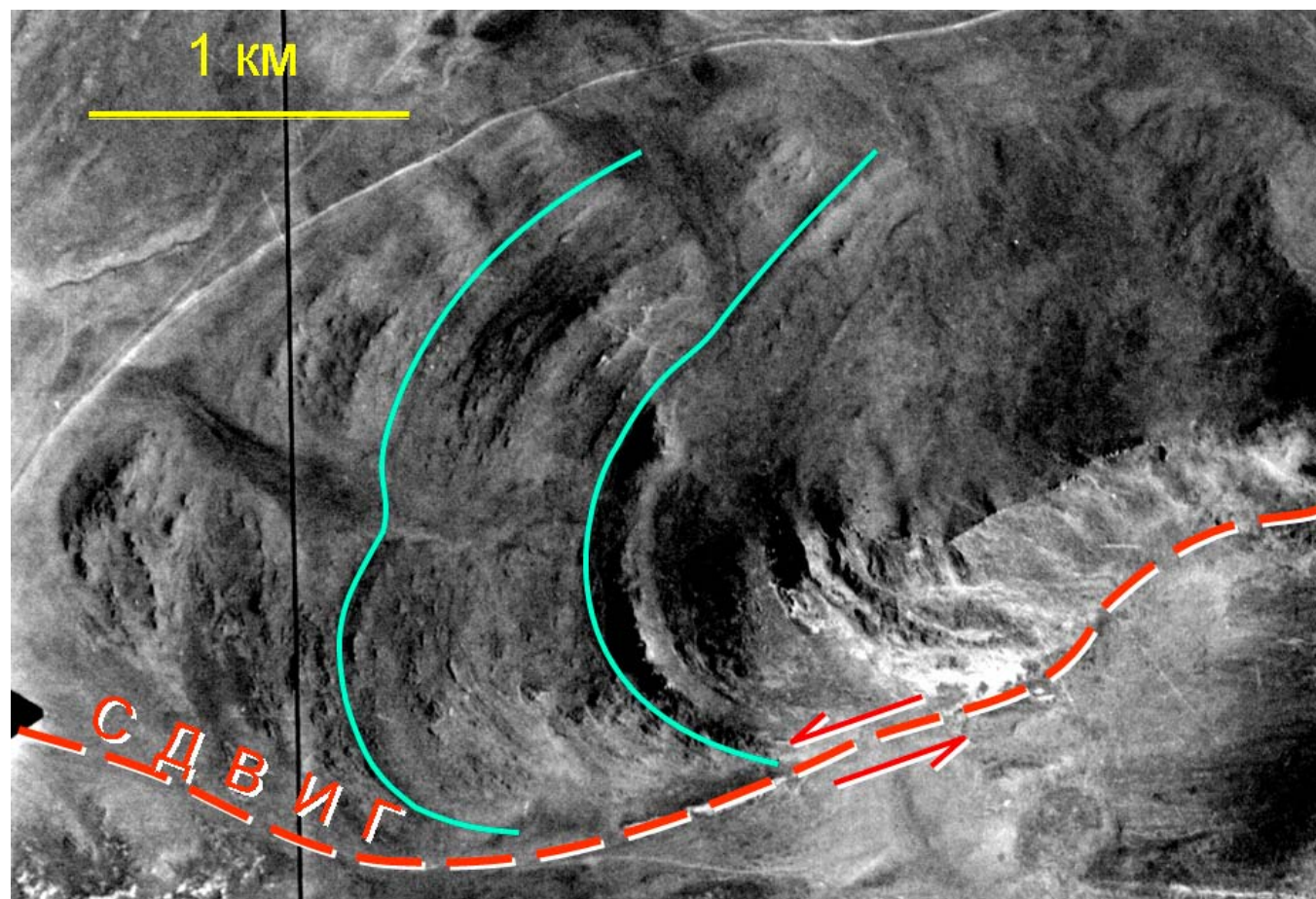


Рис. 77. Большая сдвиговая сигмоида острова Ольхон. Аэрофотоснимок масштаба 1:25000.

Fig. 77. Aerial photograph of great shear sigmoid of the Olkhon Island. Scale 1:25000.

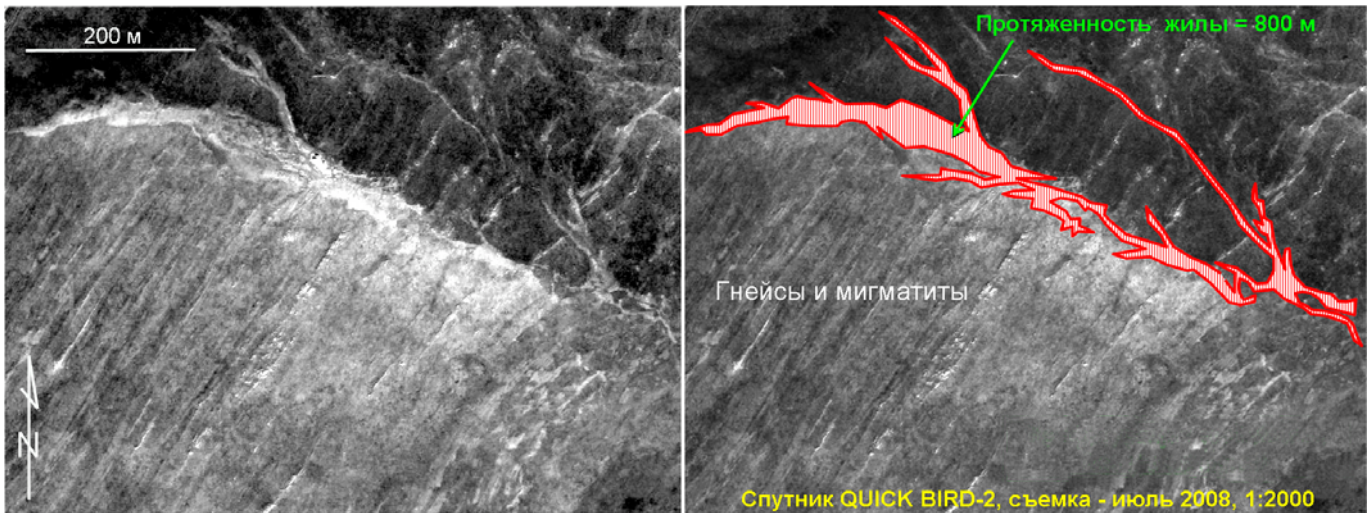


Рис. 78. Фрагмент Большой сдвиговой зоны о. Ольхон и крупной жилы гранитов. Космический снимок со спутника QUICK BIRD-2, июль 2008 г. (слева – снимок, справа – интерпретация).

Fig. 78. Fragment of great shear zone of the Olkhon Island and large granite vein (image is on the left, its interpretation is on the right). Space image taken from QUICK BIRD-2 in July 2008.

положение крупной гранитной жилы синметаморфических гранитов в Большой сдвиговой сигмоиде острова. Она ориентирована под прямым углом к зоне сдвигового шва (рис. 78). Степень дешифрирования гранитных жил в регионе практически полная. Эта информация особенно важна при составлении карт. В этом деле она просто незаменима. Гранитные жилы нередко протягиваются на многие километры, а рои таких жил вмещают тысячи гранитных тел. Закартировать каждое из них – немыслимо. Снимки высокого разрешения позволяют это сделать быстро и со стопроцентной точностью. В итоге мы получаем реальную матрицу структурных рисунков гранитных жил, и это серьезный аргумент для расшифровки кинематики.

### 2.2.3. Сдвиговые пластины, сложенные породами Ангинского комплекса (эпидот-амфиболитовая и амфиболитовая фации метаморфизма)

Этот тип структур включает пластины, сложенные преимущественно мраморами и метабазами, с подчиненным количеством гнейсов и кварцитов, метаморфизованными в РТ-условиях эпидот-амфиболитовой и амфиболитовой фаций (Ангинский комплекс), с участием монцогабброидов Бирхинского комплекса (499 млн лет), сиенитов и нефелиновых сиенитов (Тажеранский комплекс, 470 млн лет) и субщелочных метагабброидов (Восточно-Тажеранский комплекс) [Скляр и др., 2009а; Федоровский

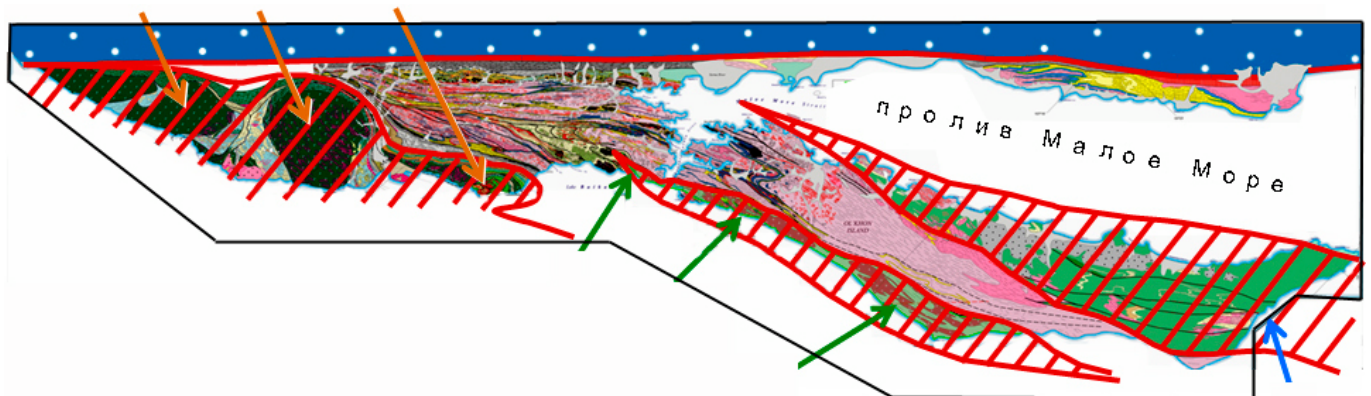
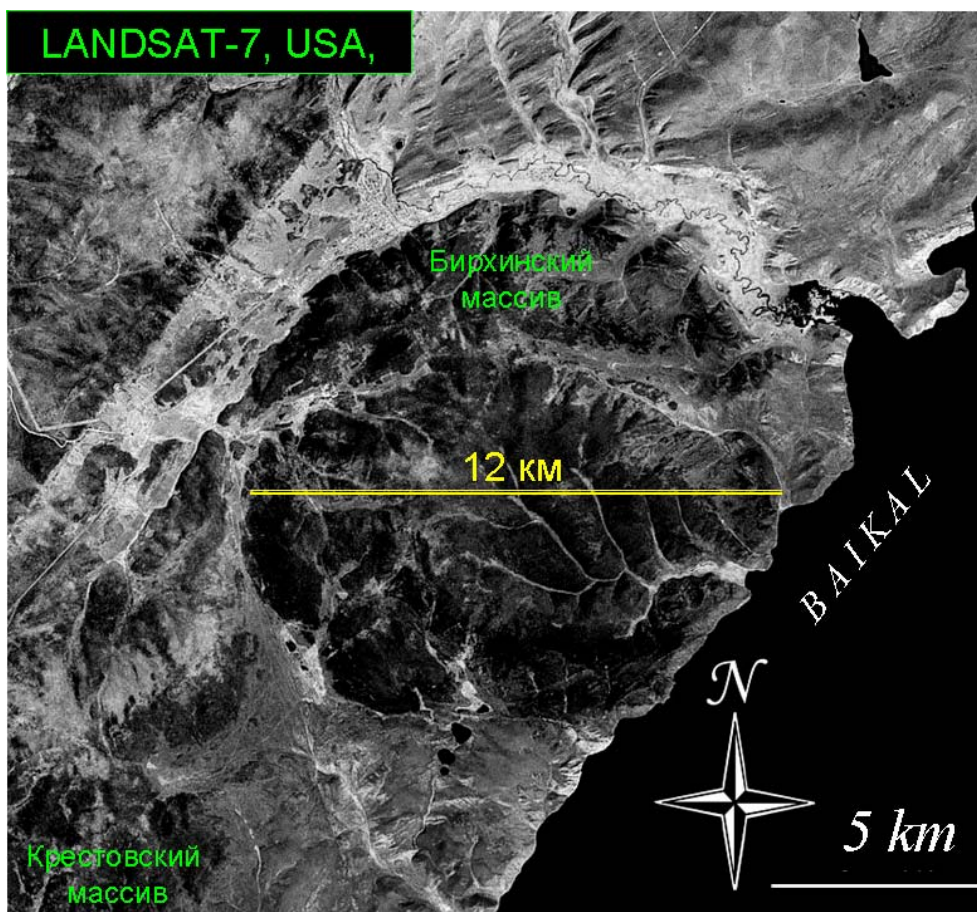


Рис. 79. Схема расположения в регионе группировок сдвиговых пластин четвертого типа.

Fig. 79. Distribution of clusters of shear slabs of the fourth type in region.



**Рис. 80.** Крупнейший в регионе массив Бирхин (монзогабброиды). Массив уверенно дешифрируется на любых дистанционных изображениях. Здесь – снимок со спутника LANDSAT-7.

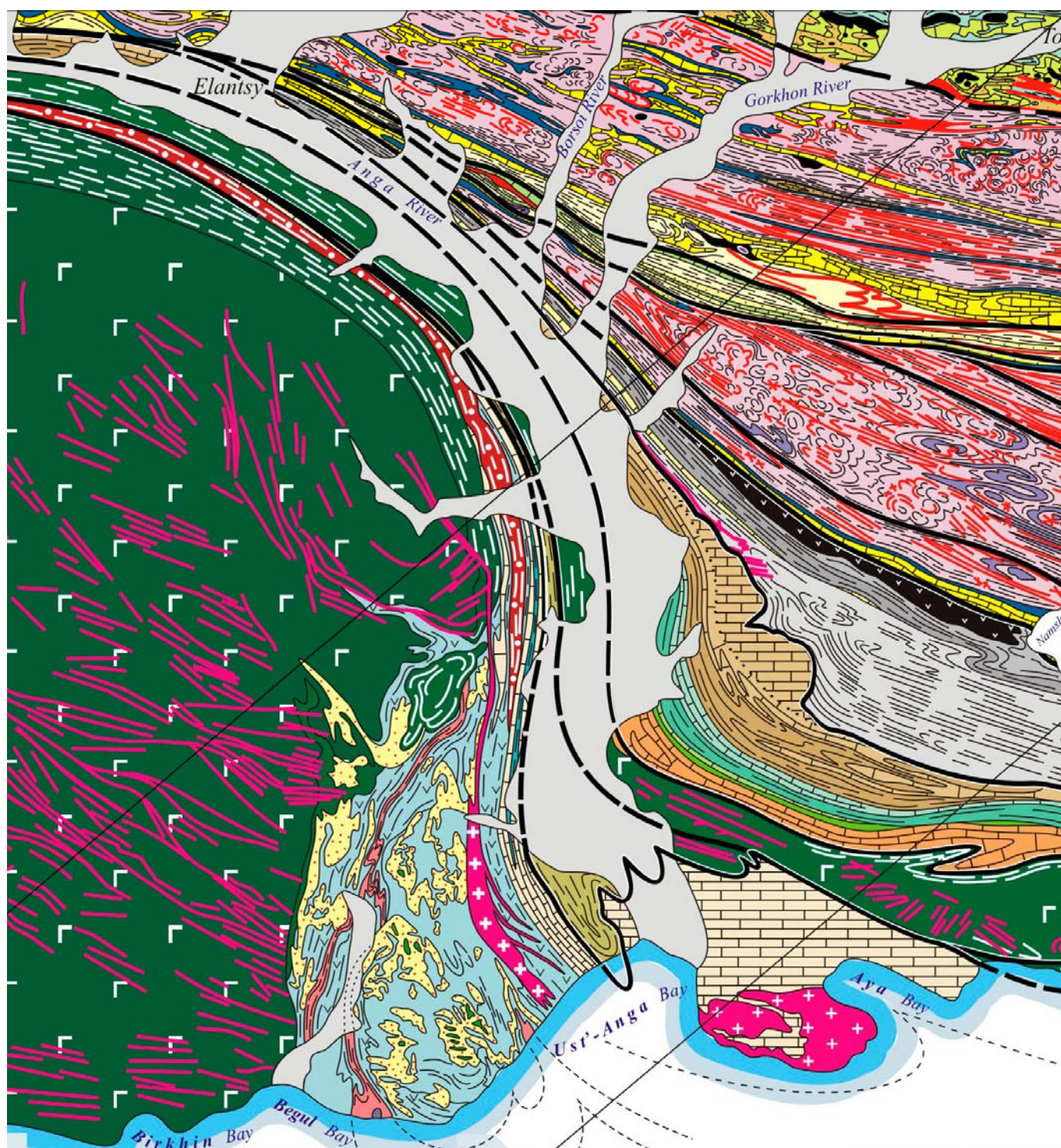
**Fig. 80.** The largest in the region Birkhin massif (monzogabbro). The massif is reliably interpreted on any remote sensing imagery. Here, an image from LANDSAT-7.

и др., 2009а, 2010]. Возраст метаморфизма 460–470 млн лет. Пластины такого состава и строения занимают около половины площади Ольхонского региона и группируются в трех его частях (рис. 79). Большое поле этих структур расположено в Приольхонье, в границах полосы Крестовая–Бирхин–Тажеран (коричневые стрелки на схеме). Немалые площади подобных образований обнаружены и на острове Ольхон. Они составляют две зоны. Одна из них локализована вдоль байкальской окраины острова (зеленые стрелки). Здесь закартировано эшелонированное интрузивное тело субщелочных гранитов – граносиенитов – кварцевых сиенитов протяженностью 36 км. Возраст этих пород 501 млн лет [Gladkochub et al., 2008]. Вторая зона занимает северо-восточную окраину острова и обнажена в скалах Байкала на протяжении 25 км и вдоль побережья пролива Малое Море – на 50 км (синяя стрелка на схеме). Внутреннее строение перечисленных зон неоднородно; они сами состоят из группировок сдвиговых пластин меньших масштабов.

