

С. А. Абушкевич<sup>1</sup>, К. А. Волин<sup>2</sup>

## ПОИСКИ ЗОЛОТОРУДНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ LANDSAT И WORLDVIEW-1 (МЕСТОРОЖДЕНИЯ СЕНТАЧАН И ПОЛЯРНИК, РЕСПУБЛИКА САХА)

<sup>1</sup> Федеральное космическое агентство, Научно-исследовательский институт космоаэрогеологических методов — филиал ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», Российская Федерация 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д. 82

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

На примере золоторудных месторождений Республики Саха (Якутия) показано применение седьмого и восьмого каналов спутника Landsat ETM+ при поисках золоторудных месторождений. Установлено, что совместное применение 7-го и 8-го каналов даёт возможность отделить спектральные аномалии над зонами окварцевания от аномалий над вмещающими породами. Это даёт положительный результат при поисках золоторудных объектов с учетом структурно-тектонической обстановки района поисков. Библиогр. 10 назв. Ил. 5.

*Ключевые слова:* золоторудные месторождения, спектральные аномалии, космические снимки, космоструктурное дешифрирование, надвиги, зоны разломов.

### SEARCHING FOR GOLD ORE OBJECTS BASED ON LANDSAT AND WORLDVIEW-1 SPACEIMAGES SPECTRAL FEATURES (DEPOSITS SENTACHAN AND POLYARNIK, SAKHA REPUBLIC)

S. A. Abushkevich<sup>1</sup>, K. A. Volin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Russian Federal Space Agency, Research Institute of Remote Sensing Methods for Geology — Branch of Central Research Institute of Machine Building, 82, Pulkovskoe shosse, St. Petersburg, 196140, Russian Federation

<sup>2</sup> St. Petersburg State University, Institute of Earth Science, 7/9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

With the example of gold deposits of Sakha Republic (Yakutia), the implementation of the seventh and eighth bands of the satellite Landsat ETM+ images for searching gold deposits is shown. It has been found that using seventh and eighth bands together gives the opportunity to separate the spectral anomalies above silicification zones from anomalies above bedrocks. This gives a positive effect on searching for gold ore objects, taking into account the structural and tectonic settings of search area. Refs 10. Figs 5.

*Keywords:* gold deposits, spectral anomalies, space images, remote sensing interpretation, thrusts, fault zones.

Цель данной работы — показать возможность применения 7-го и 8-го каналов многоканальных космических снимков спутника Landsat ETM+ и панхроматических снимков высокого разрешения WorldView-1 при поисках зон окварцевания, перспективных на обнаружение золоторудной минерализации, на примере золоторудных месторождений Сентачан и Полярник, находящихся на территории Республики Саха (Якутия), в 220 км юго-восточнее г. Верхоянска.

В структурном плане эта площадь расположена в северо-восточной части Янского мегасинклинория, восточнее Адычанского антиклинория и северо-западнее Иньяли-Дебинского синклинория. На исследуемой территории наблюдаются тер-

ригенные толщи нижнего и среднего мезозоя в областях ограниченного развития гранитоидного магматизма мелового возраста [1, 2]. Район месторождений Сентачан и Полярник находится соответственно в пределах Сентачанского и Ирюнджинского рудных узлов, входящих в Адычанскую минерагеническую зону северо-западного простирания со специализацией — золото, сурьма, ртуть [3]. Размещение крупного Сентачанского месторождения и ряда мелких месторождений контролируется крупным Адыча-Тарыным (Эльгинским) разломом северо-западного простирания [4].

Нами установлено, что основными признаками локализации золоторудных объектов (месторождений Сентачан и Полярник) по данным дешифрирования являются:

1. Северо-западная зона разломов в качестве рудоподводящего канала.
2. Пологая зона надвига, как экрана для гидротерм.
3. Кольцевые структуры, как признак наличия на глубине интрузивного тела — источника гидротерм.
4. Складчатые структуры, как дополнительные структурные ловушки для гидротерм.
5. Спектральные аномалии в 7-м канале спутника Landsat ETM+.

Для выбора перспективных участков в пределах рудных узлов необходимо сочетание четырёх первых признаков, а для определения места поисковых работ в пределах перспективного участка добавляется 5-й признак — спектральные аномалии в 7-м канале спутника Landsat ETM+ (рис. 1А), указывающие на местоположение зоны окварцевания как наиболее перспективного участка при поисках золота.

По результатам дешифрирования (рис. 1А, Б) на площади резко выделяется Центральный структурный блок, имеющий северо-западное простирание и отличающийся на общем фоне пониженным и сглаженным рельефом, а также особым фоторисунком. Протяжённость его более 8 км, ширина — 1–1,5 км. По руч. Шумный Центральный блок разделён субширотными разрывными нарушениями на две примерно равные части: Северную (горст-антиклиналь) и Южную (грабен), отличающиеся друг от друга характерным фоторисунком, отражающим геологическое строение данных блоков. Северная горст-антиклиналь характеризуется серым до светло-серого фототонном, грубо-полосчатым слабо извилистым фоторисунком отражающим осадочную толщу триасового возраста. Южный грабен — тёмносерым фототонном, тонкополосчатым до сильно извилистого фоторисунка, подчёркивающим преобладание пород юрского возраста.

