

**НЕОТЕКТОНИКА И ОСОБЕННОСТИ ЭРОДИРОВАННОСТИ
КОНТРОЛИРУЮЩИХ СТРУКТУР МНОГОВЕРШИННОГО
ЗОЛОТОРУДНОГО ПОЛЯ (ХАБАРОВСКИЙ КРАЙ)
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

С. Л. Шевырёв

Дальневосточный геологический институт (ДВГИ ДВО РАН),
Дальневосточный федеральный университет (ДФУ), Владивосток

Поступила в редакцию 23 августа 2017 г.

Аннотация: На северном фланге Восточно-Сихотэ-Алинского пояса расположено крупное Многовершинное золоторудное поле, связанное с палеогеновым Бекчиулским массивом гранитоидов. Сложность строения, многоэтапность формирования, до- и послерудные тектонические события делают Бекчиулский массив объектом пристального внимания исследователей. Анализ материалов дистанционного зондирования Земли выявил особенности распределения элементов дистанционного изображения территории и установил аномальные значения разностей базисных поверхностей водотоков 2-го и 3-го порядка. Это позволило рассуждать о неотектонических процессах и активности долгоживущих тектонических структур, как руководящих факторах, определивших развитие Бекчиулского вулканно-плутонического сооружения (ВПС).

Ключевые слова: Matlab, дистанционное зондирование Земли, минерализация золота, неотектоника, анализ гидросети, Сихотэ-Алинская складчатая область.

**NEOTECTONIC UPLIFTS AND EROSION OF CONTROLLING STRUCTURES
OF MNOGOVERSHINNOE GOLD FIELD (KHABAROVSK KRAI)
BY ANALYSIS OF REMOTE SENSING DATA**

Abstract: *Mnogovershinnoe gold field is located on northern flank of East-Sikhote-Alin belt and associated with Paleogene Bekchiul massif of granite. Sophisticated composition, multistage formation, pre- and post-ore tectonic events make Bekchiul massif an object of high attention of researchers. Analysis of remote sensing data discovered distribution of remote sensing features and anomalous values of difference of base surface for 2nd and 3rd orders of streams. It allowed discussing neotectonic processes and activity of long-living tectonic structures as leading factors of Bekchiul volcanic-plutonic assemblage development.*

Key words: *Matlab, remote sensing of the Earth, ore mineralization of gold, neotectonics, analysis of river network, Sikhote-Alin folded area.*

Введение

Эпитермальное Многовершинное золото-серебряное месторождение северного фланга Восточно-Сихотэ-Алинского вулканно-плутонического пояса (ВСАВП), помимо крупных остаточных ресурсов (15 т Au по категории P1 и 19,8 т Au по категории P2 [1]), представляет интерес с точки зрения своего происхождения и специфики геологического развития. Локализованное в северо-западном секторе крупного (около 520 км²) многофазного Бекчиулского плутона, окруженного позднекайнозойскими палеовулканическими сооружениями, месторождение представлено несколькими протяженными жильно-метасоматическими рудными зонами значительной мощности и раз-

личной степени эродированности.

Цель настоящего исследования – выявление зон неотектонической активности палеогенового Бекчиулского ВПС и возможных его связей с процессами рудообразования на Многовершинном рудном поле.

В качестве методической основы для фиксациикумулятивного результата действия рельефообразующих процессов и выявления зон неотектонической активности использовался анализ базисных поверхностей водотоков 2-го и 3-го порядка. При последующей интерпретации их разностной поверхности нами использовались специализированные геологические и геоморфологические карты, сведения о возрасте рельефа и гидросети, а также данные о гляциоэвстатических колебаниях.

Геологическое строение района исследований

Район исследований расположен на территории Нижнего Приамурья и относится к северному сегменту Сихотэ-Алинской складчатой системы.

Донеогеновые структурно-вещественные комплексы этого сегмента могут быть разделены на два структурных этажа. Нижний этаж, соответствующий дислоцированному основанию ВСАВПШ, представлен терригенными породами позднеюрского-верхнемелового возраста (песчаниками, аргиллитами, алевролитами) (см. рис. 1). Верхний этаж слагают палеоценовые эффузивные жерловые и субвулканические ассоциации брекчиевых лав, состоящих из пироксеновых и роговообманковых андезитов и андезидацитов. Оба этажа прорваны гранитоидами Бекчиулского массива, являющегося основной частью Бекчиулского ВПС [2], в северо-западной части которого локализовано Многовершинное Au-Ag месторождение и одноименное рудное поле (рис. 1).