В разных частях региона пластины этого типа контактируют с различными компонентами коллизийного коллажа. В юго-западной части Приольхонья

пограничная пластина зоны Крестовая–Бирхин–Тажеран по blastomylonitovому шву соприкасается со сдвиговой пластиной Орсо. В северо-восточной части Приольхонья и на острове Ольхон пластины, сложенные Ангинским комплексом, контактируют с гранитогнейсовыми сдвиговыми пластинами (комплекс Шебарта). Для группировки сдвиговых пластин, составляющих зону Крестовая–Бирхин–Тажеран, обычны крупные сдвиговые сигмоиды. Такие структуры формируются в результате продолжающейся сдвиговой деформации возникших ранее сдвиговых пластин. Во всех случаях оказалось, что в пределах этой зоны сдвиговые сигмоиды формировались в связи с присутствием «жестких» массивов габброидов в маловязком матрикс метаморфитов, охваченных тектоническим течением. Размеры сигмоид прямо зависят от размеров массивов, вокруг которых они возникали. Самая крупная из них – сигмоида вокруг массива монзогабброидов Бирхин (рис. 80–82). Размах ее крыльев 10–15 км. Весьма значительна и сигмоида, сформированная в районе массива Тажеран [Федоровский и др., 2010]. Косвенные и пока немногочисленные прямые данные свидетельствуют о присутствии здесь на не-





**Рис. 81.** Фрагмент Геологической карты Приольхонья [Fedorovsky, 2005]. Самая крупная в регионе Z-образная сдвиговая сигмоида локализована вокруг Бирхинского массива монцогабброидов. Размах этой структуры около 15 км.

**Fig. 81.** The fragment of the Olkhon area geological map [Fedorovsky, 2005]. The largest Z-shaped shear sigmoid occurs around the Birkin monzogabbro massif. Spread of this structure is about 15 km.

большой глубине монцогабброидов типа тех, что известны в массиве Бирхин. По-видимому, и сигмоида Тажеран имеет ту же природу, что и сигмоида вокруг массива Бирхин, отличаясь от нее только меньшими размерами.

Степень дешифрируемости этих двух крупных сигмоид на снимках с самолетов и с космических аппаратов практически полная. Дистанционные изображения дают возможность фиксировать любые, даже самые незначительные, изменения в конфигу-



Рис. 82. Прибрежная часть Бирхинской сигмоиды. Аэрофотоснимок масштаба 1:12000.

Fig. 82. Aerial photograph of the coastal part of the Birkhin sigmoid. Scale 1:12000.

рации сигмоид.

Что касается распознавания на дистанционных материалах самих габброидов, то здесь встречаются трудности, преодолеть которые непросто. В тех местах, где габбро выходят к берегу Байкала, они образуют скалистые обрывы высотой до 200–300 м (рис. 83). В таких случаях габброиды на дистанционных изображениях не дешифрируются. Но и в удалении от скал ситуация оказывается не лучше. Значительная часть площади массивов Бирхин, Крестовского и Бугульдейского, например, покрыта лесами, и признаки дешифрируемости здесь отсутствуют. Вместе с тем, в целом и крупные, и мелкие массивы габброидов можно без труда распознать на снимках – по темному фототону. Да и сами габброиды всегда составляют наиболее высокие вершины в рельефе – и это тоже признак их дешифрируемости. Таким образом, хотя внутреннее строение массивов на дистанционных изображениях не удастся обнаружить, сами контакты их с вмещающими породами во многих случаях уверенно распо-

знаются. Нередко, впрочем, узнать габброиды на дистанционных изображениях удается и по весьма примечательной особенности, присущей этим породам. На плоских водоразделах, где особенно масштабно реализованы процессы выветривания, в габброидах повсеместно и в грандиозных масштабах проявлена присущая им скорлуповатая или шаровидная отдельность. Тысячи крупных и гигантских шаров покрывают значительные площади, и эти необычные скопления хорошо видны и на аэрофотоснимках, и на космических снимках (рис. 84).

Характерная особенность геологии всех зон этого типа – большие масштабы формирования различных по генезису смесей. На юге зоны Крестовая–Бирхин–Тажеран и на острове Ольхон это мраморные меланжи (рис. 85–87), а на севере – карбонатиты и минглинг-проявления сиенит-карбонатитового состава. На северо-востоке острова Ольхон широкое развитие получили базит-гранитные продукты магматического минглинга [Скляров, Федоровский, 2006].



**Рис. 83.** Монцогабброиды в береговых скалах мыса Орсо. Массив Улан-Нур.

**Fig. 83.** Monzogabbro in cliffs of Orso Cape. Ulan-Nur massif.



**Рис. 84.** Шаровидная отдельность в габбро. В массиве Бирхин она выражена в грандиозных масштабах. По всем признакам это геологический памятник природы. Глыбы настолько велики, что видны из космоса.

**Fig. 84.** Spheroidal jointing in gabbro. It extensively occurs in the Birkhin massif. It bears all features of natural geological memorial. Blocks are so huge that are observed from space.



Рис. 85. Мраморные меланжи в районе Широкая-Крестовая.

Fig. 85. Marble mélanges in the Shirokaya-Krestovaya area.



Рис. 86. Меланж вблизи. Остров Ольхон, Антархайский залив.

Fig. 86. Mélanges at a close view. The Olkhon Island, Antarkhaiskii Bay.

Меланж. Остров Ольхон,  
мыс Хобой



Рис. 87. Меланж с включениями базитов внушительных размеров.

Fig. 87. Inclusions in mélanges may be of impressive size.

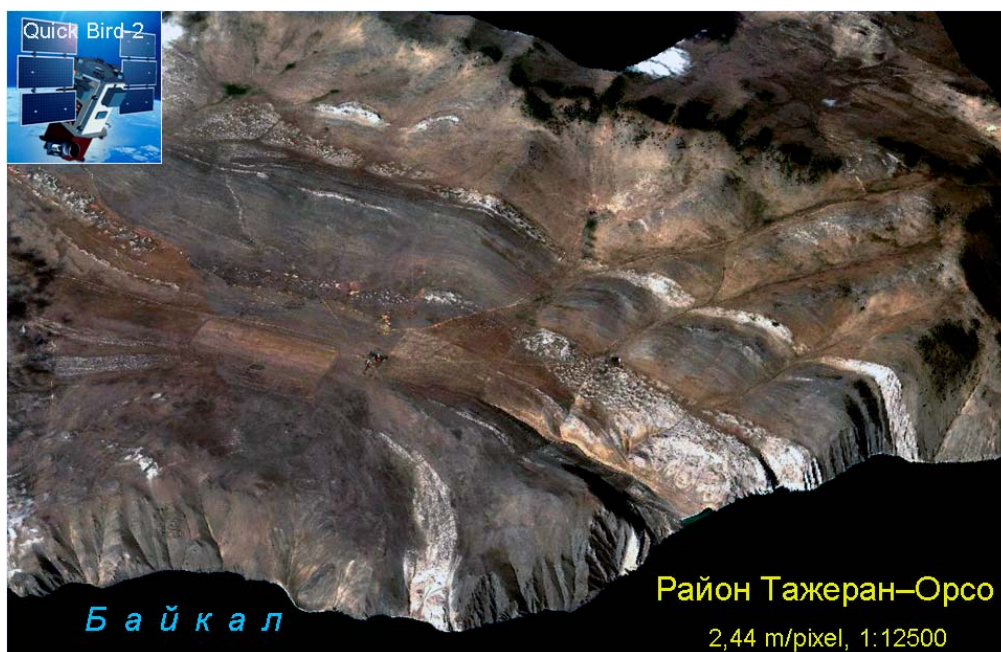
Важный момент в геологии зоны Крестовая–Тажеран – проявления щелочного магматизма. Наиболее крупные выходы таких пород известны в районе знаменитого своими минералогическими редкостями массива Тажеран.

Тажеранский массив сиенитов и нефелиновых сиенитов расположен на берегу Байкала, занимая площадь около 6 км<sup>2</sup> (рис. 88, 89). В строении массива принимают участие сиениты и нефелиновые сиениты, насыщенные большим количеством разноразмерных тел карбонатных и карбонатно-силикатных пород, высокотемпературных метасоматитов по породам базитового состава и основных пород, интерпретируемых как вмещающие кристаллические сланцы. В северной части массива картируется мощная толща пород основного состава, отнесенная к роговикам, образованная под воздействием внедрения сиенитов [Федоровский, 2008б]. В 60–70-х годах прошлого века Тажеранский массив был детально изучен А.А. Коневым и другими сотрудниками Института земной коры и Института геохимии СО АН СССР. Блестяще проведенные петрографические, минералогические и петрохимические исследования на основе результатов детального картирования были обобщены в монографии [Конев, Самойлов, 1974] и надолго «закрыли тему». Однако

необычные взаимоотношения карбонатных и силикатных пород, не вписывающиеся в предложенные варианты провеса кровли и ксенолитов в сиенитах [Конев, Самойлов, 1974] возродили интерес к массиву и заставили заново перекартировать его, используя имеющийся богатый дистанционный материал (аэрофотосъемка четырех масштабов и космические снимки с шести спутников).

Любопытна история авторского интереса к массиву, спровоцировавшего массивные работы в его пределах. В 2004 г. во время исследований береговых обнажений со льда, когда из чистого любопытства мы решили пройти и у Тажеранского массива, открылась прекрасно обнаженная жила (дайка?) бруситовых мраморов (рис. 90) в сиенитах и субщелочных габбро. Никаких сомнений в том, что жила прорывает сиениты и габброиды (рис. 91), не было, как и в том, что сиениты, прорванные дайкой субщелочных габброидов, были тектонизированы к моменту внедрения мраморов. Позднее были обнаружены и другие жилы, а также взаимоотношения мраморов с интрузивными породами, противоречащие интерпретации мраморов в качестве ксенолитов или провесов кровли в сиенитах, которые будут продемонстрированы ниже.

В настоящее время на площадь массива уже



**Рис. 88.** Цифровая объемная модель рельефа. Генерирована в программе ENVI 4.5 с использованием мультиспектрального космического снимка со спутника Quick Bird-2 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.

**Fig. 88.** Digital 3D model of the relief. It is generated in ENVI 4.5 using multispectral space image from QUICK BIRD-2 and altimetry from radar satellite SHUTTLE. In the bottom left corner – the Tazheran massif of syenite, nepheline syenite, and svyatonosite, surrounded by a shear loop. In the center – the Orso shear slab abutted against an ophiolite suture at the north. In the upper part of the model – granite-gneiss and migmatites of the Central Dome zone.



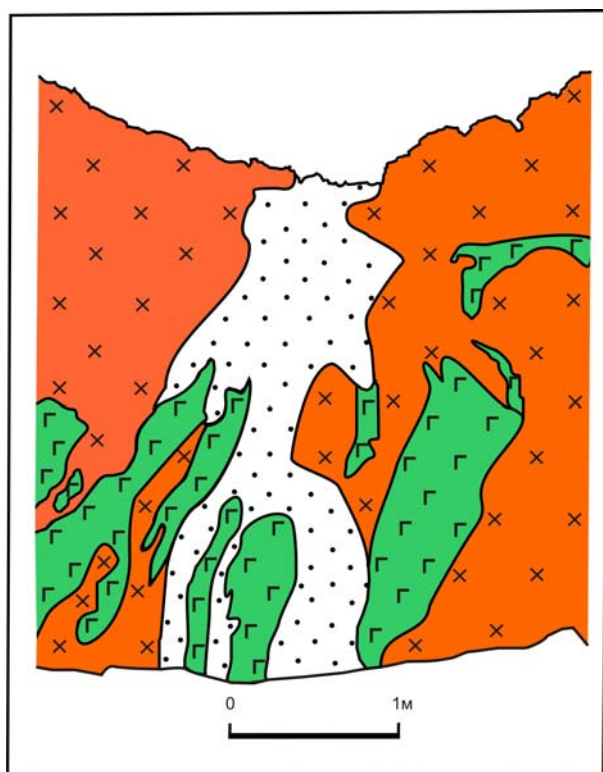
**Рис. 89.** Интегрированный космический мультиспектральный снимок района Тажеран. Спутник IKONOS-2.

**Fig. 89.** Integrated space multispectral image of the Tazheran area. Space image from IKONOS-2.



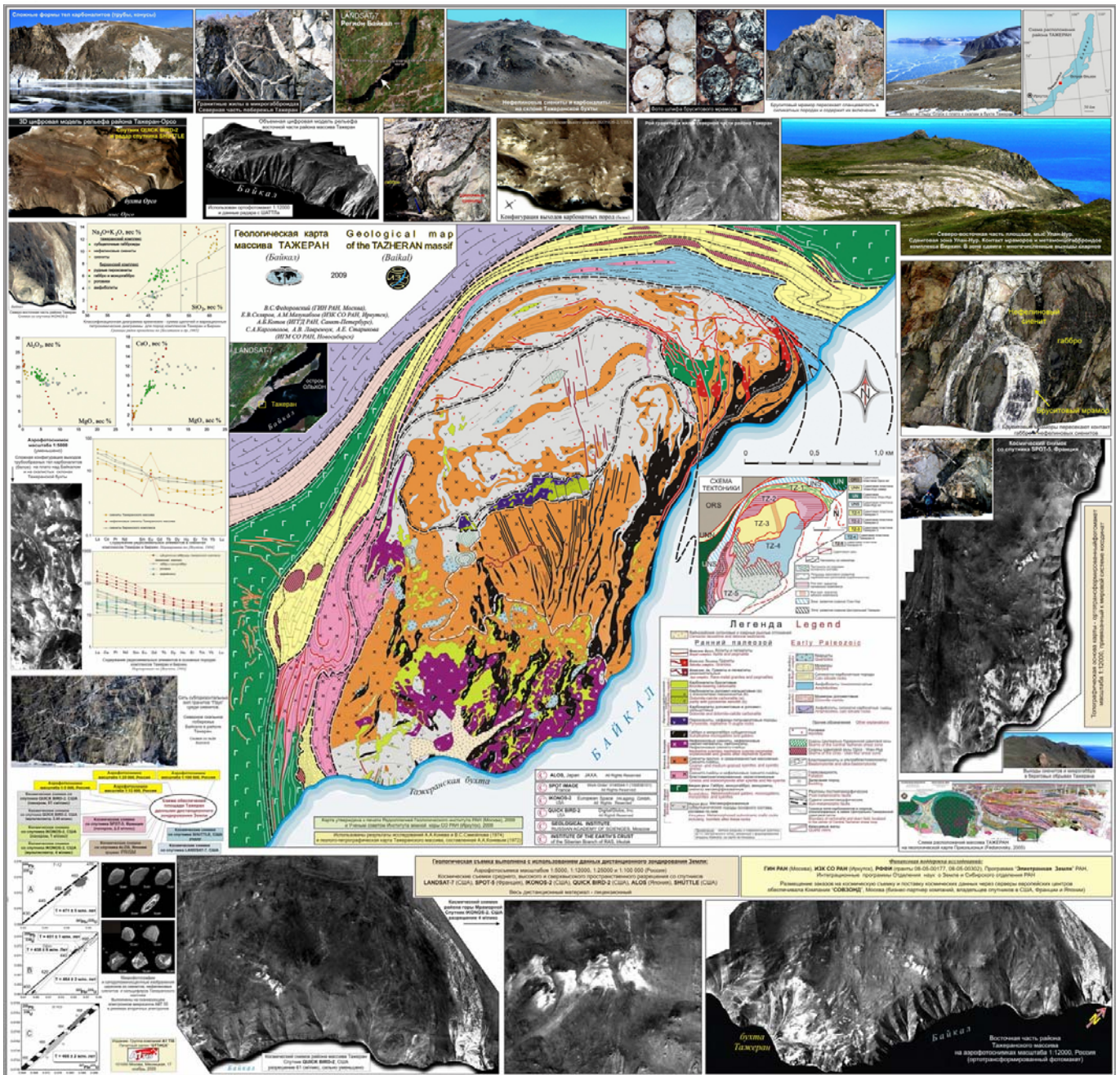
**Рис. 90.** Жила бруситовых мраморов, прорывающая сиениты (серые) с тектонизированными дайками субщелочных габбро (темные).

**Fig. 90.** Vein of brucite marbles cutting syenites (gray) with tectonized dykes of subalkaline gabbro (dark).



**Рис. 91.** Интерпретационная зарисовка с фотографии (рис. 90), показывающая взаимоотношения разных пород. Красным показаны сиениты, зеленым – субщелочные габброиды, белым – бруситовые мраморы. Пояснения в тексте.

**Fig. 91.** Interpretation sketch from the photograph (Fig. 90) showing relationships of different rocks. Red – syenites, green – subalkaline gabbroids, white – brucite marbles. Explanations see in text.



**Рис. 92.** Геологическая карта района Тажеран. Эта карта – первая из пакета – опубликована в ноябре 2009 г. Размер карты 100×100 см. В зарамочном поле карты размещены тектоническая схема, аэрокосмический материал, петрогеохимические диаграммы, данные геохронологии. Специальным знаком выделены карбоналиты (аналоги карбонатов, не имеющие, в отличие от последних, мантийных изотопно-геохимических меток) [Федоровский, 2009б].