Центральный блок [1, 5] ограничен с северо-востока северо-западными крутопадающими разломами и надвигами (рис. 2). С юго-запада Центральный блок ограничен надвигом с юго-западным падением сместителя, отдешифрированным нами на многозональных космических снимках (рис. 1Б). Его горизонтальная амплитуда составляет 500 м. Главный фронт для надвиговых структур с западным и запад-юго-западным направлением падения сместителя проходит по правому борту руч. Ударник и левому борту верховьев р. Сентачан. Подтверждением существования надвигов этого направления падения и распространения их по всей площади (даже на северо-востоке площади) может служить разрез [2] по руч. Соседний, рядом с верховьями руч. Шумный. На этом разрезе показано, что блоки пород нижней юры надвинуты на среднеюрские образования с юго-запада по сместителю под углом 40–60°.

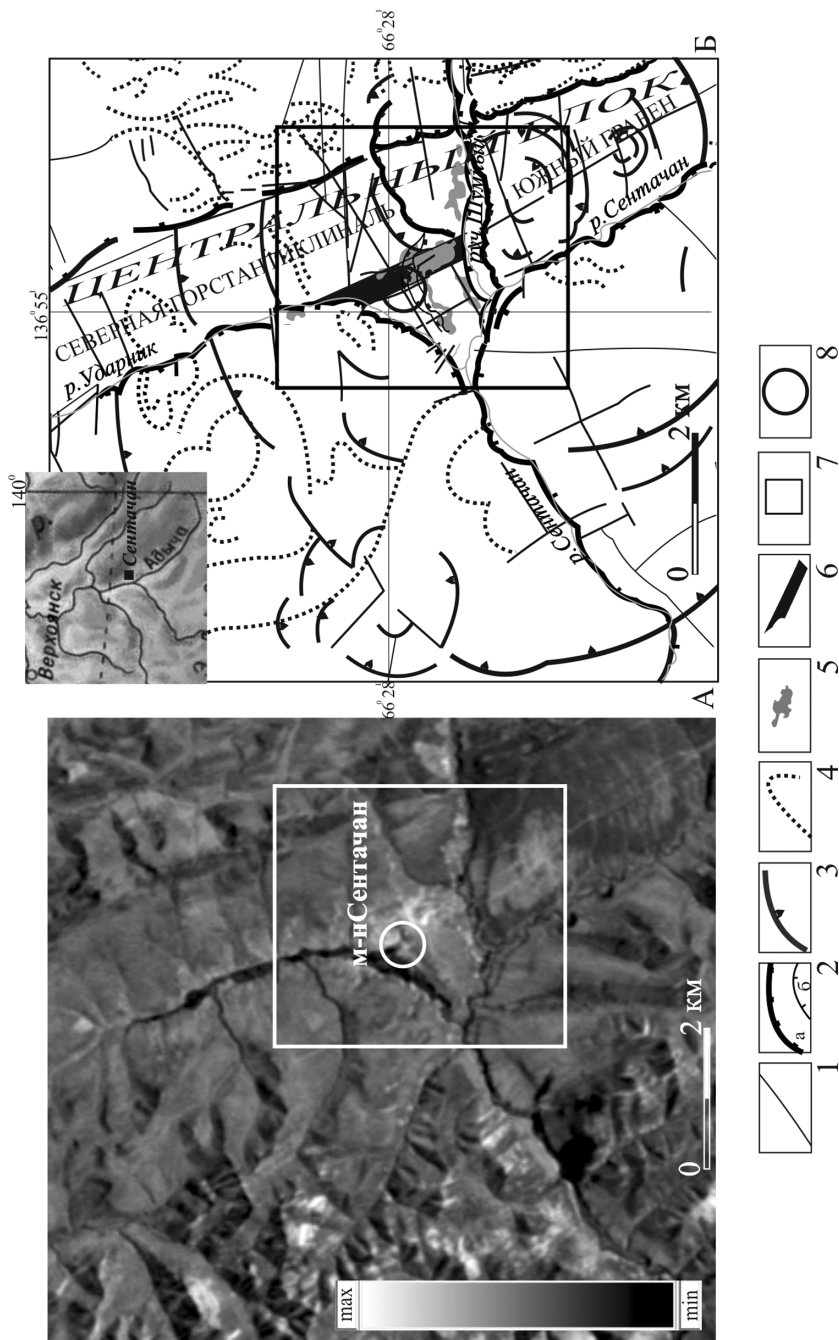


Рис. 1. Спектральная аномалия в 7-м канале спутника Landsat ETM+ над золоторудным месторождением Сентачан

А — фрагмент 7-го канала многоспектрального космического снимка спутника Landsat ETM+ (30.05.2001), Б — результирующая схема дешифрирования многоспектральных космических снимков спутника Landsat ETM+.

Условные обозначения к Б: 1–3 разрывные нарушения (надвиги) со пологопадающие (надвиги) со штрихами в сторону падения сместителя; а — основные, б — второстепенные, 3 — дуговые разломы кольцевых структур; 4 — структурные линии (главным образом, слоистость); 5 — аномалии спектральной яркости в 7-м канале; 6 — Сентачанская Северо-западная минерализованная зона; 7 — контур рис. 3А, Б; 8 — месторождение Сентачан [5].