Магматиты сооружения представлены двумя породными ассоциациями: ранней – андезит-гранодиоритовой нормальной щелочности и поздней – монцогранодиорит-гранитной субщелочной. С андезит-гранодиоритовой ассоциацией сопряжено формирование золото-серебряного оруденения Многовершинного поля. Пространственно оруденение совмещается с Улской андезитовидной вулканической структурой (см. рис. 1, буква У в кружке), одной из нескольких вулканоструктур, находящихся на периферии Бекчиулского массива. Благороднометалльная минерализация Многовершинного рудного поля сосредоточена в протяженных (до 10 км) и мощных (до 100 м) жильно-метасоматических зонах северо-восточного простирания, прослеженных на глубину до 600 м. Промышленными являются Главная, Промежуточная и Медвежья жильно-метасоматические зоны.

Зоны представляют собой образования из чехла метасоматитов кислотного выщелачивания и кварцевых ядер, содержащих участки брекчирования с кварцевым, адуляр-кварцевым и карбонатно-кварцевым цементом. Их происхождение связано с раскрытием северо-восточных разрывных нарушений. Появление поздних рудоносных скарноподобных метасоматитов обязано внедрению линейных тел субщелочных интрузивов, ориентированных ортогонально к рудным зонам. На месторождении различают также рудоносные до- и послескарновые карбонаты. С наиболее молодыми телами монцогранодиорит-гранитной ассоциации связаны турмалин-кварцевые прожилки.

Эродированность жильно-метасоматических рудоконтролирующих разрывных нарушений уменьшается от центра Бекчиулского плутона к периферии ВПС. Особый интерес вызывает пересечение наиболее эродированной зоны – Главной, а также Промежуточной магматитами позднейших стадий внедрения. Наличие среди таких магматитов крупных “ксенолитов” рудоносных зон позволяет предположить здесь развитие процесса протрудирования и, соответственно, влияние на их современный облик позднейших

процессов [6, 7, 8].

Выявить зоны неоген-четвертичных тектонических движений, получивших развитие на рудоносной территории, можно анализом речной сети и динамики ее формирования. Реки юго-западной части площади исследований впадают в озера Чля и Орель, остальные – Сахалинский залив Охотского моря. Главные реки здесь: Малахта, Бекчи, Ул, Тывлинка и другие, являются, как правило, водотоками 3 и 4 порядка. Гидросеть разветвленная, ее рисунок имеет в плане дендровидную форму.

В соответствии с современными представлениями, основные речные системы района заложились в неогене [9]. Их притоки – водотоки меньшего порядка формировались, начиная с этого времени, и сохранили основные черты событий истории геологического развития, оказывающих влияние на базис эрозии. К таким событиям относятся: гляциоэвстатические колебания (регрессии моря и понижение базиса эрозии в ледниковья, ингрессии моря в речные долины в межледниковья), локальные блоковые поднятия и опускания, формирование вулканических аппаратов и другие явления.

Измерение гипсометрического положения долин различных порядков с расчетом базисных поверхностей и разности между ними позволяет выявить области активного воздымания (морфоструктуры) и повышенной эрозионной устойчивости (эрозионных останцов – морфоскульптур). Значения разности между базисными поверхностями целесообразно сопоставлять с амплитудой понижения базиса эрозии. Зоны локальных депрессий или стабильного положения уровня эрозии в картах базисных поверхностей обычно не выражены.

Методика исследования

Метод базисных поверхностей [10, 11] – один из классических, имеющихся в арсенале современной неотектоники. Применение геоинформационных технологий позволяет вывести его на новый уровень, повысив точность и скорость вычислений. Построение и анализ базисных поверхностей территории осуществлялись путем обработки цифровой модели рельефа (ЦМР SRTM, горизонтальное разрешение около 90 м), в среде научного и инженерного программирования Matlab.

Теоретическая основа такого анализа состоит в допущении, что водотоки одного порядка (т.е. одной генерации) закладывались на исследуемой территории синхронно. Для определения порядка водотоков использовался метод, предложенный [12, 13]. Водоток, не имеющий притоков, является водотоком первого порядка, а водоток, в который впадают только водотоки первого порядка, имеет второй порядок. Те из водотоков, в которые впадают хотя бы один водоток второго порядка, имеют порядок 3 и так далее. Обобщенно, главные речные системы территории исследований имеют 4-й, а их притоки – 3-й порядок.