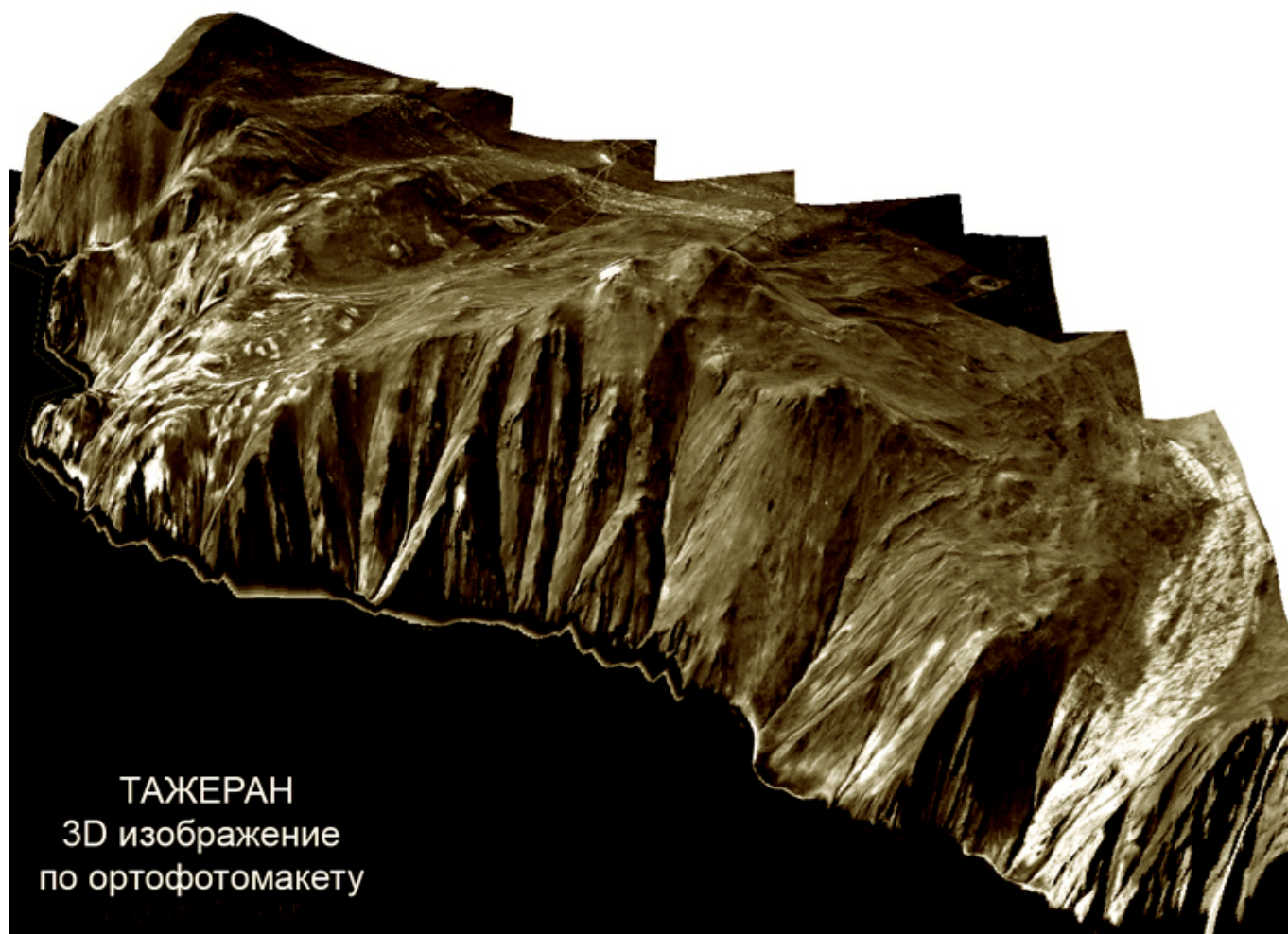
**Fig. 92.** Geological map of the Tazheran area. This map is the first of the package and was published in November 2009. Its size is 100×100 cm. Margin data include tectonic sketch-map, aerospace material, petro- and geochemical diagrams, geochronological data. Special symbol designates carbonaliths (analogues of carbonates but without mantle isotopic-geochemical affinities) [Федоровский, 2009б].

составлена геологическая карта в масштабе 1:10000, изданная в 2009 г. (рис. 92), которая, с одной стороны, позволила понять многие аспекты строения, а с другой – обозначила многие новые вопросы и проблемы. Поэтому ниже мы остановимся на проблеме **карбоналитов** – карбонатных или карбонатно-силикатных пород, которые обладают признаками интрузивного внедрения, однако ман-

тийные изотопно-геохимические метки (диагностический признак **карбонатитов**) в них отсутствуют.

Прежде чем перейти к собственно карбоналитам, нужно отметить, что для Тажеранского массива составлено множество разнообразных схем и моделей, в частности объемная цифровая модель рельефа (рис. 93), на которой хорошо видны многочисленные выходы карбонатов в обрамлении и юж-





**Рис. 93.** Объемная цифровая модель рельефа района Тажеранского массива. Поле массовых выходов карбонатитов видно в левой части модели (белое). Модель сгенерирована в программе ENVI с использованием ортотрансформированного аэрофотомaketа масштаба 1:12000.

**Fig. 93.** Digital 3D model of the relief of the Tazheran massif. Mass outcrops of carbonatites are seen in the left part of the model (white). The model was generated in ENVI program using orthotransformed aerial photograph montage at a scale of 1:12000.

ной части массива, а также тектоническая схема массива (рис. 94), демонстрирующая его сложное строение.

Интересно то (рис. 95), что граница поля бруситовых мраморов (карбонатитов) пересекает линейную систему тел габбро и сиенитов (справа). Можно предположить, что первично-осадочные карбонатные породы, попадая в глубинные зоны коры, мобилизуются в процессе сдвигового тектогенеза и метаморфизма, а оказавшись в контакте с высокотемпературными магмами (базиты, сиениты), еще более теряют вязкость и сами ведут себя как магматиты, а проще говоря – как расплав.

Необычна морфология карбонатных тел. Это кольцевые (цилиндрические) трубообразные тела, тесно упакованные в осевой зоне сдвиговой петли. На рисунках 96–99 показаны детали таких тел (необходимые пояснения даны в подрисуночных подписях). Можно предположить, что внедрение мраморного месива или расплава происходило по мно-

гочисленным ослабленным зонам, возникшим как результат пересечения двух сланцеватостей в замке Тажеранской сдвиговой петли.

Причудливая конфигурация карбонатных пород в плане определяется, по-видимому, сочетанием неровной поверхности современного рельефа Тажеранского плато и этой субвертикальной кружевной структуры, напоминающей пчелиные соты.

Карбонатные тела прекрасно видны на местности (рис. 100), легко картируются с использованием детальных аэрофотоснимков и космических снимков. Однако использование основы более мелкого масштаба (см. [Конев, Самойлов, 1974]) неизбежно ведет к искажению реальной формы карбонатных тел (за исключением самых крупных блоков) или к неотражению их на карте.

В пределах массива в полях развития карбонатных пород нередко присутствуют участки, насыщенные телами сиенитов, реже субщелочных базитов (рис. 101). Сиениты часто имеют овальную или

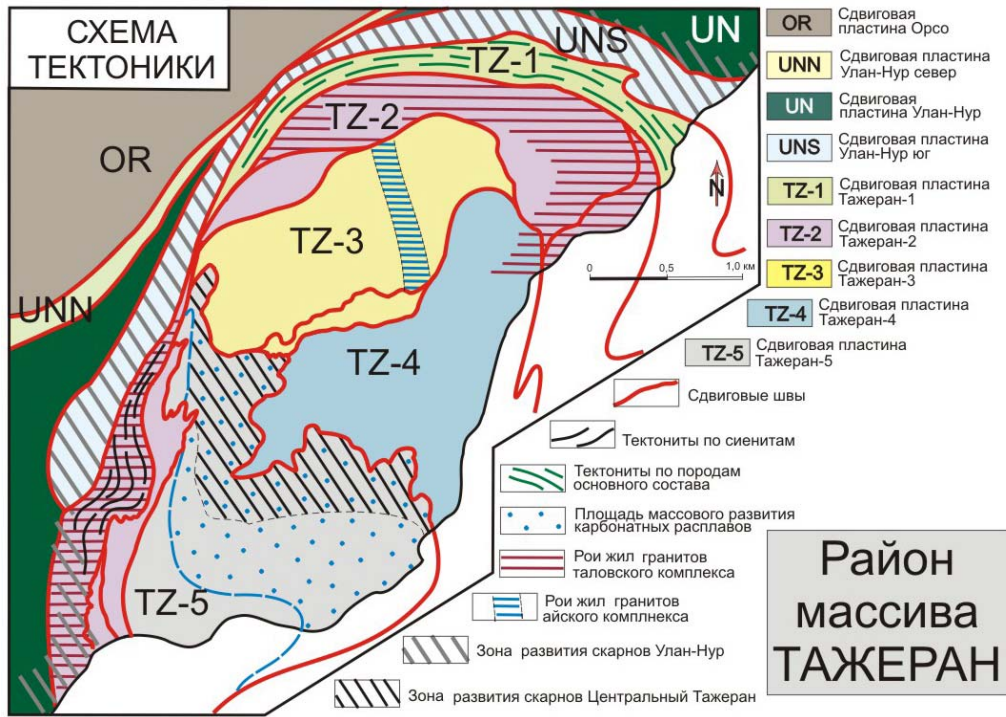


Рис. 94. Тектоническая схема района массива Тажеран. Девять сдвиговых пластин составляют структурный каркас района Тажеран.

Fig. 94. Tectonic scheme of the Tazheran massif area. Nine shear slabs form structural carcass of the Tazheran area.

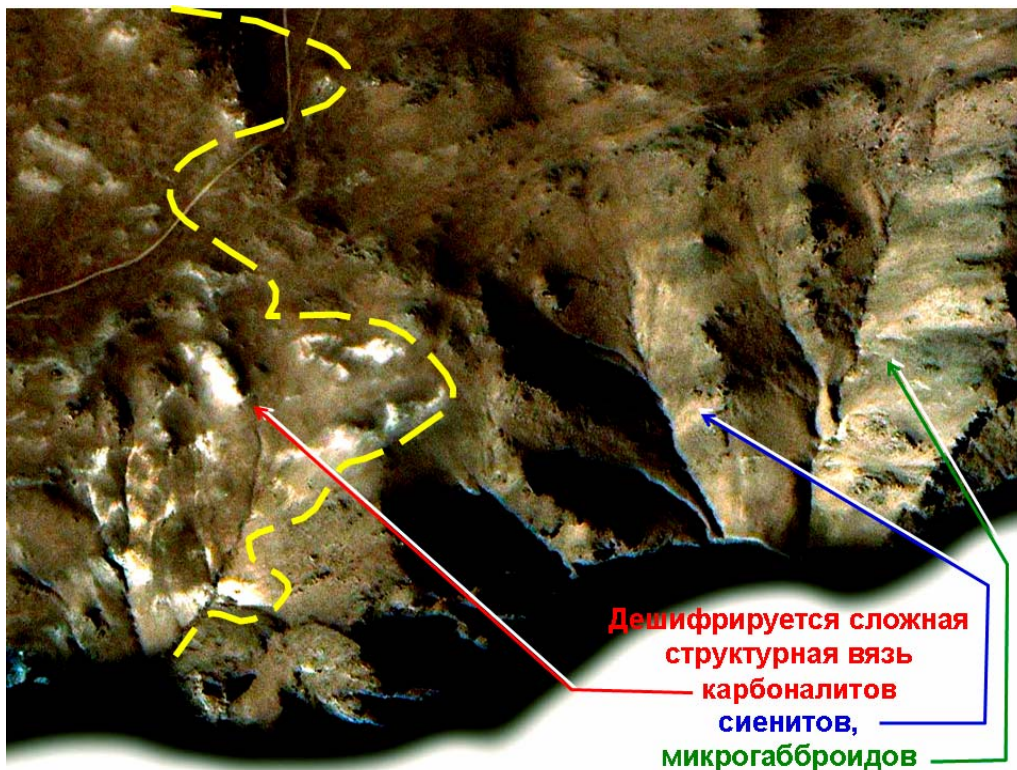


Рис. 95. Граница поля брусчатых мраморов (карбонатитов) с линейной системой тел габбро и сиенитов (справа) на снимке со спутника IKONOS-2, разрешение 1 м/пиксель. Масштаб 1:5000.

Fig. 95. The boundary of brucite marbles (carbonaliths) field with the linear system of gabbro and syenites (on the right) in an image from IKONOS-2. Scale 1:5000, resolution 1 m/pix.

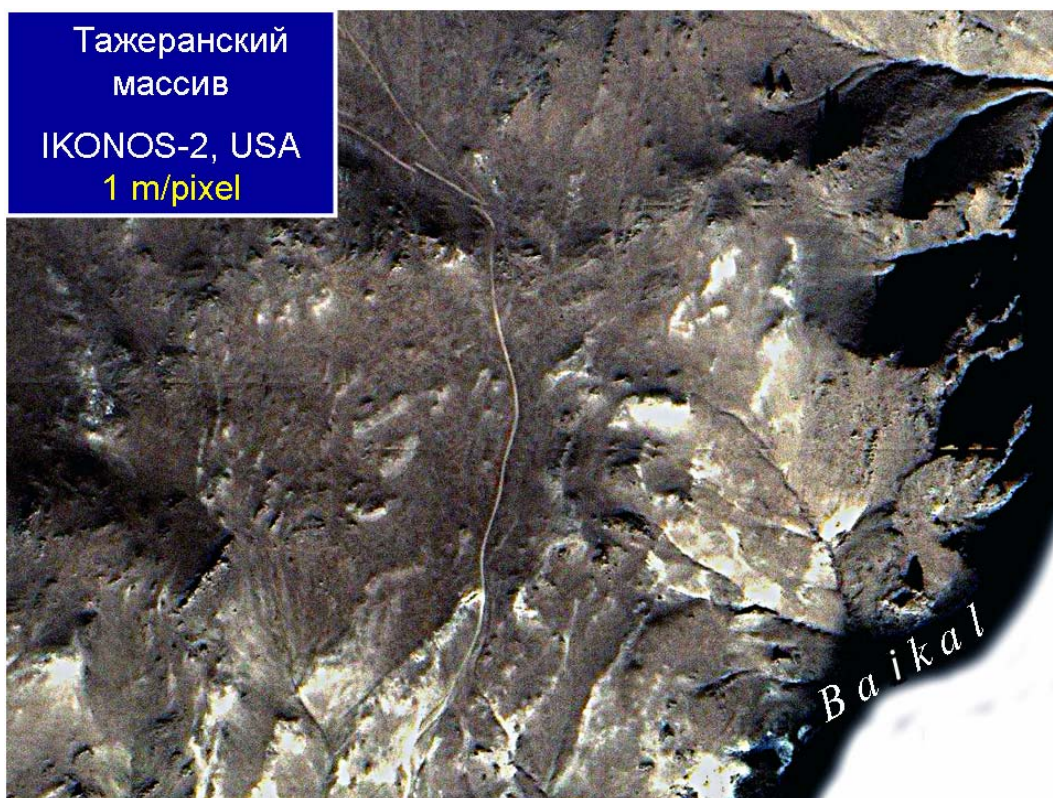


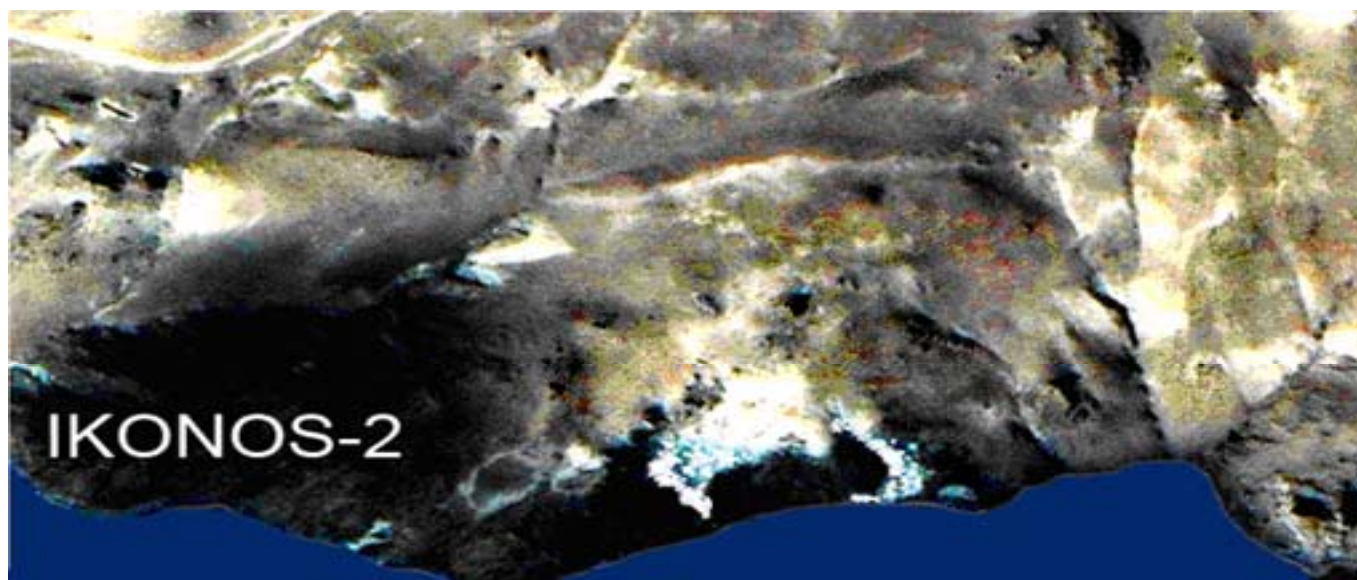
Рис. 96. Фрагмент Тажеранского массива. Космический снимок со спутника IKONOS-2, разрешение 1 м/пиксель.

Fig. 96. Fragment of the Tazheran massif. Space image from IKONOS-2, resolution 1 m/pix.