Верхнечетвертичные-современные отложения. Аллювиальные галечники, валуны, пески и озерно-болотные суглинки, торфяники

Среднечетвертичные флювиогляциальные отложения. Галечники, пески, гравий, супеси, илы

Нижнечетвертичные отложения. Ольховская толща. Озерно-аллювиальные ленточные глины, галечники и аллювиальные пески, валуны, галечники, пески, суглинки

Среднемоценовые-эоценовые отложения. Малышевская свита. Эльвиально-делювиальные щебнистые суглинки, глины

Нижний отдел. Гетангский и синемюрский ярусы. Аргиллиты и алевролиты с линзами известковых песчаников

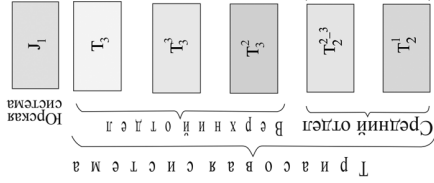
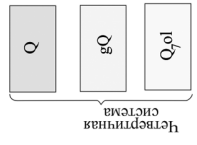
Былыйнская свита. Чередование алевролитов, алевропесчаников, алевролитов

Третья пачка. Алевролиты с прослоями алевропесчаников и песчаников с линзами конгломератов

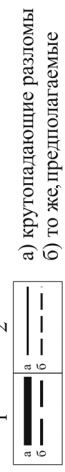
Вторая пачка. Чередование песчаников и пачек переслаивания алевролитов и песчаников

Средняя и верхняя подевиты. Алевролиты с прослоями песчаников и аргиллитов

Нижняя подевита. Алевролиты-песчаники и алевролиты с прослоями алевролитов



Разрывные нарушения:  
1 Главные  
2 Второстепенные



Геологические границы

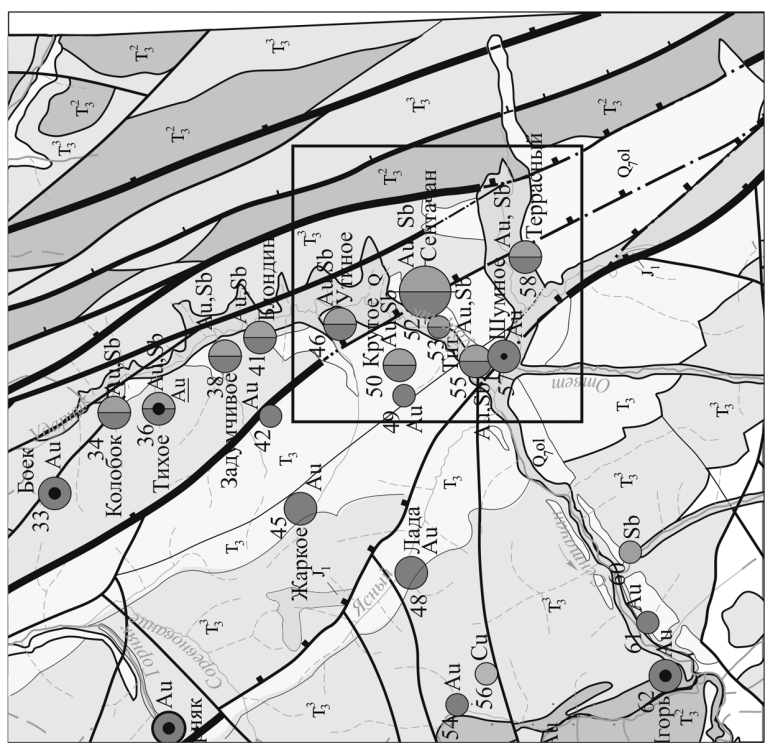


Рис. 2. Фрагмент геологической схемы района месторождения Сентачан  
Внешний контур — фрагмент геологической схемы [5] к рис. 1, внутренний контур — площадь рис. 3А, Б.

Блок пород триасового возраста, взброшенный по крутопадающему разлому, подтверждает структурный план Северной горст-антиклинали.

Надвиговая зона, отдешифрированная нами по левобережью руч. Шумный, в сочетании с крутопадающими субширотными разломами отделяет Северную горст-антиклиналь от Южного грабена (см. рис. 1Б) и является продолжением системы надвиговых зон южного и юго-восточного падения, отображённых на геологических картах северо-восточнее [1] и юго-западнее [5] месторождения Сентачан. В Северной горст-антиклинали на левобережье руч. Ударник (до западных отрогов Неньдельгинского хребта) картированы наиболее древние относительно окружающих пород триасовые образования [5, 6]. В Южном грабене выходят на поверхность породы триаса и юры [5]. По результатам дешифрирования весь Южный грабен имеет однотипный фоторисунок, сходный с юрскими образованиями, показанными на геологической схеме в верховьях р. Сентачан [5]. Фоторисунок блока, тёмно-серый и тонко-полосчатый, отражает изоклиналиную складчатость в юрских образованиях. Таким образом, можно предполагать, что и породы, слагающие преобладающую площадь южной части Центрального блока, одного возраста с юрскими образованиями. Они перекрыты четвертичными отложениями [5], мощность которых на коренных породах невелика, поэтому здесь хорошо дешифрируются складчатость, крутопадающие разломы и дуговые разломы кольцевых структур (см. рис. 1Б). Возможно, что отмеченные на геологической карте четвертичные отложения могут являться морозной корой выветривания по терригенным образованиям с хорошо выраженным структурным элювием, широко развитым в районах с многолетней мерзлотой.