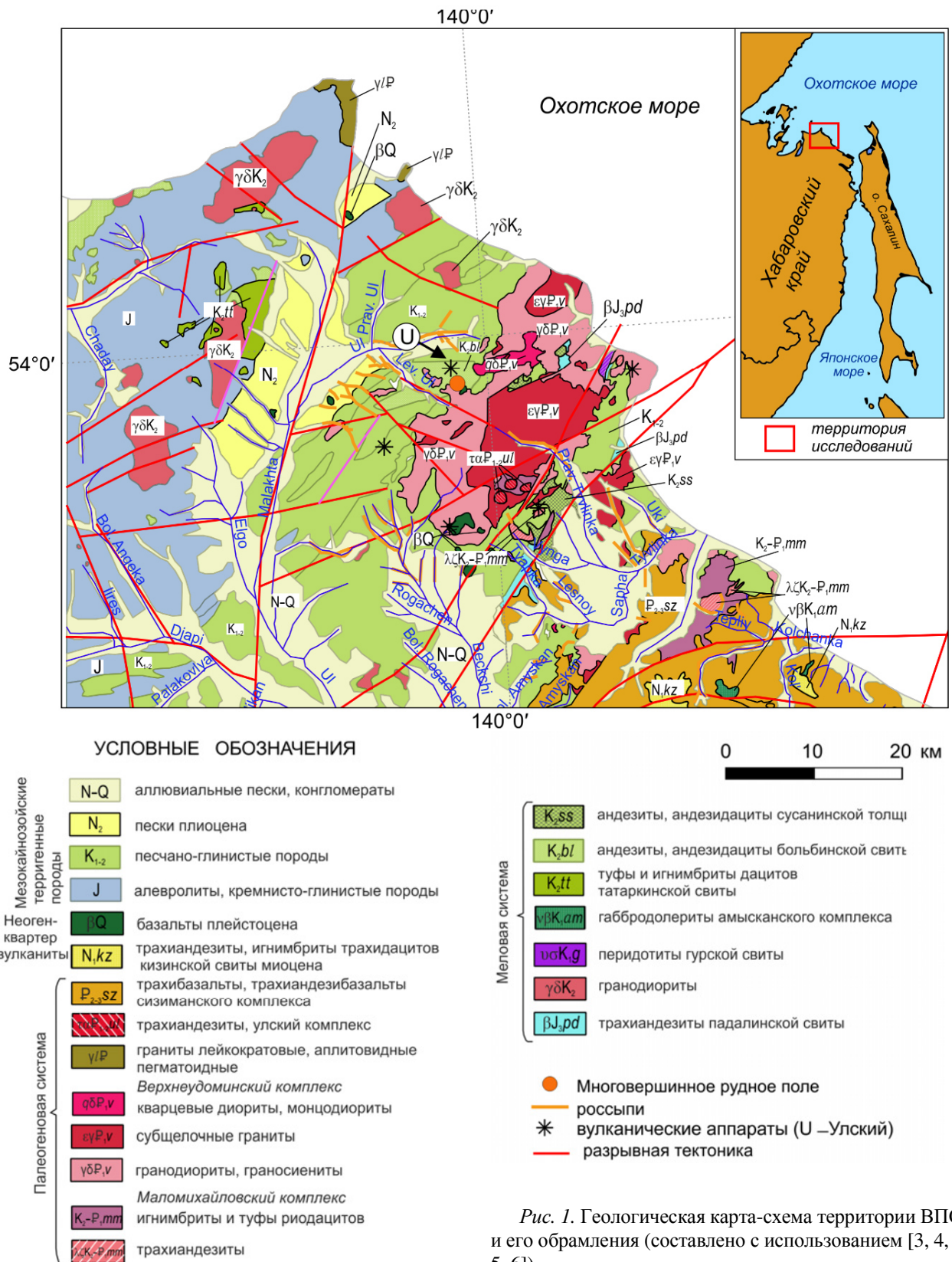


Рис. 1. Геологическая карта-схема территории ВПС и его обрамления (составлено с использованием [3, 4, 5, 6]).

Отметки базисной поверхности порядка водотоков характеризуют относительное положение базиса эрозии во время заложения этого порядка. При относительном понижении базиса (или формировании ло-

кальных поднятий) происходит образование притоков и увеличение порядка основных, более древних, водотоков. При анализе базисных поверхностей, отличие активных локальных поднятий от морфоскульптур,

являющихся выражением горных пород высокой эрозионной устойчивости, заключается в превышении амплитудами изменения базиса эрозии известного для региона гляциоэвстатического значения.