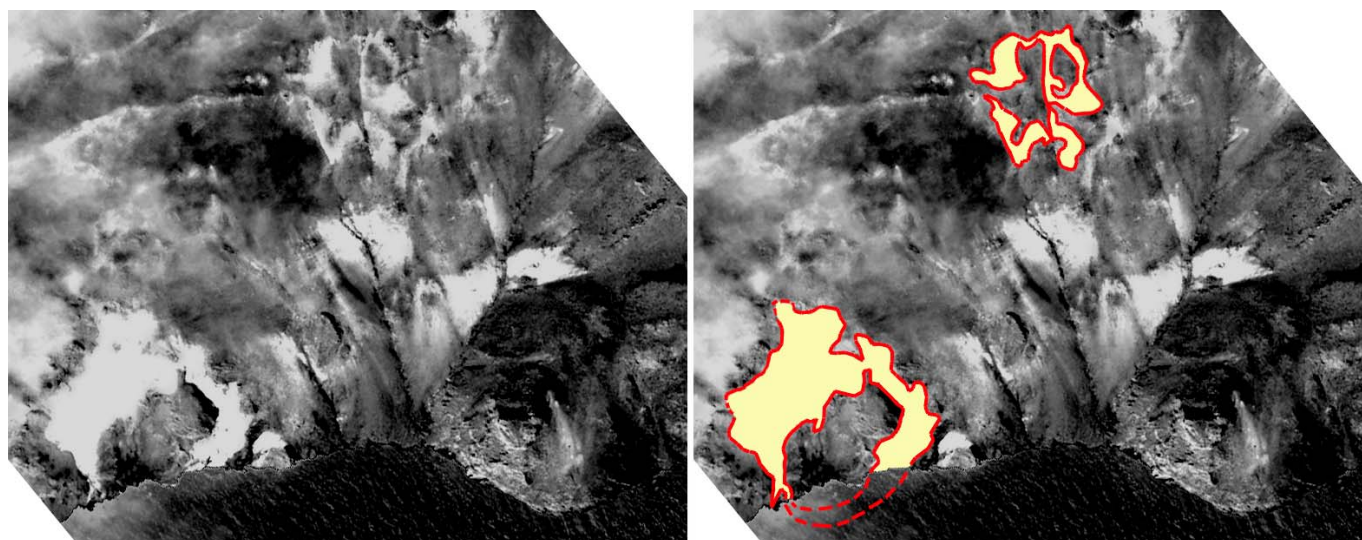
Рис. 97. Трубо- и конусообразные структуры карбоналитов. На фото видна сложная конфигурация карбоналитового тела в скале. Его кольцевая форма сначала не угадывается (гребень скалы закрывает белую карбонатную полосу, соединяющую два крупных выхода карбоналитов). Однако стоит изменить ракурс снимка и кольцевая форма обнаруживается.

Fig. 97. Tube- and cone-shaped structures of carbonaliths. Intricate configuration of the carbonalith body is observed in the rock. At a first glance, its ring shape is not guessed (the crest of the rock covers a white carbonate strip connecting two large outcrops of carbonaliths). However, should the view angle be changed, the ring-shaped structure is immediately detected.



**Рис. 98.** На космическом снимке с аппарата IKONOS-2 трубообразная форма видна отчетливо. Еще контрастнее эта структура дешифрируется на космическом снимке сверхвысокого разрешения со спутника QUICK BIRD-2 (следующий рисунок).

**Fig. 98.** Space image from IKONOS-2. The tube-shaped form is clearly observed. This structure is more clearly interpreted on super-high resolution space image QUICK BIRD-2 (the next Fig.).



**Рис. 99.** Космический снимок сверхвысокого разрешения с аппарата QUICK BIRD-2 (слева) и расшифровка двух трубообразных тел карбоналитов (справа). Красными линиями показаны контуры этих тел карбоналитов. Образ «трубы», разумеется, весьма условный. Природная картина многократно сложнее. По сравнению с оригиналом снимок сильно уменьшен.

**Fig. 99.** Space image of super-high resolution from QUICK BIRD-2 (left) and interpretation of the two tube-shaped carbonaliths bodies (right). Red lines delineate carbonaliths bodies. A «tube» form is certainly conventional. A natural picture is much more complex. The image is significantly reduced compared to original.

будинообразную форму, а размеры тел могут варьироваться от первых метров до нескольких десятков метров.

Подтверждение ранних предположений о присутствии множества мелких и сверхмелких интрузивных тел в карбонатном матриксе или мраморном меланже с преобладающими разноразмерными «обломками сиенитов потребовало применения еще одного методического приема, а именно, картирования в сверхкрупном масштабе с предварительной разметкой полностью обнаженных опорных участков колышками через 5 м [Скляров и др.,

морном меланже с преобладающими разноразмерными «обломками сиенитов потребовало применения еще одного методического приема, а именно, картирования в сверхкрупном масштабе с предварительной разметкой полностью обнаженных опорных участков колышками через 5 м [Скляров и др.,



Рис. 100. Склон в Тажеранской бухте. Видна сложная конфигурация карбоналитов (белое).

Fig. 100. The photograph of a slope of the Tazheran Bay showing complex configuration of carbonaliths (white).

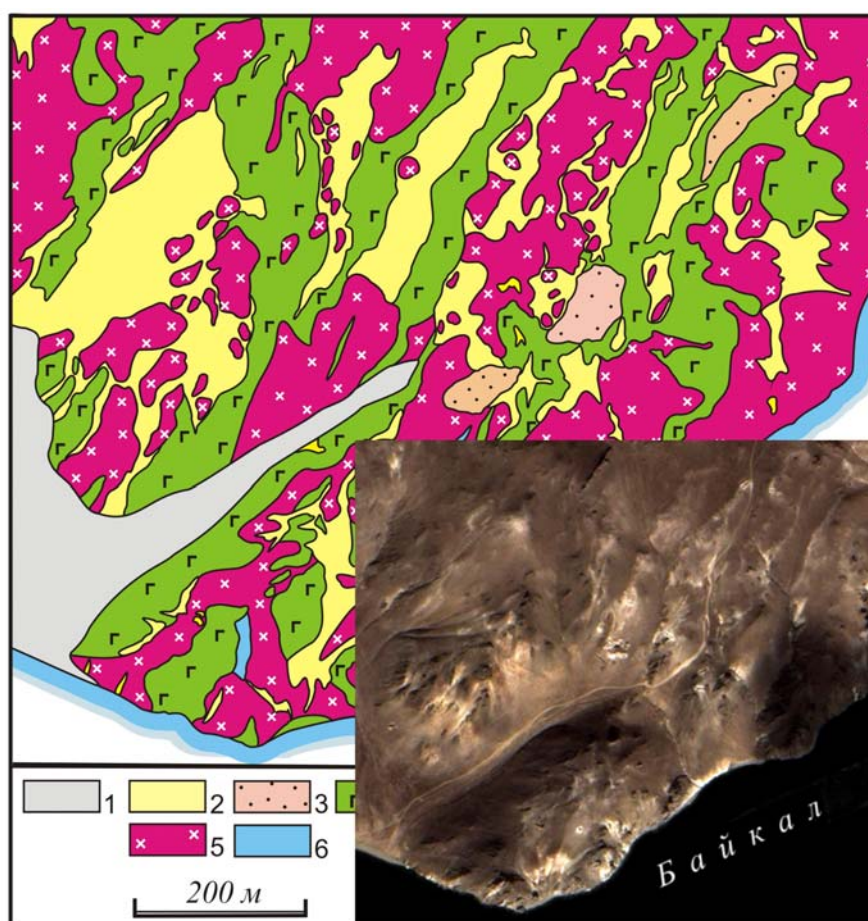
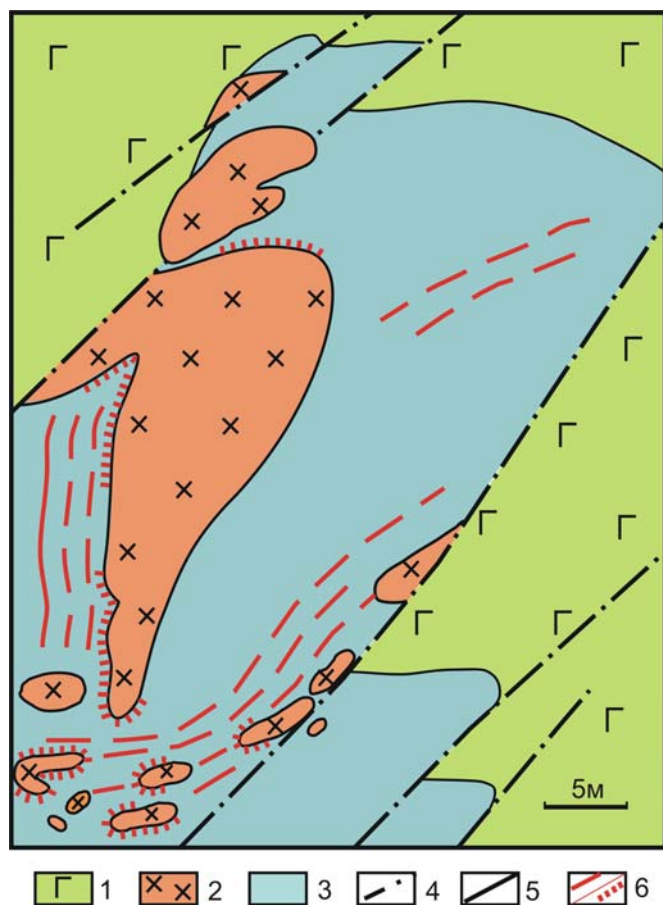


Рис. 101. Фрагмент рабочей геологической карты района Тажеранской бухты (масштаб 1:5000), на котором видны участки сиенит-мраморных смесей. На врезке космический снимок участка. Сиениты (нефелинсодержащие и безнефелиновые без разделения) показаны красным цветом, бруситовые мраморы – желтым, субщелочные – зеленым.

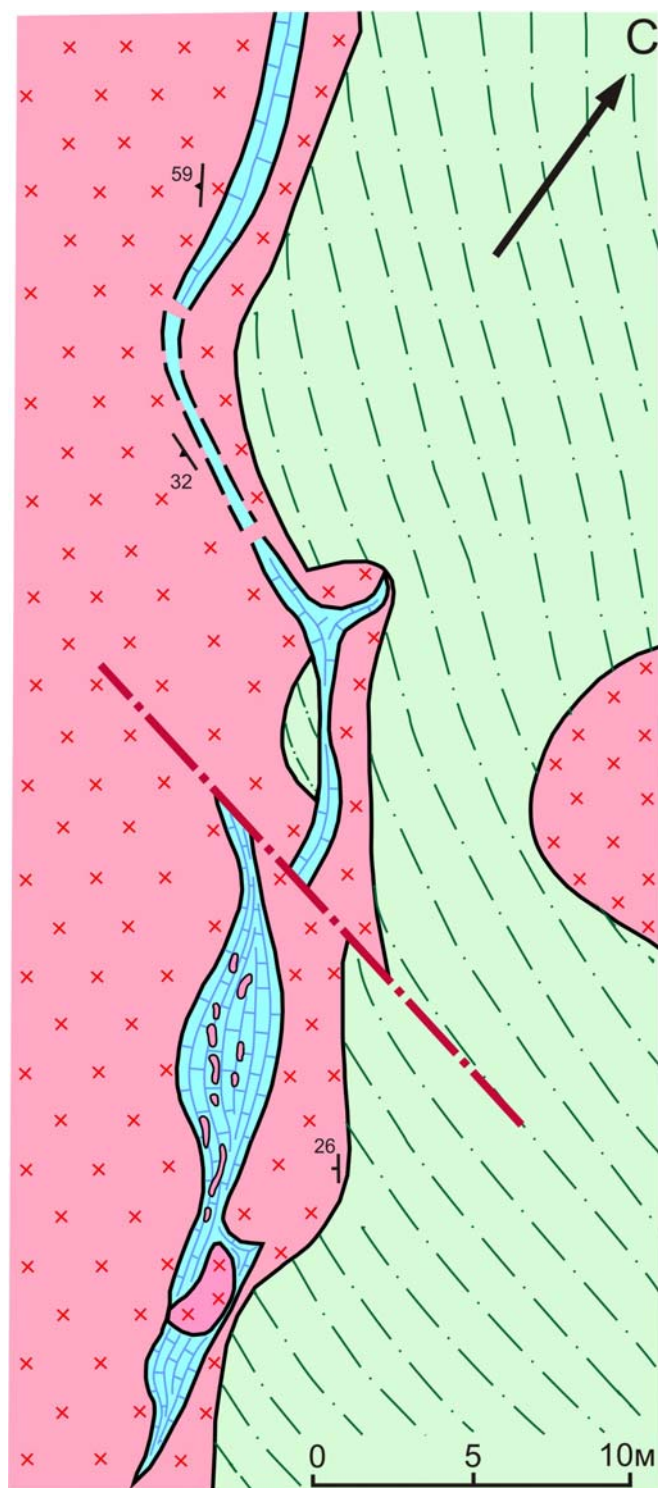
Fig. 101. Fragment of geological preliminary map of the Tazheran Bay area at a scale 1:5000 showing localities of syenite-marble mixtures. Space image is on the insert. Syenites (both nepheline-bearing and nepheline-free together) are shown in red, brucite marbles – in yellow, subalkaline rocks – in green.



**Рис. 102.** Детали взаимоотношений габброидов, сиенитов и бруситовых мраморов. 1 – габброиды; 2 – нефелиновые сиениты; 3 – бруситовые мраморы; 4 – вязкие срывы; 5 – геологические границы; 6 – жильные и контактовые кальцифиры.

**Fig. 102.** Details of relationships between gabbro, syenites and brucite marbles. 1 – gabbro; 2 – nepheline syenites; 3 – brucite marbles; 4 – viscous décollements; 5 – geological boundaries; 6 – vein and contact calciphyres.

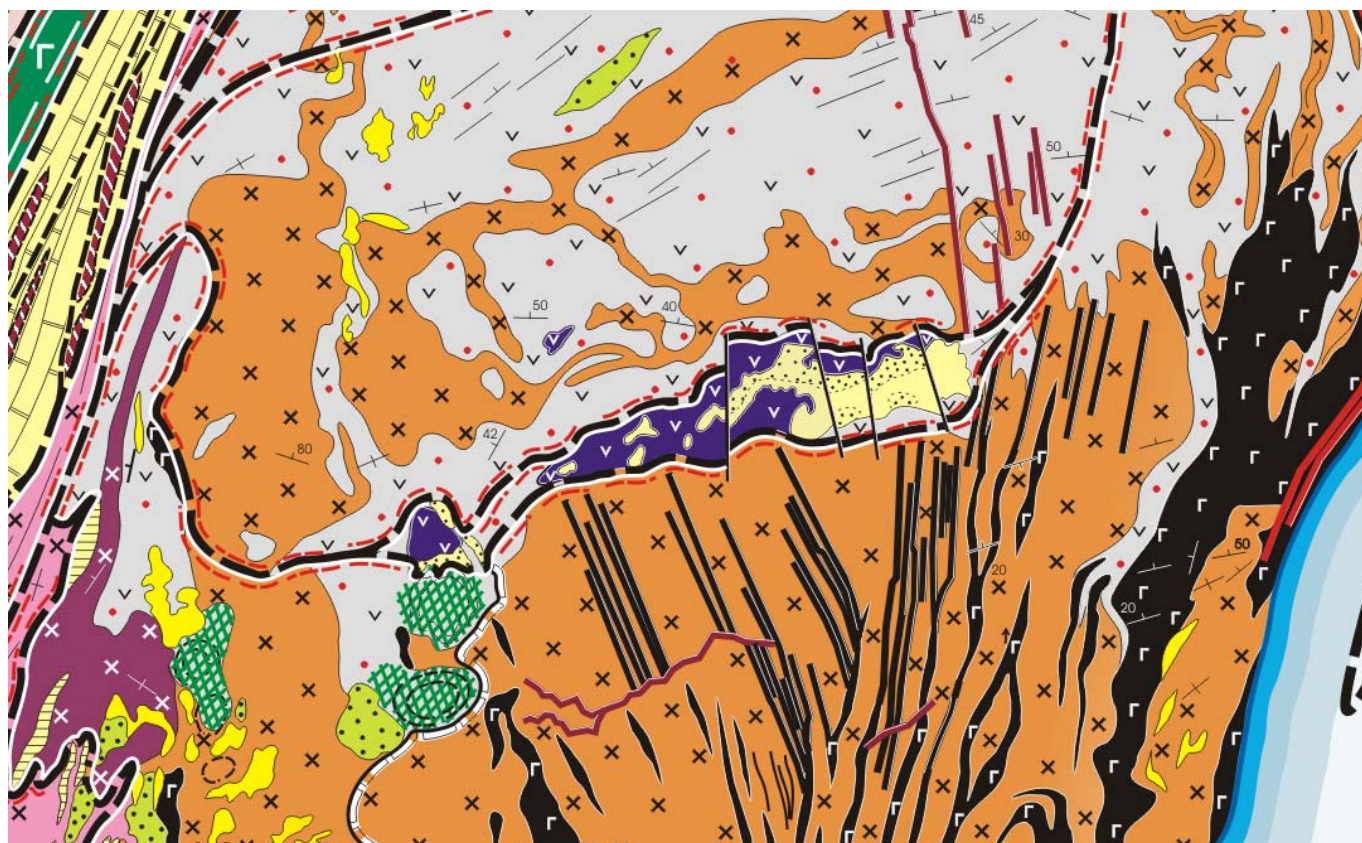
2009б]. Геологическая карта масштаба 1:500 представлена на рис. 102. Здесь нефелиновые сиениты слагают разноразмерные включения или «капли» в бруситовых мраморах. В сиенитах отчетливо проявлена трахитоидность и отсутствуют признаки огнейсования, как в центральных, так и в краевых частях тел. На контактах нередко присутствуют зоны кальцифиров и скарноидов (от 1 до 20 см). Бруситовые мраморы характеризуются изотропным строением без каких-либо признаков структуризации, связанной с пластическим течением. Структура в мраморах проявляется только при появлении серий маломощных жилков оливин-шпинелевых кальцифиров, приуроченных к зоне распространения сиенитовых тел. При этом сами бруситовые мраморы и на микро-, и на макроуровне остаются изотропными. Важность отсутствия деформаций в бруситовых мраморах будет обоснована ниже. Здесь отметим только признаки, фатально противоречащие как варианту будинированного тела сиенитов в мраморах, так и варианту обнажения на поверхно-



**Рис. 103.** Детальная карта участка с жилой кальцифиров в нефелиновых сиенитах у контакта с мафитовыми гранулитами. Нефелиновые сиениты покрашены розовым цветом, мафические гранулиты – зеленым, кальцифиры – синим.

**Fig. 103.** Detail map of the site with calciphyres vein in nepheline syenites near the contact with mafic granulites. Nepheline syenites are painted pink, mafic granulites – green, and calciphyres – dark blue.