В пределах Сентачанского и Ирюнджинского рудных узлов [3] по многоспектральным космическим снимкам спутника Landsat ETM+ (снимки 1999–2002 гг.) нами отдешифрированы надвиги, складчатые структуры и крутопадающие разрывные нарушения, а также дуговые разломы кольцевых структур разных рангов (см. рис. 1Б). Среди крутопадающих разрывных нарушений преобладают северо-западная и северо-восточная системы разломов. Реже наблюдаются субширотные и субмеридиональные разломы. Надвиговые структуры трёх направлений имеют сместители северо-восточного, юго-западного и юго-восточного падения. С надвигами тесно связаны складчатые структуры. При субширотном сдавливании образовались субмеридиональные складки первого этапа складчатости и надвиги с северо-восточным и юго-западным падением сместителей. В результате надвиговых процессов с юга и юго-востока образовались складки второго этапа складчатости с субширотными и северо-восточными осями складок, осложняющими складчатость первого этапа.

Надвиговые структуры дешифрируются, прежде всего, по положому падению сместителя и сгущению складчатости, оси которой вытянуты согласно фронту надвига. Падение сместителя надвига отражается на снимках структурными тре-угольниками. Выход сместителя на поверхность имеет на снимках более тёмный, относительно окружающего фоторисунка, фототон за счёт обводнения. Кроме того, в районе фронта надвига с юго-восточным падением сместителя изменяются направления осей складчатости с северо-западного на северо-восточное и субширотное в результате смятия (гофрировки) крыльев и осей субмеридиональных складок первого этапа складчатости. В районе сместителя надвигов субширотного простираения наблюдаются отложения двух структурных этажей. Часто вблизи фронта надвига дешифрируется S-образный фоторисунок, отражающий смятие пластов. Этот характерный для надвиговых струк-

тур признак S-образного изгиба рудоконтролирующих структур, а также локализация рудных тел в субширотных и северо-восточных разломах (т. е. вкрест рудоподводящей северо-западной структуре) отмечается на месторождении Сентачан [4].

Крутопадающая субширотная зона по левобережью руч. Шумный (см. рис. 1Б, 3А) общей шириной до 1,5 км перекрыта аллохтоном надвига южного падения, фронт которого имеет в плане дугообразную форму, обращённую выпуклой частью на север. По этому надвику породы, слагающие Южный грабен, надвинуты на терригенные триасовые образования южной части Тирехтяхского поперечного поднятия [7], которое было образовано в результате меридионального сжатия при надвиговых процессах с юга в период юрско-меловой активизации.

По сместителю, в всиячей части автохтона, дешифрируются породы со светлым фототонном, предположительно представляющие собой гидротермально проработанные вмещающие породы. Основную структуру надвига сопровождает ряд мелких надвигов. Эта серия мелких надвигов имеет так же, как и основной надвиг, южное падение сместителя и в плане чешуйчатую форму с амплитудой горизонтального смещения до 200 м. По чешуйчатым блокам дешифрируются левосторонние сдвиги маркирующих горизонтов (см. рис. 3А). Аналогичные структуры описаны в Забайкалье на протяжении всей Монголо-Охотской зоны надвига и имеют такое же южное падение сместителя [8].

Дополнительным критерием к космогеологическим признакам выбора перспективных площадей является выделение участков с аномалиями спектральной яркости в 7-м канале спутника Landsat ETM+ (снимки 22.08.1999), которые отображают места с повышенным содержанием кварцевой составляющей в породе или предположительно связаны со скоплением кварцевых жил и окварцеванием вмещающих пород. Работы, проведённые по выявлению отражательной способности пород и минералов [9, 10], показали, что окварцованные породы наиболее хорошо проявляют себя в интервале 2,0–2,5 мкм, т. е. в 7-м канале (2,09–2,35 мкм) спутника Landsat ETM+, в который полностью укладывается наиболее яркий спектр кварца — 2,2 мкм. Следовательно, при обработке снимка в 7-м канале следует оставить только наиболее яркие аномалии. Для отделения аномалий спектральной яркости 7-го канала, указывающих на зоны окварцевания, от аномалий над вмещающими породами в том же канале необходимо посмотреть (см. рис. 3А, Б) на данную площадь в 8-м канале (0,52–0,9 мкм). Кварцевый спектр (2,0–2,5 мкм) в 8-м канале (см. рис. 3Б) отсутствует по определению, поэтому и аномалии спектральной яркости над зонами окварцевания отсутствуют. Следовательно, сравнительный анализ одновременно 7-го и 8-го каналов позволяет отделить яркостные аномалии, вызванные особенностями состава и строения пород или экспозиционными особенностями рельефа — южные склоны.