Весь комплекс расчетов по составлению карты неотектонической активности района Многовершинного рудного поля выполнялся в Matlab. Выявление гидросети на ЦМР и определение порядка водотоков производилось с помощью модуля Matlab Topographic Toolbox (МТТ), разработанного В. Швангхартом [14]. Фактическим материалом для дальнейших расчетов явилась построенная с помощью аппарата МТТ карта

порядков водотоков автоматического дешифрирования (рис. 2).

Построение карты базисных поверхностей производилось с помощью методики Философова В.П. [10, 11], модернизированной для использования с ЦМР. Основой для расчетов являлась растровая карта водотоков выбранного порядка. Пиксели, соответствующие водотокам, служили маской для выбора значений высот ЦМР с созданием разреженной матрицы. Элементы этой матрицы, содержащие значения, использовались для интерполяции базисной поверхности (рис. 3).

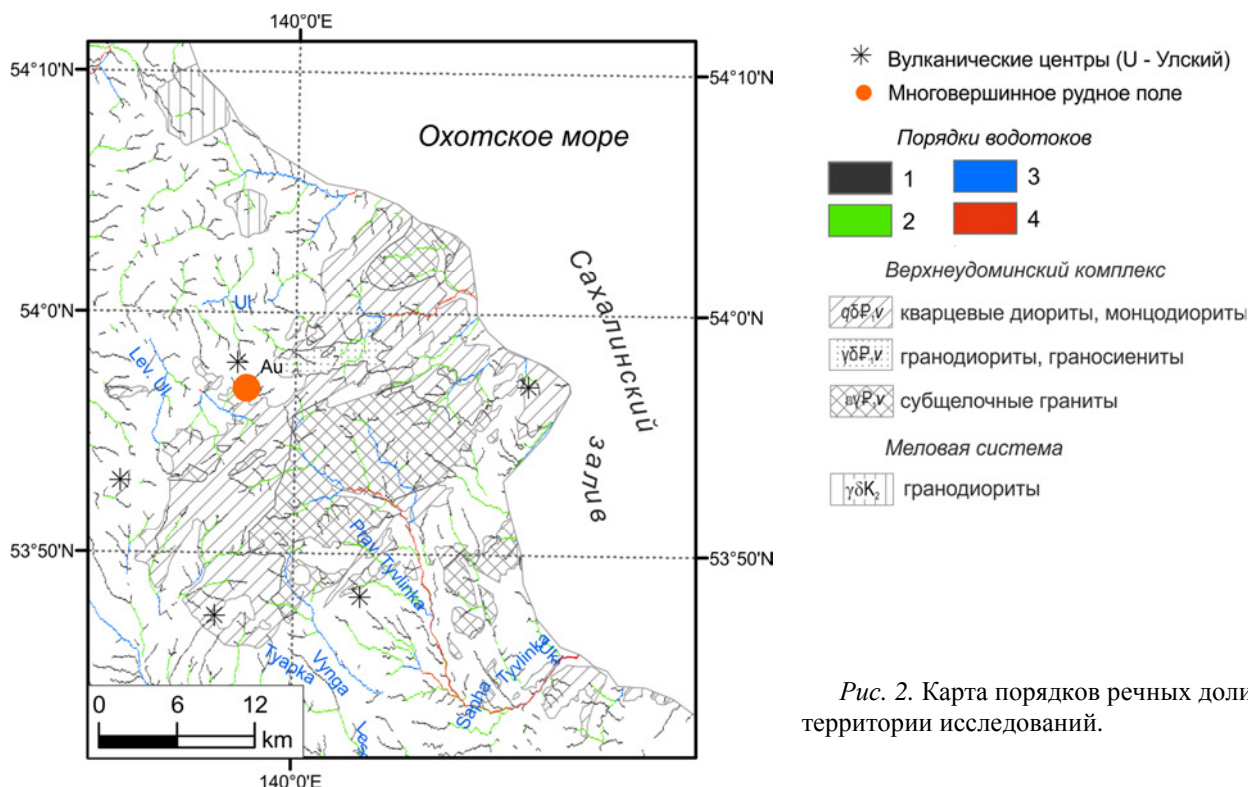


Рис. 2. Карта порядков речных долин территории исследований.

```

%open geotiff raster
[dem, Reference]=geotiffread('srtm.tif');
%auxillary data
[h w]=size(dem);
[X Y]=meshgrid((1:w), (1:h));
%colors for selected streams
c2 = 'r'; %2nd order stream
c3 = 'g'; %3rd order stream
%process DEM data
DEM = GRIDObj(X,Y,dem);
FD = FLOWObj(DEM,'preprocess','carve');
S = STREAMObj(FD,'minarea',100);