сти апикальных тел сиенитов, возможно объединяющихся на глубине в более крупный массив. Что касается будинажа, то невозможно представить се-



**Рис. 104.** Фрагмент геологической карты массива Тажеран масштаба 1:10000, показывающий сдвиговую зону, выполненную кальцитовыми мраморами (желтое поле в центре карты) и пироксенитами (фиолетовое поле).

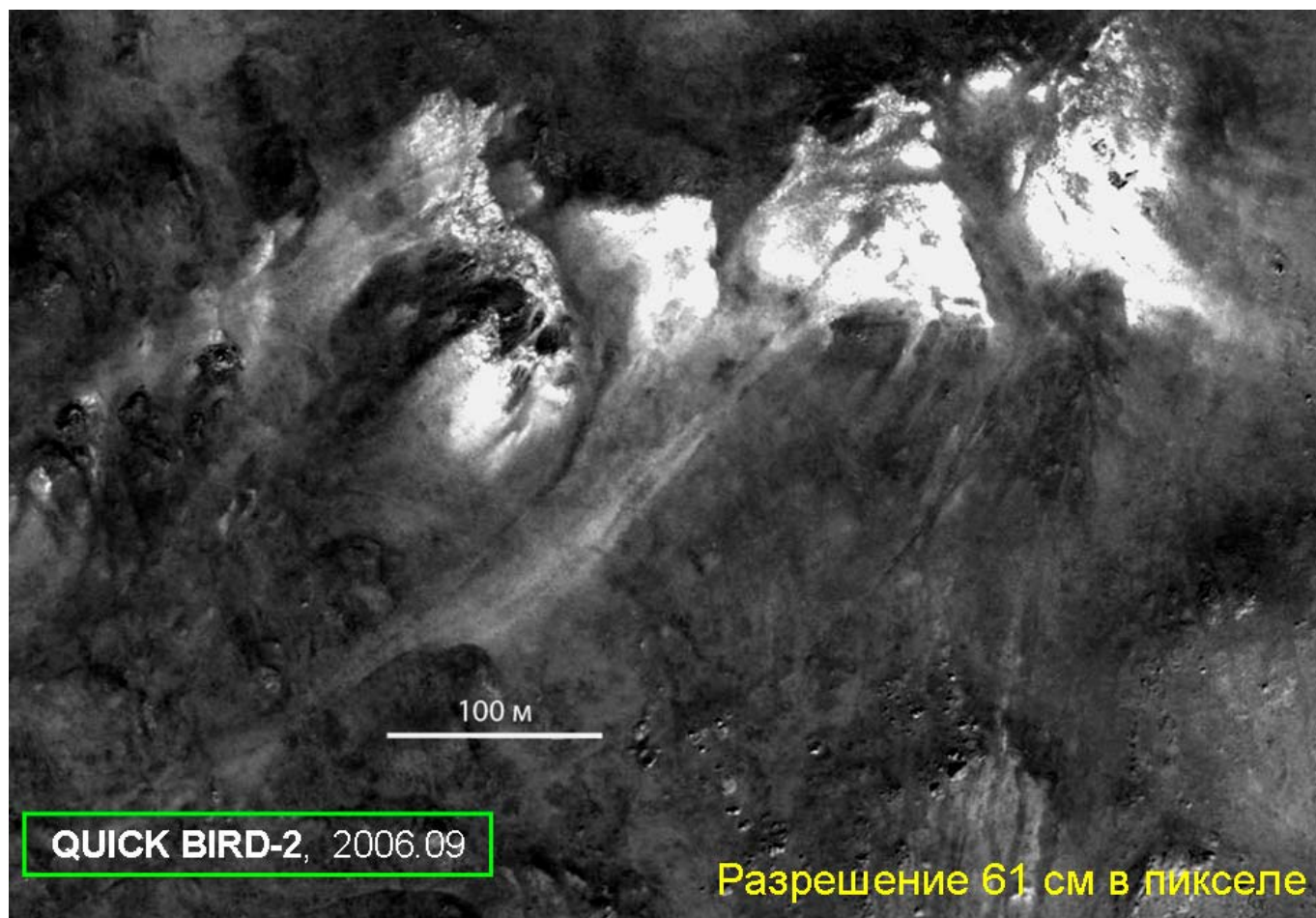
**Fig. 104.** Fragment of the geological map of the Tazheran massif at a scale of 1:10000 showing a shear zone composed of calcite marbles (the yellow field in the center) and pyroxenites (violet field).

бе этот процесс без пластичных и вязкопластичных деформаций в краевых частях будин. А именно таковые отсутствуют полностью. Зато хорошо видна кристаллизационная трахитоидность и нередкие приуроченные к зоне контакта высокотемпературные метасоматиты, которые иногда полностью окружают будины (рис. 102). Прорыванию же мраморов сиенитами явно противоречат очень малые размеры некоторых будин, а также нередко наблюдаемая бескорневая форма тел. Единственно возможное объяснение описанных взаимоотношений, по нашему мнению, заключается в синхронном внедрении карбонатного и силикатного расплавов. Более высокая температура кристаллизации сиенитового расплава привела к обособлению «капель» расплава в карбонатном матриксе. По существу, мы имеем дело с силикатно-карбонатным минглингом.

На еще одном детально закартированном участке (рис. 103) жила пироксен-гранатовых кальцифиров пересекает нефелиновые сиениты у контакта последних с мафитовыми гранулитами (ксенолит-вмещающих пород). Почти стопроцентная обнаженность участка не оставляет сомнений в том, что карбонатные породы не приурочены непосредственно к контакту. Еще одним интересным моментом

является то, что в раздуде жилы присутствуют многочисленные линзы нефелиновых сиенитов (от 5 до 30 см по длинной оси), которые, как и на предыдущем участке, не обнаруживают признаков пластических деформаций и также являются результатом силикатно-карбонатного минглинга. Мы предполагаем, что внедрение карбонатов произошло после начала кристаллизации сиенитов в краевой части массива, центральные части которого оставались в расплавленном или частично закристаллизованном виде. Их порции могли «впрыскиваться» в маловязкую карбонатную среду с образованием линзообразной формы выделений сиенитов.

Другой тип карбонатитов представлен в центральной части массива на горе Мраморной и ее восточном склоне (рис. 104). Этот участок хорошо обнажен (рис. 105) и великолепно дешифрируется по аэрофото- и космическим снимкам. Здесь в узкой субширотной полосе обнажаются кальцитовые мраморы в ассоциации с нефелин-пироксеновыми породами, природа которых до конца не ясна. А.А. Конев предполагал, что образование пироксенитов и нефелиновых пироксенитов было обусловлено воздействием сиенитовой магмы на роговики основного состава, расположенные севернее [Конев, Самойлов, 1974]. Карбонаты выполняли при этом роль



**Рис. 105.** Гребень горы Мраморной. Космический снимок со спутника QUICK BIRD-2. Коренные выходы карбоналитов и пироксенитов, заблокированных в сдвиговой зоне и нарушенных молодыми поперечными разломами. На склоне – сиениты. Многочисленные черно-белые точки на склоне – шаровидная (скорлуповатая) отдельность, присущая сиенитам.

**Fig. 105.** The ridge of the Mramornaya Mountain. Space image from QUICK BIRD-2. Bedrock outcrops of carbonaliths and pyroxenites blocked in the shear zone and disturbed by younger transverse faults. Syenites are on the slope. Numerous black-and-white dots on the slope result from spheroidal (shell-like) jointing peculiar of syenites.

поставщика кальция в основные породы. Однако большинство геологических фактов противоречат такой точке зрения, начиная с взаимного положения тел разного состава (см. рис. 104) и совершенно резкого, прямолинейного контакта между роговиками и пироксенитами, при отсутствии каких-либо переходных разностей между последними. Но наиболее интересным в этой ситуации является развитие зон мраморов, насыщенных обломками пироксенитов и скарноидов (показано крапом в поле карбонатов). Размеры таких включений (рис. 106) варьируются от первых сантиметров до десятка метров. Специальные замеры показали, что удлинение базитовых выделений в карбонатах всегда конформно контакту мраморов и пироксенитов, изменяясь в соответствии с изгибами контакта. Предполагаемая А.А. Коневым [Конев, Самойлов, 1974] поздняя протрузивная природа этих карбонатно-базитовых смесей противоречит вышеописанному. Хотя исследования по этому вопросу далеко не закончены, мы предполагаем совместное внедрение карбонатной

и нефелин-пироксеновой магм (с широкими вариациями соотношений) в сдвиговой зоне, являющейся одним из наиболее важных элементов массива.

Строго говоря, внедрение карбонатов в расплавленном состоянии нами лишь предполагается, и прямым доказательством этого могли бы быть расплавленные включения в минералах карбоналитов. Таковые пока не обнаружены, и существует большая вероятность, что и не будут найдены. Дело в том, что метасоматические реакции между силикатной и карбонатной матрицами продолжались и после кристаллизации расплавов по мере их остывания, стирая первично-магматические признаки. И единственное, о чем мы можем говорить совершенно однозначно на основании геологических признаков, это то, что вязкости сиенитового расплава и карбонатной матрицы должны были быть сопоставимы. Возможно, что в условиях высоких температур уже в вязкопластичном (не расплавленном) состоянии текучесть карбонатов мало отличалась от таковой силикатного расплава. Авторы пока не об-





**Рис. 106.** Фрагмент зоны мраморов (светло-серые), насыщенной обломками пироксенитов и скарноидов по ним (темные).

**Fig. 106.** Photograph of a segment of marble zone (light gray) saturated with fragments of pyroxenites and scarnoids after them (dark).

наружили данных по реологии карбонатов разного состава и будут благодарны за любую информацию об этом.

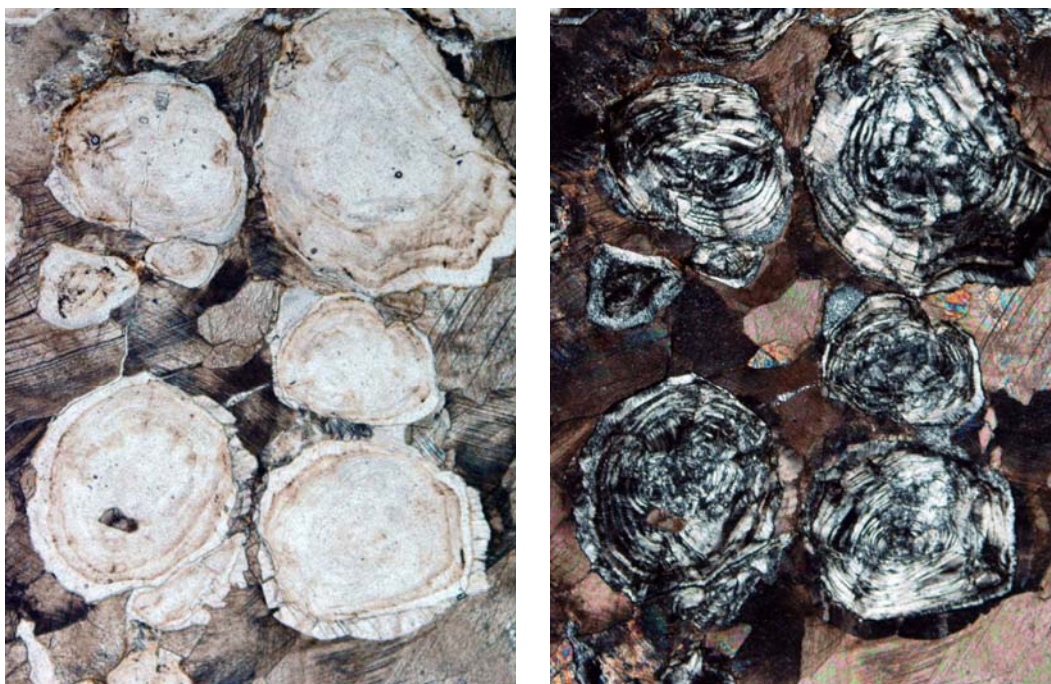
Но следует упомянуть еще один парадокс, которому пока нет однозначного объяснения. Как уже говорилось выше, преобладающая часть карбонатитов Тажеранского массива представлена бруситовыми мраморами, которые, по предположению А.А. Конева [Конов, Самойлов, 1974], образовались при гидратации периклазовых мраморов, сформированных в свою очередь при контактовом воздействии сиенитовой магмы на доломиты из ксенолитов и провесах кровли в массиве. Бруситовые мраморы имеют изотропную структуру без следов наложенных деформаций (рис. 107) и в крупных блоках, и в жилах, секущих сиениты (см. рис. 90, 91). Брусит – минерал мягкий и при воздействии более поздних деформаций (при предполагавшемся протрузивном внедрении) обязательно обнаруживал бы признаки деформирования, характерные для слюдястых минералов. Однако этого нет. Значит, протрузивное внедрение бруситовых мраморов не могло происходить после его образования. Если же в вязкопластичном состоянии внедрялись периклазовые мраморы, то большое различие в твердости и перекристаллизационной способности периклаза и кальцита должно было приводить к структуризации породы (типичная картина для метаморфических тектонитов), формированию «слоев», богатых периклазом. Однако этого тоже не наблюдается. К

тому же поиск реликтов периклаза (и нами и предшественниками) не увенчался успехом. Одно из возможных авторских предположений заключается в том, что брусит ( $Mg(OH)_2$ ) мог кристаллизоваться вместо периклаза ( $MgO$ ) из гидратированной карбонатной магмы. Однако надежные экспериментальные данные для подтверждения или опровержения такой возможности пока отсутствуют.

Пока на основании имеющихся данных мы предполагаем, что карбонатиты являются продуктами плавления осадочных карбонатов из нижних горизонтов земной коры, внедренными на более верхние уровни и формирующими широкий спектр причудливых соотношений с магматическими силикатными породами.

В последние годы в юго-западной части региона мы обнаружили несколько жильных тел карбонатных и карбонатно-силикатных пород, секущих интрузивные породы. В частности, в районе пади Широкой была изучена субвертикальная жила кальцифиров (рис. 108), внедрившаяся в метагаббро бирхинского комплекса. Такие находки сделаны в хорошо отпрепарированных береговых обнажениях, и можно предполагать, что на не полностью обнаженной поверхности Приольхонья таких жил много.

На первых этапах исследований нам казалось, что сдвиговые пластины четвертого типа (а соответственно и составляющие их комплексы метаморфитов) сосредоточены только в юго-западной части



**Рис. 107.** Микрофотографии бруситового мрамора при параллельных (слева) и скрещенных (справа) николях.

**Fig. 107.** Microphotograph of brucite marble under parallel (left) and crossed (right) Nicols.

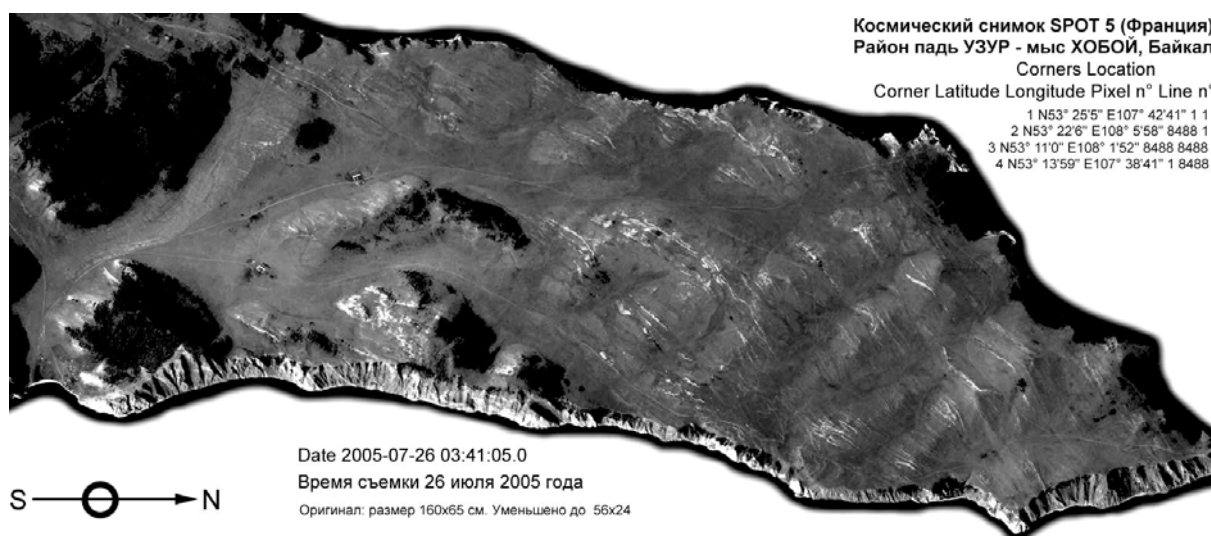
---



**Рис. 108.** Жила кальцифиров (светло-серое) в метагаббро бирхинского комплекса (темно-серое).

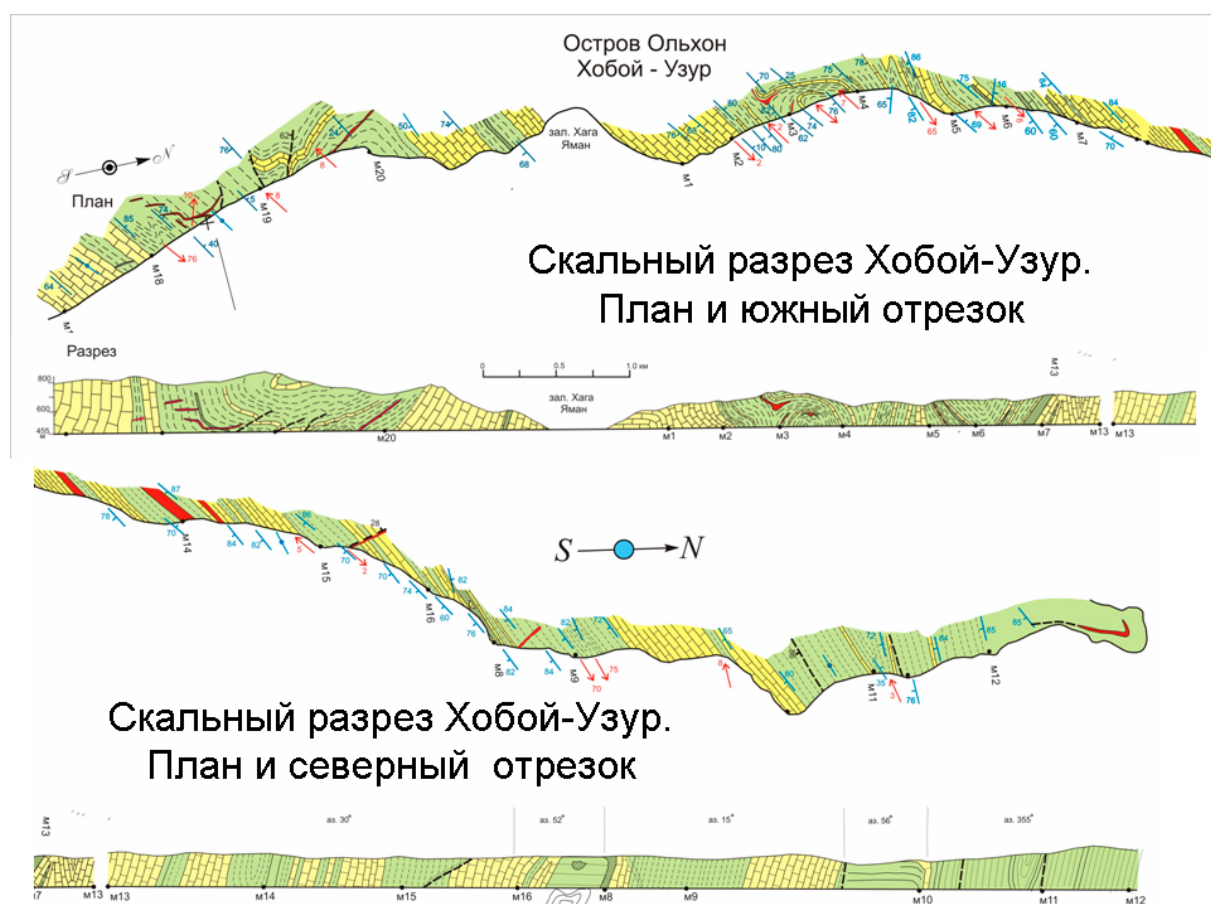
**Fig. 108.** Vein of calciphyres (light gray) in metagabbro of the Birkhin complex (dark gray).