На Сентачанской площади аномалии спектральной яркости 7-го канала шириной около 500 м легли непосредственно на картированную предшественниками рудоподводящую Северо-западную зону. При этом рудное тело, вскрытое горными выработками на водоразделе стрелки ручьев Ударник и Шумный [6], отмечается в пределах аномалии спектральной яркости (см. рис. 3А), что подтверждает приуроченность спектральных аномалий к рудным зонам. Выбор перспективных участков по аномалиям спектральной яркости должен сочетаться со структурными критериями рудоперспективности: глубинными зонами разломов, надвигами, кольцевыми и складчатыми структурами.

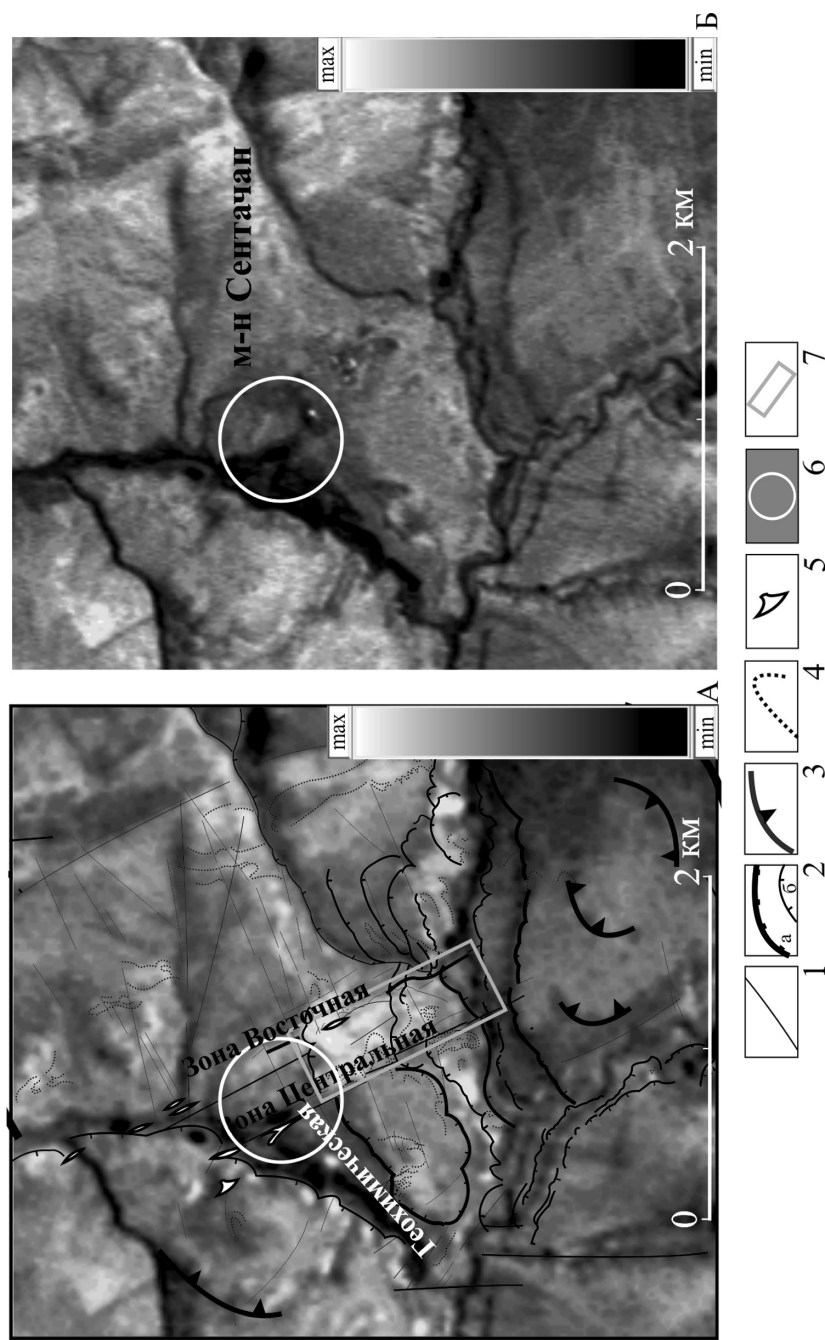


Рис. 3. Отражение Северо-западной зоны окварцевания в 7-м канале космического снимка Landsat ETM+ (месторождение Сентачан)

А — фрагмент 7-го канала многоспектрального космического снимка спутника Landsat ETM+ (22.08.1999) с результатами дешифрирования космического снимка высокого разрешения съемочной системы WorldView-1 (12.07.2010) в районе месторождения Сентачан; Б — фрагмент 8-го канала многоспектрального космического снимка спутника Landsat ETM+ (22.08.1999) той же территории.

Условные обозначения: 1–3 — разрывные нарушения (надвиги) со штрихами в сторону падения сместителя; 4 — основные, 5 — второстепенные, 6 — дуговые разломы кольцевых структур; 7 — структурные линии (главным образом, слоистость); 8 — золото-кварц-антимонитовые жилы [6]; 9 — месторождение Сентачан [5]; 10 — перспективная площадь.

При прослеживании по космоснимкам Сентачанской минерализованной зоны в северном направлении видно, что она скрывается под надвиговой структурой, фронт которой проходит по правобережью руч. Ударник (см. рис. 1Б). Южная часть этой же зоны срезается субширотным надвигом по долине руч. Шумный. Здесь же заканчиваются и спектральные аномалии в 7-м канале. Кроме того, по периферии аллохтона, отдешифрованного на стрелке ручьев Ударник и Широкий, окружённого эрозионными окнами (см. рис. 3А), наблюдается ряд мелких спектральных аномалий в 7-м канале спутника Landsat ETM+.

Всё это свидетельствует о том, что под аллохтоном могут находиться гидротермально проработанные породы с золоторудной минерализацией. Прямым доказательством этого предположения можно считать отработанные россыпи золота в 200 и 400 м юго-западнее месторождения Сентачан, в пределах Геохимической зоны [6], начинающиеся непосредственно из-под размытого аллохтона надвига на левобережье руч. Ударник. Аномальные значения спектральной яркости 7-го канала отмечаются также вдоль фронта надвига с южным падением сместителя. На левобережье руч. Шумный, в пределах аллохтона (см. рис. 3), разведано мелкое месторождение Террасное [5]. Всё это говорит о необходимости поисковых работ под аллохтоном данного надвига.

Диаметр наиболее яркого спектрального пятна составляет 300 м. Оно расположено на пересечении менее ярких аномалий, выделяющихся по Восточной и Центральной зонам [6] (см. рис. 3А) и восток-северо-восточному разлому, сопряжённому с субширотной глубинной зоной (по руч. Шумный). Субширотная зона соединяет выходящие на поверхность мелкие гранитные массивы мелового возраста, расположенные в 20 км западнее и восточнее Сентачанского месторождения. О близости на глубине гранитного массива источника золоторудной минерализации свидетельствует Сентачанская кольцевая структура диаметром около 10 км, в центральной части которой расположено Сентачанское месторождение, и ороговикование во вмещающих руду породах [4]. Ряд небольших кольцевых структур диаметром первые километры и менее отдешифрован нами по бортам грабена и в самом грабене (см. рис. 1Б).

Ярким аномальным полем в 7-м канале спутника Landsat ETM+ отражено и месторождение золота Полярник (рис. 4А, 5А, Б), находящееся в 145 км южнее месторождения Сентачан и показанное (рис. 5В) на фрагменте геологической схемы [5]. Как и месторождение Сентачан, оно приурочено к пересечению крутопадающих разрывных нарушений северо-западного и восток-северо-восточного простирания. Так же, как и месторождение Сентачан, оно находится в центральной части кольцевой структуры диаметром около 10 км, на пересечении надвиговых структур юго-восточного падения с северо-западной зоной разломов (рис. 4Б).

По результатам дешифрирования выделились космоструктурные особенности золоторудных месторождений Сентачан и Полярник. Эти месторождения находятся в районе:

- центральной части кольцевой структуры диаметром около 10 км;
- пересечения северо-западных и северо-восточных (до субширотных) зон разломов;
- интенсивного развития надвиговых структур, имеющих сместитель южного и юго-восточного падения;