---



**Рис. 109.** Космический снимок района Узур-Хобой, остров Ольхон. Спутник SPOT-5. Съемка 2005 г. Высота съемки 822 км. Сильно уменьшено. Полностью обнаженный в скалах Байкала и пролива Малое море великолепный разрез крупной сдвиговой пластины.

**Fig. 109.** Space image of the Uzur-Khoboi area in the Olkhon Island taken from SPOT-5 in 2005. Altimetric point 822 km; significantly reduced. Baikal cliffs completely expose excellent section of large shear slab.



**Рис. 110.** План и разрез интервала Хобой-Узур на острове Ольхон (составили А.Б. Котов, А.В. Лавренчук, А.М. Мазукабзов, Е.В. Скляр и В.С. Федоровский).

**Fig. 110.** Plan and cross section of the Khoboi-Uzur interval in the Olkhon Island (compiled by A.B. Kotov, A.V. Lavrenchuk, A.M. Mazukabazov, E.V. Sklyarov, and V.S. Fedorovsky).

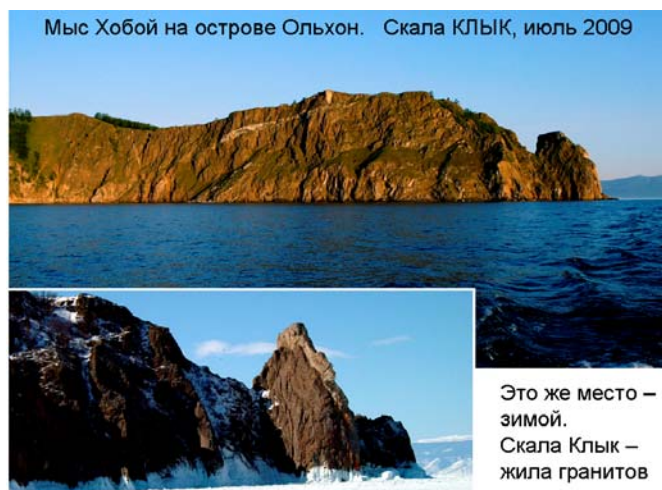


Рис. 111. Северо-восточная часть острова Ольхон, мыс Хобой.

Fig. 111. Northeastern part of the Olkhon Island, Khoboi Cape.



Рис. 112. Пакет тесно сжатых крутых складок в районе мыса Шунта. Фото со льда Байкала.

Fig. 112. The package of compressed steep folds in Shunte Cape area. Photographed from ice cover of Lake Baikal.

региона, в пределах зоны Крестовая–Бирхин–Тажеран. Синтез регионального материала показал, однако, что это не так. Большие площади подобные образования занимают и на острове Ольхон.

В северной части острова – в скалах Байкала и пролива Малое Море – вскрыт разрез метаморфитов амфиболитовой фации и эти породы по многим признакам оказались сходными с породами, составляющими Ангинский комплекс. Лишь в крайней северной части острова появляются иные по составу гранулиты другой сдвиговой пластины, отделенные от метаморфитов амфиболитовой фации швом бластомилонитов. Разрез Ангинского комплекса обнажен практически непрерывно на отрезке протяженностью 25 км – от мыса Хобой до мыса Ижигей (рис. 109).

«Взять» этот разрез можно только со льда Байкала. Это было сделано в рамках трех зимних экспедиций (рис. 110). Хотя в результате этой работы получен обширный новый материал, геология северной части острова до сих пор расшифрована лишь в общих чертах. Нет сомнений, что нас ожидают здесь находки, которые заставят скорректировать представления, возникшие после первых маршрутов. Но одно ясно уже сейчас – это лакомый кусок для профессиональной работы. Нужно отметить прежде всего, что не всегда удается уверенно коррелировать то, что можно наблюдать в абсолютно обнаженном разрезе в скалах Байкала и в ситуации, картируемой на поверхности плато, где степень обнаженности хотя и велика, но совершенно несравнима с той, которую можно видеть в скалах побережья (рис. 111, 112). Важнейшее значение при таких корреляциях имеет использование дистанционного аэрокосмического материала, но и он нередко оказывается недостаточным – настолько сложны складчатые структуры (рис. 113).

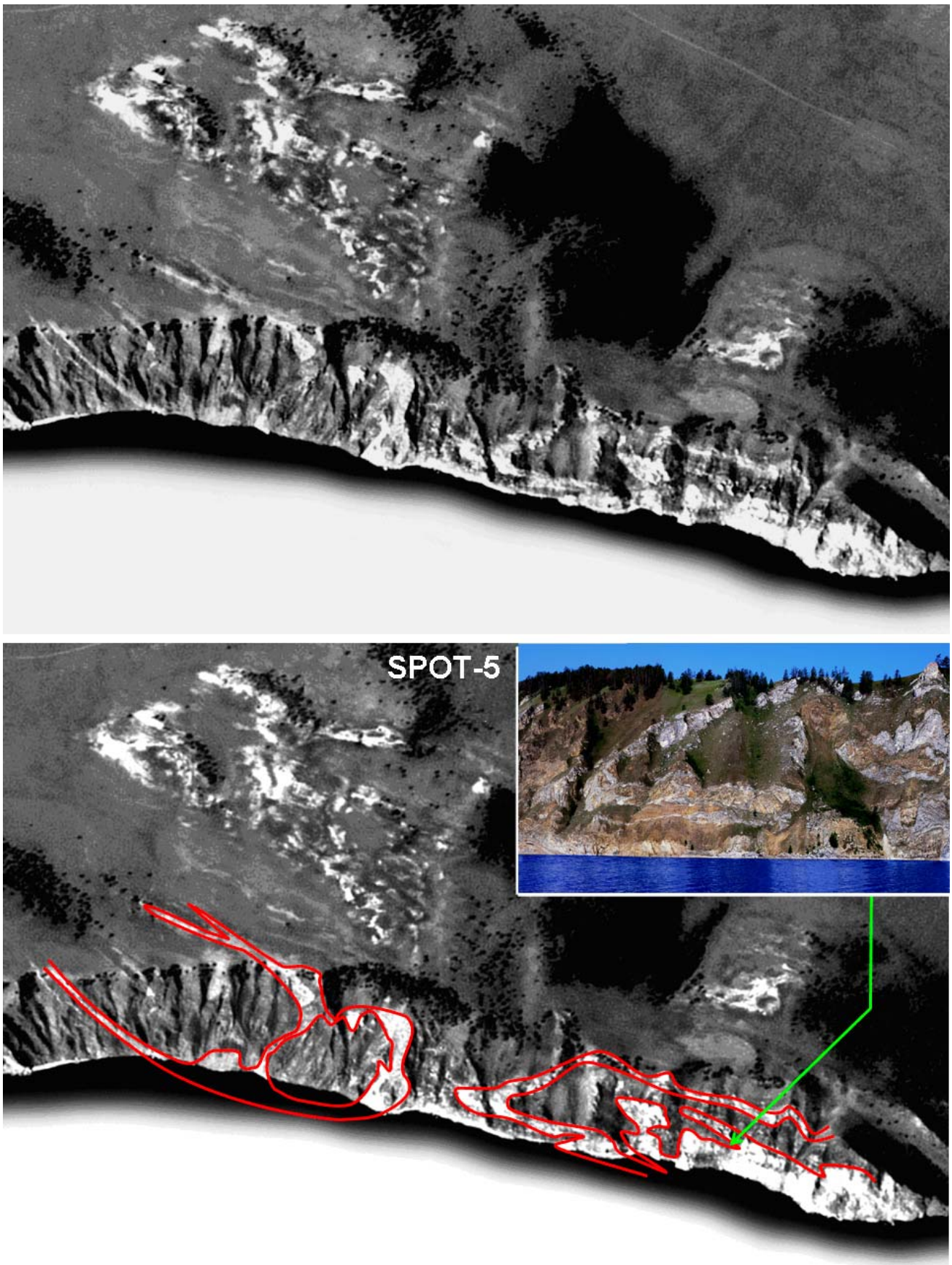
Подобные снимки позволяют рассмотреть струк-

туру метаморфической толщи в отдельных скалах. При этом «мелочи» не видны, а основные структуры становятся более контрастными.

Почти отвесная скала и пакет субвертикальных складок с горизонтальной ундуляцией их осевых поверхностей – такая геометрия создает в скале хаотический структурный рисунок (рис. 113, фото на врезке), расшифровать который не всегда просто. Космический снимок высокого разрешения позволяет с высоты 822 км легко обнаружить генеральную структуру (красные линии). На плато, ограниченном скалами, можно видеть проекцию соседних складок этого пакета на почти горизонтальную поверхность (белое – мраморы).

Замечательная особенность этого разреза – присутствие здесь большого числа комбинированных даек. Метаморфическая толща представлена сложным тектонизированным переслаиванием кристаллических сланцев и мраморов с резко подчиненным количеством гнейсов. Комбинированные дайки распространены на отрезке около 7 км. Севернее и южнее встречаются дайки только гранитного состава. Последние обычно пологопадающие или субгоризонтальные. Для них характерно секущее положение относительно гнейсовидности вмещающих толщ. Комбинированные дайки, напротив, являются конформными по отношению к метаморфическим структурам. Граниты слагают узкие зоны в контактовых частях даек и маломощные прожилки неправильной формы в центральных частях даек. Нередко наблюдается подушечная текстура базитов на контакте с гранитами (рис. 114).

Объемное соотношение базитов и гранитов в разных телах изменяется от 30:1 (рис. 115) до 1:1. Фрагменты базитов в гранитном матриксе в большинстве случаев имеют удлиненную форму и огнейсованы, однако встречаются и угловатые,



**Рис. 113.** Байкальская часть побережья острова Ольхон между мысами Хобой и Шунтэ. Космический снимок со спутника SPOT-5 (вверху), разрешение 2.5 м/пиксель, и его частичная интерпретация (внизу).

**Fig. 113.** Baikal segment of the Olkhon Island coast between Khoboi and Shunte capes. Space image from SPOT-5, resolution 2.5 m/pix.



**Рис. 114.** Подушечная структура базитов на контакте с гранитами.

**Fig. 114.** Pillow texture of mafic rocks on the contact with granites.

---



**Рис. 115.** Комбинированная дайка с высокой долей базитов (net-veined complexes).

**Fig. 115.** Combined dyke with high portion of mafic rocks (net-veined complexes).

---



**Рис. 116.** Синметаморфическая минглинг-дайка, внедренная в метаморфическую матрицу. Недеформированная комбинированная дайка.

**Fig. 116.** Sin-metamorphic magma–mingling embedded in metamorphic matrix. Non-disturbed combined dyke.

неправильной формы обломки (рис. 116).

Во всех изученных примерах геологические соотношения указывают на более позднее застывание гранитов, что и следовало ожидать из различия в температурах кристаллизации базитового и гранитного расплавов. Степень метаморфической переработки гранитов и базитов в дайках существенно варьируется. Наряду с массивными гранитами практически без следов поздних деформаций нередко наблюдаются все переходы к типичным метаморфическим гнейсам без реликтов первично-магматических структур и текстур. При этом в секущих дайках направление гнейсовидности конформно простиранию даек (рис. 117, 118). Базиты, темноцветные минералы которых представлены клинопироксеном, амфиболом и биотитом, часто характеризуются массивной текстурой, однако нередко и полосчатые разновидности, макроскопически и микроскопически не отличимые от кристаллических сланцев вмещающей дайки рамы.

Можно построить практически полную последовательность от даек, в которых ни базиты, ни граниты не претерпели пластических деформаций (см. рис. 116), до тел, в которых оба типа магматических пород превращены в метаморфические породы. Промежуточные варианты в основном представлены комбинированными дайками, базиты в которых

имеют массивную или слабогнейсовидную текстуру, а кислые породы краевых частей даек представлены гранитогнейсами и гнейсами. Важнейшим признаком, позволяющим связывать внедрение комбинированных даек с заключительными стадиями коллизионного тектогенеза, является вовлечение даек в процессы складкообразования. Форма и положение даек свидетельствуют об их синскладчатом характере.

Наряду с комбинированными дайками встречаются более мощные тела (до 300–400 м) штокообразной формы, сложенные контрастной магматической смесью, – угловатые или будинообразные тела базитов в гранитном матриксе (см. рис. 118). Доля гранитов не превышает 30 % общего объема. Эти тела представляют собой магматические камеры, образованные при одновременном внедрении кислых и основных магм.

Базиты в комбинированных дайках и штоках этой группы отвечают по химическому составу низкомагнетиальным щелочным базальтам.

Сдвиговый тектогенез – важнейший фактор реализации минглинга. Все примеры синметаморфического магма-минглинга на острове Ольхон связаны, в частности, с проявлениями сдвиговой тектоники. В обстановке общего сжатия, свойственного коллизии, неровности поверхностей сдвигов приводят к



**Рис. 117.** Гранит-базитовая минглинг-дайка, внедренная в метаморфический матрикс.

**Fig. 117.** Granite–basic mingling-dyke embedded in metamorphic matrix.

---



**Рис. 118.** Магма-минглинг в скальных обнажениях острова Ольхон.

**Fig. 118.** Magma-mingling in cliffs of the Olkhon Island.

---



появлению многочисленных локальных зон растяжения, а сами сдвиговые пластины дезинтегрируются сериями закономерно расположенных трещин отрыва. Можно думать, что этих условий достаточно для обеспечения дренирования мантийных магм и их продвижения вверх по мощной, но гравитационно неустойчивой коллизионной коре.

Материал по геологии острова Ольхон и Приольхонья свидетельствует: как только сдвиговый тектогенез становится активным участником коллизионного сценария, коллизионная система оказывается обреченной на неизбежный крах, коллапс. Один из самых ранних индикаторов этого процесса – синметаморфический магматический минглинг. Он свидетельствует: еще идет общее сжатие, еще идет метаморфизм, еще реализуется тектоническое течение и идут складчатые процессы, однако именно в это время уже возникают локальные зоны растяжения. В эту охваченную метаморфизмом и «пластифицированную» геологическую среду, в которой происходит выплавка гранита, впрыскиваются мантийные магмы. Их взаимодействие и приводит к возникновению структур магматического минглинга. Коллапс коллизионных систем реализуется в режиме растяжения и магматический минглинг – прямое свидетельство этого [Скляров, Федоровский, 2006].

#### 2.2.4. Сдвиговые пластины, сложенные породами комплекса Орсо (амфиболитовая фацция метаморфизма)

Этот тип структур представлен одной, но крупной сдвиговой пластиной Орсо. Она образована частым чередованием двуслюдяных и гранат-двуслюдяных микрогнейсов (лептинитов) и амфиболитов (рис. 119, 120).

Возраст цирконов (они имеют магматическую природу) равен 792–844 млн лет [Гладкочуб и др., 2009]. Возраст метаморфизма не определен. Однако комплекс Орсо располагается в ореоле метаморфизма, охватившем и его, и соседние комплексы. Датировки для последних имеются (460–470 млн лет). Это позволяет осторожно предположить, что и метаморфизм комплекса Орсо имеет такой же возраст.

Самой большой ширины в плане пластина Орсо достигает вблизи побережья Байкала, где ее разрез полностью вскрыт в береговых скалах. С северо-запада пластина Орсо ограничена офиолитовой сутурой протяженностью около 30 км. Она отделяет комплекс Орсо от гранитогнейсового комплекса Шибарта, составляющего Центральную купольную зону региона. С юго-востока пластина Орсо контактирует с широкой полосой мраморов Ангинского комплекса, которые нередко составляют выжатые покровы, перекрывающие пластину Орсо. Ее ширина постепенно сужается в юго-западном направлении и постепенно сходится на нет, соединяясь с Главной сдвиговой зоной региона в районе пос. Еланцы.