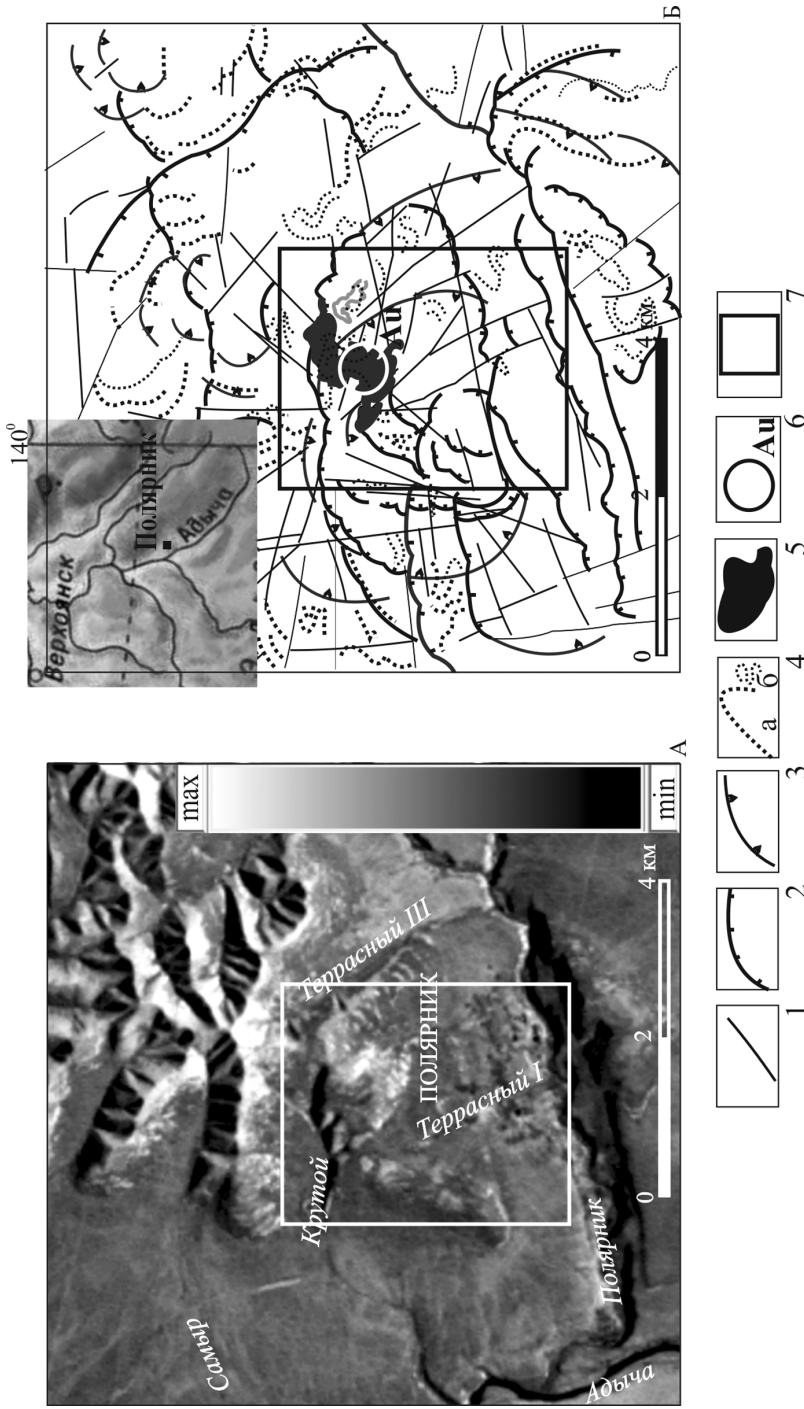


Рис. 4. Отражение золоторудного месторождения Полярник (Адычанский золотоносный район) в 7-м канале многоспектрального космического снимка Landsat ETM+

А — фрагмент 7-го канала многоспектрального снимка спутника Landsat ETM+ (30.05.2001); Б — результирующая схема дешифрирования космических снимков Landsat ETM+.

Условные обозначения к рисунку 4Б: 1–3 — разрывные нарушения: 1 — крутопадающие, 2 — надвиги, 3 — дуговые разломы кольцевых структур; 4 — структурные линии (главным образом, слоистость) двух этапов складчатости: а — первого, б — второго; 5 — аномалия спектральной яркости в 7-м канале, наблюдаемая на рис. 4А в районе месторождения Полярник; 6 — месторождение Полярник; 7 — контур рис. 5А, Б.

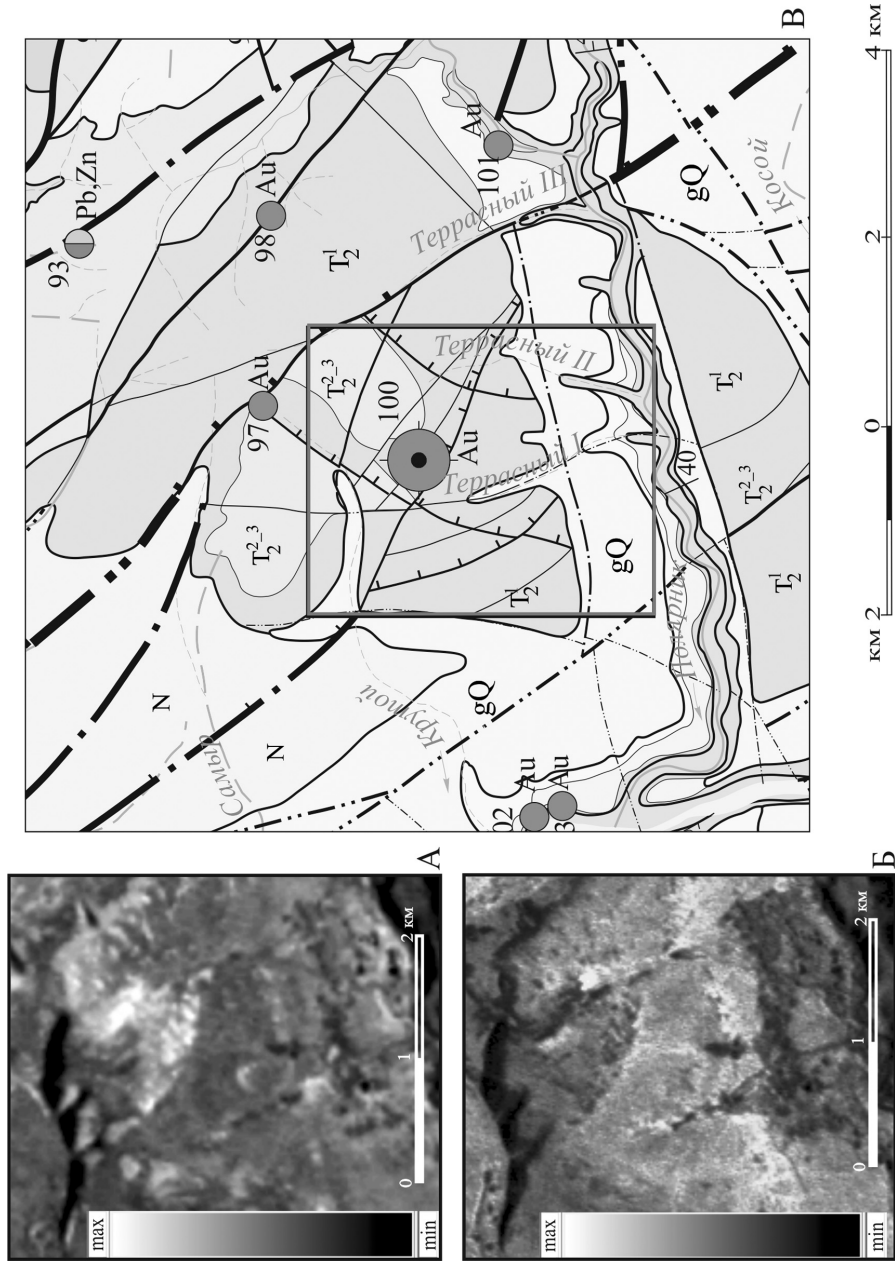


Рис. 5. Участок месторождения Полярник на космическом снимке Landsat ETM+ в 7-м и 8-м каналах  
 А — фрагмент 7-го канала многоспектрального космического снимка спутника Landsat ETM+ (22.08.1999) в районе месторождения Полярник; Б — фрагмент 8-го канала того же снимка; В — фрагмент геологической схемы района месторождения Полярник [5].

— развития складчатости второго этапа (с осями складок северо-восточного и субширотного простирания), наложенной на складчатость первого этапа северо-западного простирания;

— мест локализации рудных зон, содержащих кварцевые жилы и зоны окварцевания и сопровождающихся аномалиями спектральной яркости в диапазоне 2,09–2,35 мкм (7-й канал спутника Landsat ETM+).

Учитывая перечисленные выше критерии рудоперспективности, удалось выделить по результатам дешифрирования космических снимков Landsat ETM+ и WorldView-1 новые перспективные участки. Основным участком является область простирания Центральной и Восточной зон [6] и узел их пересечения с субширотным надвигом южного падения (см. рис. 3А). В данном месте обрывается спектральная аномалия 7-го канала, перекрытая надвигом. Предполагается, что находящиеся в этом месте зоны окварцевания перекрыты надвигом (по долине и левому борту руч. Шумный).

### Литература

1. Геологическая карта СССР. Масштаб 1:200 000. Лист Q-53-XVII, XVIII (Серия Верхоянская) / сост.: А. Н. Вишневский, А. А. Булатов; ред. А. В. Зимкин. ВСЕГЕИ. М., 1968.
2. Геологическая карта СССР. Масштаб 1:200 000. Объяснительная записка. Лист Q-53-XVII, XVIII (Верхоянская серия) / сост.: А. Н. Вишневский, А. А. Булатов; ред. А. В. Зимкин. ВСЕГЕИ. М., 1969. 113 с.
3. Государственная геологическая карта СССР (новая серия). Масштаб 1:1000 000. Карта полезных ископаемых / Ю. А. Владимирцева, В. М. Владимирцев при участии А. К. Миледина и В. В. Масленникова; ред. В. И. Шур; отв. ред. Л. М. Натапов. ПГО «Аэрогеология». ВСЕГЕИ, Л., 1982.
4. Государственная геологическая карта СССР. Масштаб 1:1000 000 (новая серия). Объяснительная записка. Лист Q-52,53 — Верхоянск. (Министерство геологии СССР, ВСЕГЕИ, ПГО «Аэрогеология») / отв. ред. Л. М. Натапов. Л., 1985. 116 с.
5. Султанаев Р. Г., Буянкин А. Г. Схематическая геологическая карта с элементами прогноза размещения полезных ископаемых в центральной части Адычанского золотоносного района. Масштаб 1:100 000. Федеральное агентство по недропользованию (РОСНЕДРА) / Управление по недропользованию по Республике Саха (Якутия). ОАО «Янгеология», 2011.
6. Широков В. В. Схематическая геолого-структурная карта Сентачанского рудного поля. Масштаб 1:10 000. Федеральное агентство по недропользованию (РОСНЕДРА) / Управление по недропользованию по Республике Саха (Якутия). ОАО «Янгеология», 2010.
7. Цейдлер Н. А., Куликова Л. И., Архипов Ю. В. Государственная геологическая карта СССР (новая серия). Масштаб 1:1000 000. Карта дочетвертичных образований / отв. ред. Л. М. Натапов. ПГО «Аэрогеология», 1982.
8. Абушкевич С. А. Надвиговые и кольцевые структуры Забайкалья по результатам дешифрирования космоснимков // «Геология и полезные ископаемые Читинской области» к 50-летию ГГУП «Читагеолсъёмка». Чита: ГГУП «Читагеолсъёмка», 2000. С. 60–71.
9. Clark R. N., Swayze G. A., Gallagher A. J., Calvin W. M. The U. S. Geological Survey, Digital Library: Version 1: 0.2 to 3.0 m: USGS Open File Report 93-592. 1993. 4 volumes. 1340 p.
10. Vincent K. Robert. Fundamentals of Geological and Environmental Remote Sensing. 1997. 370 p.

Статья поступила в редакцию 24 декабря 2013 г.

### Контактная информация

*Абушкевич Сергей Антонович* — кандидат геолого-минералогических наук; niicosm\_as@mail.ru  
*Волин Кирилл Артемович* — старший преподаватель; cy-volin@yandex.ru

*Abushkevich S. A.* — Candidate of Geological and Mineralogical Sciences; niicosm\_as@mail.ru  
*Volin K. A.* — Senior Lecturer; cy-volin@yandex.ru