Чрезвычайно информативна в структурном плане площадь, примыкающая к юго-восточной границе пластины Орсо. В береговых скалах и на примыкающих к ним склонах в условиях абсолютной об-

наженности вскрыты многочисленные крупные складки с субвертикальными шарнирами, возникшие в процессе синметаморфической сдвиговой деформации (рис. 122, 123). Фрагменты таких же структур мы находим и в более северной части разреза Орсо, но там они практически не картируются – настолько велика степень расплющивания толщ в режиме сдвига (см. рис. 121). Пример разреза Орсо – хорошее предостережение тем, кто пытается иногда представить легко картируемые линейные структуры региона как простые компоненты некоего стратиграфического разреза. При внимательном изучении оказывается, что «простота» здесь кажущаяся, а на самом деле строение таких пакетов отличается суперсложной внутренней структурой.

### 3. НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ КАРТ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СОДЕРЖАНИЯ

Готовя эту статью, мы не ставили цель дать подробное и систематическое описание геологии и тектоники Ольхонского полигона. Мы намеренно избегали здесь и проблем синтеза всего накопленного геологического материала. Такие решения пока многовариантны. Было интересно на конкретном примере продемонстрировать потенциал использования аэрокосмических данных при геологических исследованиях. Этот опыт показал, что при определенных условиях (хорошая обнаженность территории, достаточно высокая степень дешифрируемости дистанционного материала) возникает возможность резко повысить класс карт геологического содержания, и это будет новое поколение картографических документов, информационный потенциал которых несравним с тем, что мы имели прежде. Если это удалось сделать – задача, которую ставили перед собой авторы, выполнена.

Следствием такого подхода и стала идея создания на площадь Ольхонского геодинамического полигона пакета карт геологического содержания. Мы намечаем составление и издание 14 карт. Это минимальная цифра. Если логика работы подскажет необходимость составления дополнительных картографических документов, они будут сделаны. Содержание планируемого для издания пакета карт схематически показано на рис. 124.

Составление и издание всего пакета карт готовится одновременно в печатном и цифровом виде. Цифровые карты (на DVD-дисках) было бы целесообразно сопровождать и публикацией всего дистанционного материала, которым мы располагаем по Ольхонскому полигону. Это будет возможно в том случае, если удастся преодолеть режимные и лицензионные ограничения по использованию космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения и аэрофотоснимков крупных масштабов. Общий объем дистанционного материала составляет сегодня примерно 30 гигабайт. Издание всего пакета карт геологического содержания на площадь Ольхонского геодинамического полигона предполагается выполнить последовательно в течение 2010–2013 гг. В максимальном варианте, как

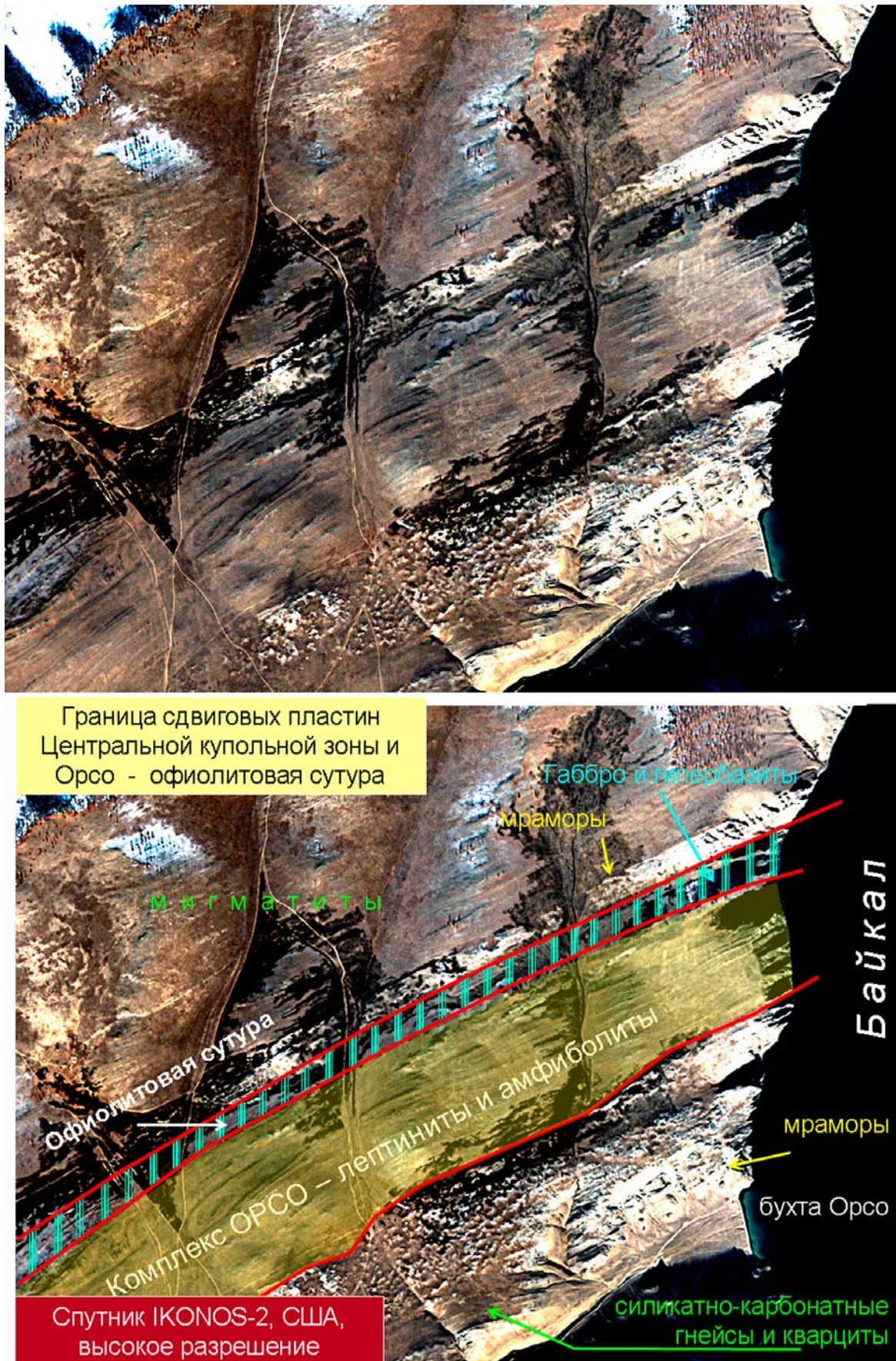


Рис. 119. Разрез зоны Орсо в одноименной бухте. Великолепная обнаженность и высокий класс дешифрируемости дистанционных данных.

Fig. 119. The Orso Bay area. Excellent exposures and interpretation ability of remote sensing data is of a high degree.



Рис. 120. Детали строения разреза (рис. 119) на снимках сверхвысокого разрешения (уменьшено).

Fig. 120. Details of this section structure may be observed on images of super-high resolution (reduced).

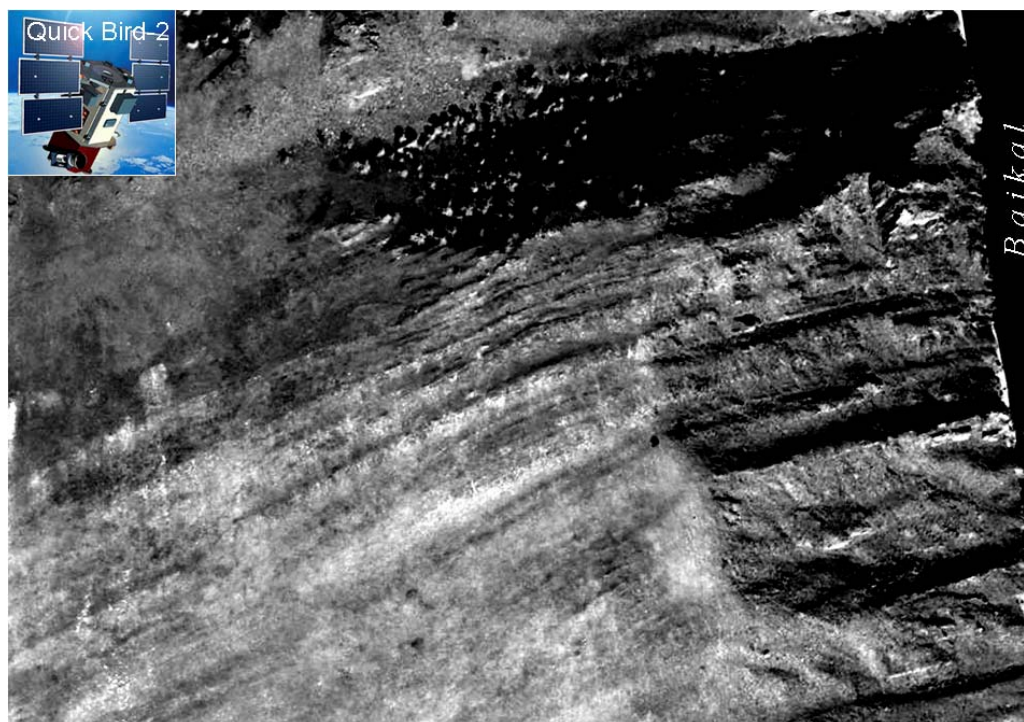


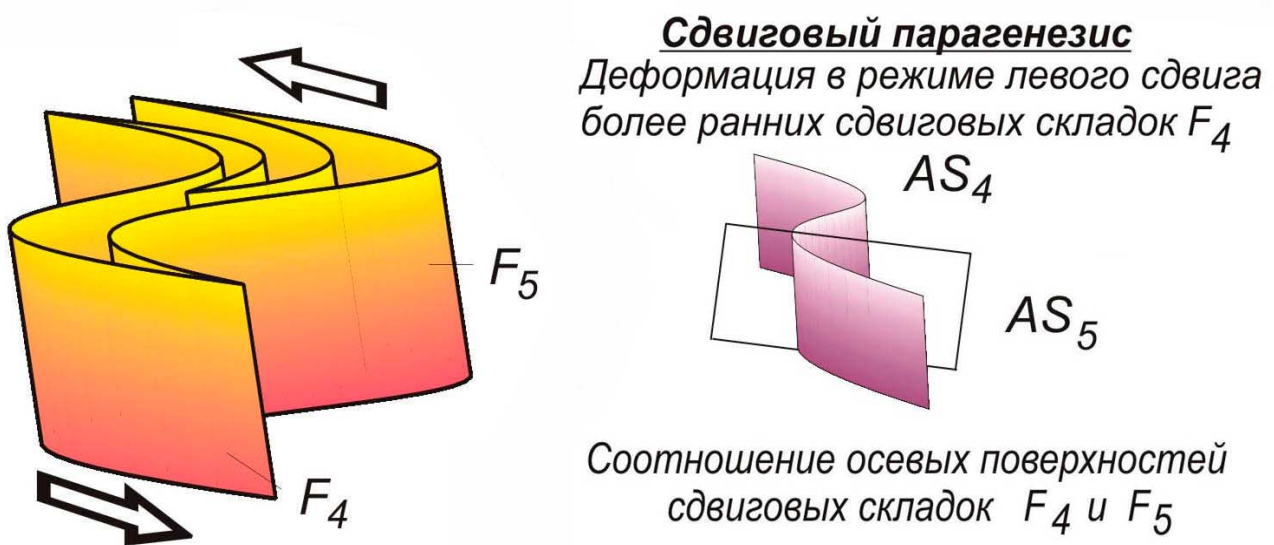
Рис. 121. Фрагмент предыдущего снимка без уменьшения. Снимки со спутника QUICK BIRD-2 позволяют видеть строение разреза в масштабе 1:2000. Здесь – зона сильного расплющивания, локализованная вдоль офиолитовой сутуры.

Fig. 121. Fragment of the previous image without reduction. Images from QUICK BIRD-2 allow observing of section structure at a scale of 1:2000. Here is the zone of flattening located along ophiolitic suture.



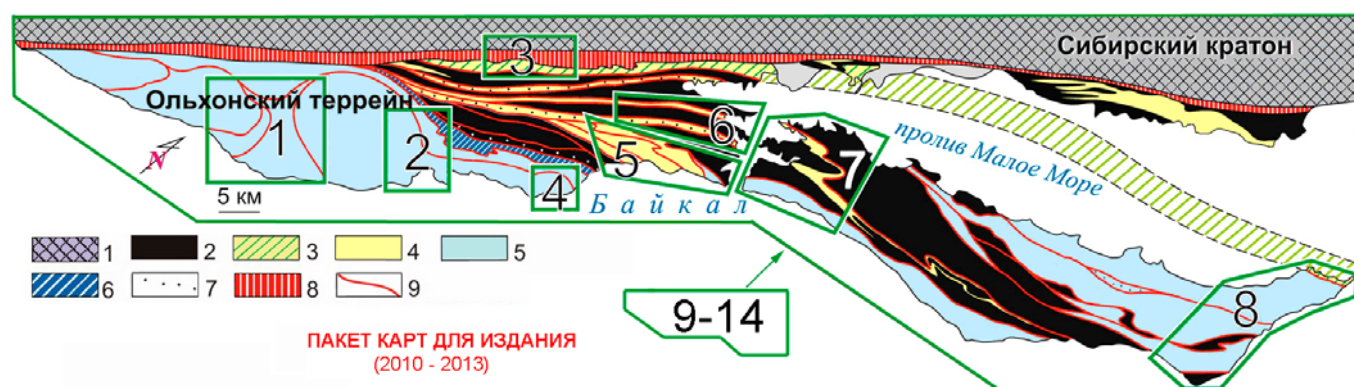
**Рис. 122.** Южная часть разреза Орсо с многочисленными замками сдвиговых складок с субвертикальными шарнирами. Они вскрыты в скалах левого борта бухты Орсо. Вид замков с суши (слева сверху), с борта вертолета (справа сверху) и со стороны Байкала (внизу, снято с борта корабля).

**Fig. 122.** Numerous closures of shear folds with sub-vertical hinges are preserved in the southern part of the Orso section. They are exposed in cliffs of the left side of the Orso Bay. View of closures from land (top, left), from a helicopter (top, right), and from Baikal Lake (photo taken from a ship).



**Рис. 123.** Графическая интерпретация складок в бухте Орсо.

**Fig. 123.** Graphical interpretation of folds in the Orso Bay.



**Рис. 124.** Планируемый для издания пакет карт геологического содержания на площадь Ольхонского полигона (основа – тектоническая схема). Цифры 1–8 на схеме – карты крупного масштаба (участки детальных исследований). Цифры 9–14 – региональные карты среднего масштаба на всю площадь полигона. 1 – геологическая карта района Крестовая – Широкая, масштаб 1:12000; 2 – геологическая карта района Анга – Бегул, масштаб 1:12000; 3 – геологическая карта района Тонта – Улан-Харгана, масштаб 1:12000; 4 – геологическая карта района Тажеран, масштаб 1:10000 (издана в 2009 г.); 5 – геологическая карта района Мраморное плато – Змеиная падь, масштаб 1:12000; 6 – геологическая карта района Харикта – Крест, масштаб 1:12000; 7 – геологическая карта района Ольхон (юго-запад), масштаб 1:12000; 8 – геологическая карта района Ольхон (Хобой), масштаб 1:10000; 9 – геологическая карта Ольхонского региона, масштаб 1:100000; 10 – тектоническая карта Ольхонского региона, масштаб 1:100000; 11 – геодинамическая карта Ольхонского региона, масштаб 1:100000; 12 – карта метаморфизма Ольхонского региона, масштаб 1:100000; 13 – карта неотектоники Ольхонского региона, масштаб 1:100000; 14 – геоморфологическая карта Ольхонского региона, масштаб 1:100000. Легенда к схеме: 1 – Сибирский кратон. Палеопротерозойские метаморфиты (эпидот-амфиболитовая фация) и граниты; 2–7 – раннепалеозойский Ольхонский терреин: 2 – сдвиговые пластины, образованные гранитогнейсовым комплексом Шебарта, 3 – Чернорудская пластина. Ольхонский комплекс пестрого состава с участием базитов толеитовой серии (гранулитовая фация метаморфизма), 4 – сдвиговые пластины, образованные Ольхонским комплексом пестрого состава с участием базитов толеитовой серии (амфиболитовая фация метаморфизма), 5 – сдвиговые пластины, образованные Ангинским комплексом пестрого состава с участием базитов субщелочной серии (эпидот-амфиболитовая и амфиболитовая фации метаморфизма), 6 – сдвиговая пластина, образованная комплексом Орсо. Лептиниты и амфиболиты, 7 – офиолитовые сuture; 8 – blastomylonites Главного коллизионного шва; 9 – blastomylonitic suture, разделяющие сдвиговые пластины коллизионного коллажа.

**Fig. 124.** A package of geological maps in the territory of Olkhon geodynamic proving ground (tectonic scheme is a base). Numbers 1–8 on the scheme refer to large-scale maps (sites of detail studies). Numbers 9–14 are regional meso-scale maps on the whole area of the test site. 1 – Geological map of the Krestovaya – Shirokaya area, scale 1:12000, 2 – Geological map of the Anga – Begul area, scale 1:12000, 3 – Geological map of the Tonta – Ulan-Khargana area, scale 1:12000, 4 – Geological map of the Tazheran area, scale 1:10000 (published in 2009), 5 – Geological map of the Marble plateau – Zmeinaya Pad' area, scale 1:12000, 6 – Geological map of the Kharikta – Krest area, scale 1:12000, 7 – Geological map of the Olkhon (southwest) area, scale 1:12000, 8 – Geological map of the Olkhon (Khoboi) area, scale 1:10000, 9 – Geological map of the Olkhon region, scale 1:100000, 10 – Tectonic map of the Olkhon region, scale 1:100000, 11 – Geodynamic map of the Olkhon region, scale 1:100000, 12 – Map of metamorphism of the Olkhon region, scale 1:100000, 13 – Neotectonic map of the Olkhon region, scale 1:100000, 14 – Geomorphologic map of the Olkhon region, scale 1:100000. Legend to the scheme: 1 – Siberian craton. Paleoproterozoic metamorphic rocks (epidote-amphibolite facies) and granites; 2–7 – Early Paleozoic Olkhon terrane: (2) shear slices composed of the granite-gneiss Shebart complex, (3) The Chernorud shear slice. The Olkhon complex of diverse composition with participation of mafic rocks of tholeiitic series (granulite metamorphic facies), (4) shear slices composed of the Olkhon complex of diverse composition with participation of mafic rocks of tholeiitic series (amphibolite metamorphic facies), (5) shear slices composed of the Anga complex of diverse composition with participation of subalkaline mafic rocks (epidote-amphibolite and amphibolite metamorphic facies), (6) shear slice composed of the Orso complex. Leptinites and amphibolites, (7) ophiolite sutures; 8 – Blastomylonites of the Main collisional suture; 9 – Blastomylonitic sutures separating shear slabs of collisional collage.

упоминалось, это 14 карт и 7 DVD-дисков.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ольхонский регион Западного Прибайкалья – уникальный памятник природы, составная часть Прибайкальского национального парка России. Это и часть современной гигантской континентальной рифтовой системы, геологический музей под открытым небом. Но это еще не все. Ольхонский регион – ключевой объект в системе структур Восточной Сибири и геодинамический полигон для изучения систем коллизии и коллапса.

Компактная площадь Ольхонского региона – хороший объект для углубленных геологических исследований. Первые геологические карты на эту

территорию появились полвека назад. Они не только были мелкомасштабными, но и составлялись без плотного использования дистанционных данных. Несмотря на это, ранние картографические материалы выполнили тогда свою роль – в первом приближении стал ясен общий структурный рисунок территории, были выделены различные метаморфические комплексы и установлено их распределение на площади региона. По традиции возраст этих пород определялся тогда как докембрийский. Вместе с тем, пестрый состав метаморфитов, высокая степень обнаженности и в плане, и в разрезе, сложнейший характер структуры, вскрытой в скалах побережья Байкала, – все это диктовало необходимость проведения более детальных геологических исследований и, в первую очередь, составления новых, более точных геологической и тектонической



Островок Едор, пролив Малое море



Это не ядерный взрыв. Это дождь. Бухта Орсо

к карт территории региона. За последние 25 лет был накоплен обширный новый геологический материал, который сделал такую задачу реальной. Перечислим некоторые основные результаты:

- \* Установлен раннепалеозойский возраст седиментогенеза, магматизма, метаморфизма и складчатости. Локализованная в Западном Прибайкалье складчатая система относится к ранним каледонидам.

- \* Обоснована коллизионная природа системы. Это сложный по своей морфологии коллаж, в котором тектонически перемешаны различные по генезису комплексы разного возраста и состава.

- \* Складчатая структура сформирована в процессе реализации многоактных и генетически различных деформаций.

- \* Выделены геодинамические системы типа дуга-дуга, дуга-террейн и террейн-континент.

- \* Обнаружены и закартированы покровные, сдвиговые и гнейсово-купольные складчатые ансамбли. Установлены их соотношения во времени и пространстве.

- \* Открыты новые типы глубинных механических смесей, сопровождавших сдвиговый тектогенез: синметаморфический мраморный меланж, синметаморфический магма-минглинг, метаморфический минглинг.

- \* Критически пересмотрены региональные стратиграфические схемы, предлагавшиеся на первых этапах исследований. Хотя изначально многие метаморфические породы были стратифицированы, первичные стратиграфические соотношения слоев или горизонтов нигде не сохранились. Определение подошвы и кровли таких единиц не поддается объективной расшифровке. Утраченными, нераспознаваемыми оказались, таким образом, главные признаки первичной стратификации. Многочисленные blastomylonitic швы, разделяющие allochthonous пластины коллизионного коллажа, не позволяют проследить те или иные горизонты из одной пластины в другую. Все это делает бесполезными попытки реставрации исходной стратиграфии.

- \* Обнаружены многочисленные признаки синорогенического коллапса коллизионной системы.

Конечно, это далеко не полный список. Немало новинок появляется в процессе каждого полевого сезона. Этот ресурс практически неисчерпаем. А аэрокосмический материал по Ольхонскому региону, который накоплен к настоящему времени, позволяет надеяться на то, что запланированную работу по созданию нового пакета карт геологического содержания удастся завершить в ближайшие два-три года. Ольхонский геодинамический полигон станет тогда надежной стартовой площадкой для дальнейших углубленных геологических исследований.

#### Благодарности и копирайты

- \* Лицензионный космический материал приобретен при финансовой поддержке ГИН РАН (Москва), ИЗК СО РАН (Иркутск), РФФИ (несколько грантов), программы «Электронная Земля» Президиума РАН и программы ОНЗ РАН и СО РАН «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)».

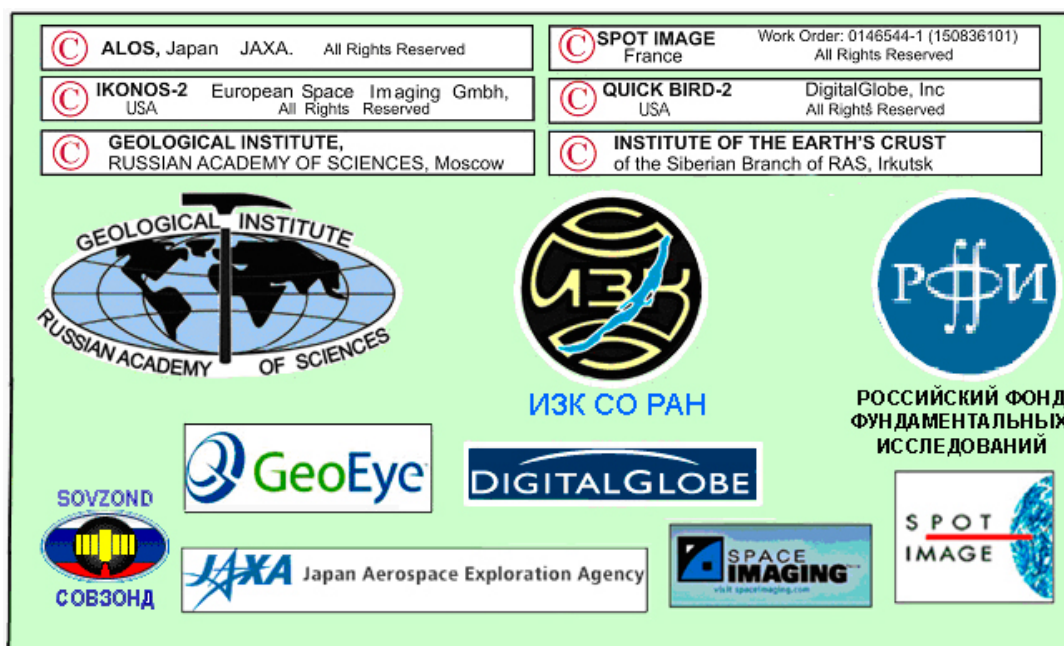
- \* Размещение заказов и оперативную поставку космических данных через серверы европейских центров обеспечивает компания «СОВЗОНД» (Москва) – бизнес-партнер компаний – владельцев спутников в США, Франции и Японии <http://www.sovzond.ru>.

- \* Снимки со спутника LANDSAT-7 получены с сайта John Stennis Center, Applied Sciences Directorate. USA <https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/mrsid.pl>.

- \* Альтиметрический радарный космический материал на юг Сибири со спутника SHUTTLE (США) получен через Интернет.

- \* Снимки со спутников QUICK BIRD-2, IKONOS-2 (США), SPOT-5 (Франция), ALOS (Япония) закуплены из архивов компаний – владельцев спутников.

- \* Космическая съемка Ольхонского региона со спутника QUICK BIRD-2 выполнена по заказу ГИН РАН.



\* Исследования и подготовка к изданию пакета карт выполняются в рамках научных программ ГИН РАН (Москва), ИЗК СО РАН (Иркутск), ИГМ СО РАН (Новосибирск), ИГД РАН (С.-Петербург) и при финансовой поддержке РФФИ.

\* Все карты геологического содержания, составляемые на площадь Ольхонского геодинамического полигона, принадлежат ГИН РАН (Москва) и ИЗК СО РАН (Иркутск). Все права сохранены. Копирование лицензионного аэрокосмического материала запрещено.

## ЛИТЕРАТУРА

- Бибикова Е.В., Карпенко С.Ф., Сумин Л.В. и др. U-Pb, Sm-Nd, Pb-Pb и K-Ar возраст метаморфических и магматических пород Приольхонья (Западное Прибайкалье) // Геология и геохронология докембрия Сибирской платформы и ее обрамления. – Л.: Наука, 1990. – С. 170–183.
- Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Федоровский В.С., Мазукабзов А.М., Ларионов А.Н. Неопротерозойские образования (комплекс Орсо) в структуре Ольхонского террейна и их геодинамическая интерпретация // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Вып. 7. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. Т. 1. – С. 74–76.
- Добржиницкая Л.Ф., Молчанова Т.В., Солюшкин В.Е., Лихачев А.Б., Федоровский В.С. Покровные и сдвиговые пластические деформации метаморфического комплекса Приольхонья (Западное Прибайкалье) // Геотектоника. – 1992. – № 2. – С. 58–71.
- Конева А.А., Самойлов В.С. Контактный метаморфизм и метасоматоз в ореоле Тажеранской щелочной интрузии. – Новосибирск: Наука, 1974. – 246 с.
- Летников Ф.А., Халилов В.А., Савельева В.Б. Изотопный возраст магматических пород Приольхонья // Доклады АН СССР. – 1990. – Т. 313, № 1. – С. 171–174.
- Мишина Е.И., Костицын Ю.А., Федоровский В.С. Архейский возраст протолита палеозойских гранито-гнейсов Ольхонского региона (Байкал): Sm-Nd и Rb-Sr изотопные данные // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы со-

вещения. Вып. 3. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2005. Т. 2. – С. 56–59.

- Розен О.М., Федоровский В.С. Коллизионные гранитоиды и расчленение земной коры (примеры кайнозойских, палеозойских и протерозойских коллизионных систем). – М.: Научный мир, 2001. – 188 с. (Тр. ГИН РАН, вып. 545).
- Скляров Е.В., Лавренчук А.В., Федоровский В.С., Котов А.Б., Мазукабзов А.М. Синколлизионный щелочно-базитовый магматизм Ольхонской системы // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Вып. 7. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009а. Т. 2. – С. 82–83.
- Скляров Е.В., Федоровский В.С. Тектонические и геодинамические аспекты механического смешения магм (магматического минглинга) // Геотектоника. – 2006. – № 2. – С. 47–64.
- Скляров Е.В., Федоровский В.С., Гладкочуб Д.П., Владимиров А.Г. Синметаморфические базитовые дайки – индикаторы коллапса коллизионной структуры Западного Прибайкалья // Доклады АН. – 2001. – Т. 381, № 4. – С. 522–527.
- Скляров Е.В., Федоровский В.С., Котов А.Б., Лавренчук А.В., Мазукабзов А.М., Левицкий В.И., Сальникова Е.Б., Старикова А.Е., Яковлева С.З., Анисимова И.В., Федосеев А.М. Карбонатиты в коллизионных обстановках и квазикрбонатиты раннепалеозойской Ольхонской коллизионной системы // Геология и геофизика. – 2009б. – Т. 50, № 12. – С. 1409–1427.
- Федоровский В.С. Купольный тектогенез в коллизионной системе каледонид Западного Прибайкалья // Геотектоника. – 1997. – № 6. – С. 56–71.
- Федоровский В.С. Геологическая карта юго-западной части Ольхонского региона. – М.: ГИН РАН, ГТМ им. В.И. Вернадского РАН, 2004.
- Федоровский В.С. Вязкие сдвиги коллизионной системы каледонид Западного Прибайкалья // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Вып. 5. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2007а. Т. 2. – С. 138–140.
- Федоровский В.С. Потенциал космической съемки высокого разрешения для геологических исследований (на примере Байкальского геодинамического полигона) // Международная конференция «Космическая съемка на пике высоких технологий». – М., 2007б. – [http://sovzondconference.ru/archive2007rus/agenda\\_20.html](http://sovzondconference.ru/archive2007rus/agenda_20.html).
- Федоровский В.С. Масштабы структур, распознаваемых на космических снимках сверхвысокого разрешения (коллизионная система Западного Прибайкалья) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от

- океана к континенту): Материалы совещания. Вып. 6. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2008а. Т. 2. – С. 142–143.
- Федоровский В.С.** Тажеранский массив сиенитов (Байкал): детальное геологическое картирование с использованием ДЗЗ (QUICK BIRD-2, IKONOS-2, SPOT-5, LANDSAT-7, радарная и аэрофотосъемка) // Международная конференция «Космическая съемка на пике высоких технологий». – М., 2008б. – [http://www.sovzondconference.ru/pdf\\_2008/0002b\\_rus.pdf#search](http://www.sovzondconference.ru/pdf_2008/0002b_rus.pdf#search).
- Федоровский В.С., Владимиров А.Г., Хаин Е.В. и др.** Тектоника, метаморфизм и магматизм коллизионных зон каледонид Центральной Азии // Геотектоника. – 1995. – № 3. – С. 3–22.
- Федоровский В.С., Лихачев А.Б., Риле Г.В.** Зона столкновения типа «террейн-континент» в Западном Прибайкалье: структура коллизионного шва // Тектоника Азии. – М.: ГЕОС, 1997. – С. 228–232.
- Федоровский В.С., Скляров Е.В.** Коллизионная система палеозоя Западного Прибайкалья: структура из Космоса // Тектоника и глубинное строение востока Азии. – Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2009. – С. 90–92.
- Федоровский В.С., Скляров Е.В., Изох А.Э., Котов А.Б., Лавренчук А.В., Мазукабзов А.М.** Сдвиговый тектогенез и щелочно-базитовый магматизм в коллизионной системе каледонид Западного Прибайкалья // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51, № 5. – С. 682–700.
- Федоровский В.С., Скляров Е.В., Лавренчук А.В., Котов А.Б., Мазукабзов А.М.** Основные тектонические единицы коллизионного коллажа каледонид Западного Прибайкалья // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Вып. 7. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009а. Т. 2. – С. 128–129.
- Федоровский В.С., Скляров Е.В., Мазукабзов А.М., Котов А.Б., Каргополов С.А., Лавренчук А.В., Старикова А.Е.** Геологическая карта массива Тажеран (Байкал). Масштаб 1:10000. – М.: Группа компаний А1 ТИС, 2009б.
- Федоровский В.С., Соколова Ю.Ф.** Структурный муар – новый тип структурного узора в гнейсовых куполах // Доклады АН СССР. – 1986. – Т. 286, № 5. – С. 1202–1206.
- Федоровский В.С., Хромых С.В., Сухоруков В.П., Куйбида М.Л., Владимиров А.Г., Скляров Е.В., Докукина К.А., Чамов С.П.** Метаморфический минглинг (новый тип минглинг-структур) // Тектоника и геодинамика континентальной литосферы: Материалы XXXVI Тектонического совещания. – М.: ГЕОС, 2003. Т. 2. – С. 255–259.
- Fedorovsky V.S.** Geological map of southwestern part of Ol'khon region. – Moscow: The Vernadsky State Geological Museum RAS, 2005.
- Fedorovsky V.S., Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Khromykh S.V., Mazukabzov A.M., Mekhonoshin A.S., Sklyarov E.V., Sukhorukov V.P., Vladimirov A.G., Volkova N.I., Yudin D.S.** The Ol'khon collision system (Baikal region) // Structural and tectonic correlation across the Central Asia orogenic collage: northeastern segment (Guidebook and abstract volume of the Siberian Workshop IGCP-480) / Ed. E.V. Sklyarov. – Irkutsk: IEC SB RAS, 2005. – P. 3–76.
- Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Wingate M.T.D., Poller U., Kroner A., Fedorovsky V.S., Mazukabzov A.M., Todt W., Pisarevsky S.A.** Petrology, geochronology, and tectonic implications of c. 500 Ma metamorphic and igneous rocks along the northern margin of the Central-Asian Orogen (Olkhon terrane, Lake Baikal, Siberia) // Journal of the Geological Society, London. – 2008. – V. 165. – P. 235–246.
- Knop P.A., van der Pluijm B.** GeoPad: tablet PC-enabled field science education // The impact of pen-based technology of education: vignettes, evaluations, and future directions / Eds. D. Berque, J. Prey, R. Reed. – Purdue, USA: Purdue University Press, 2006. – P.103–114.
- Longley P.A., Goodchild M., Maguire D.J., Rhind D.W., Loble J.** Geographic Information Systems and Science. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2001. – 454 p.
- Ray P.T.C.** GIS in Geoscience. The recent trends: The Geospatial Resource Portal, GISdevelopment.net, 2002. – <http://www.gisdevelopment.net/application/geology/mineral/geom0012.htm>.
- Whitmeyer S.J., Nicoletti J., Madison J., De Paor D.G.** The digital revolution in geologic mapping // GSA Today. – 2010. – V. 20, № 4/5. – P. 4–10.



**Федоровский Валентин Сергеевич**, докт. геол.-мин. наук, профессор, г. н. с.  
Геологический институт РАН  
119017, Москва, Пыжевский пер., 7, Россия  
Тел. 9513020; e-mail: west45@migmail.ru



**Fedorovsky, Valentin S.**, Doctor of Geology and Mineralogy, professor, Chief Researcher  
Geological Institute of RAS  
119017, Moscow, Pyzhevskys Pereulok, 7, Russia  
Tel. 9513020; e-mail: west45@migmail.ru



**Скляров Евгений Викторович**, член-корреспондент РАН, докт. геол.-мин. наук, профессор,  
директор института  
Институт земной коры СО РАН  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия  
Тел. 8(3952)511665; e-mail: skl@crust.irk.ru

**Sklyarov, Eugene V.**, Corresponding Member of RAS, Doctor of Geology and Mineralogy, professor,  
Director of the Institute  
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS  
664033, Irkutsk, Lermontov street, 128, Russia  
Tel. 8(3952)511665; e-mail: skl@crust.irk.ru