S2 = modify(S,'streamorder',2);
S3 = modify(S,'streamorder',3);
%convert flowObj into matrix data
rivers2 = STREAMObj2GRIDObj(S2); %2nd order of rivers
[river_mat2,X,Y] = GRIDObj2mat(rivers2);
river_mat2 = flipud(river_mat2);
%convert flowObj into matrix data3
rivers3 = STREAMObj2GRIDObj(S3); %3rd order of rivers
[river_mat3,X,Y] = GRIDObj2mat(rivers3);
river_mat3 = flipud(river_mat3);
river_orders=zeros(h,w);
river_orders(river_mat2)=2;river_orders(river_mat3)=3;
%output picture
imagesc(river_orders); colorbar;
%export
geotiffwrite('out.tif',river_orders,Reference,'CoordRefSysCode','EPSG:32653');
    
```

Рис. 3. Код Matlab, реализующей построение карты водотоков 2 и 3 порядка с сохранением в geotiff-файл.

В методе базисных поверхностей не используются водотоки 1-го порядка, базисная поверхность которых приближена к современному рельефу. Водотоки 4-го порядка являются наиболее древними, отражающими поведение глобального базиса эрозии и планетарные

изменения. В качестве средства оценки амплитуды неоген-четвертичных процессов и выявления соответствующих структур использовались водотоки 2-го и 3-го порядков, соответствующие им базисные поверхности и их разность (рис. 4).

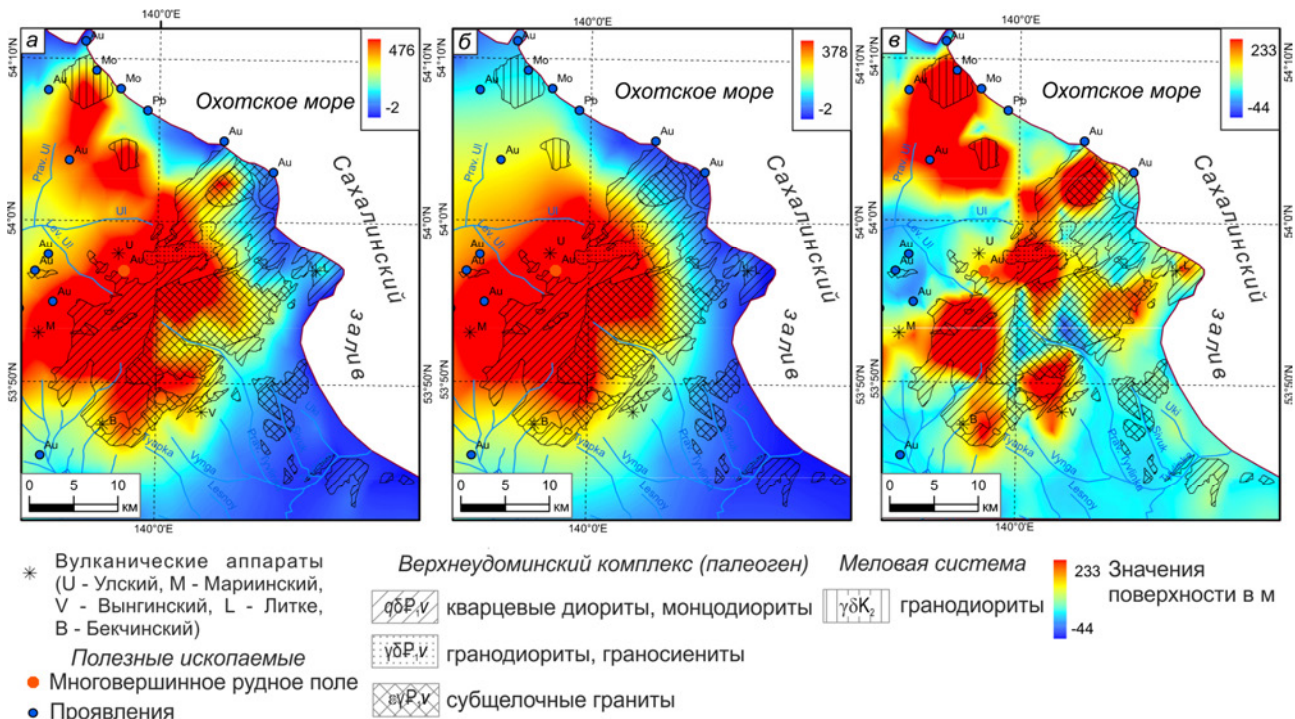


Рис. 4. Карты базисных поверхностей водотоков 2-го (а) и 3-го (б) порядков и их разностная поверхность (в).

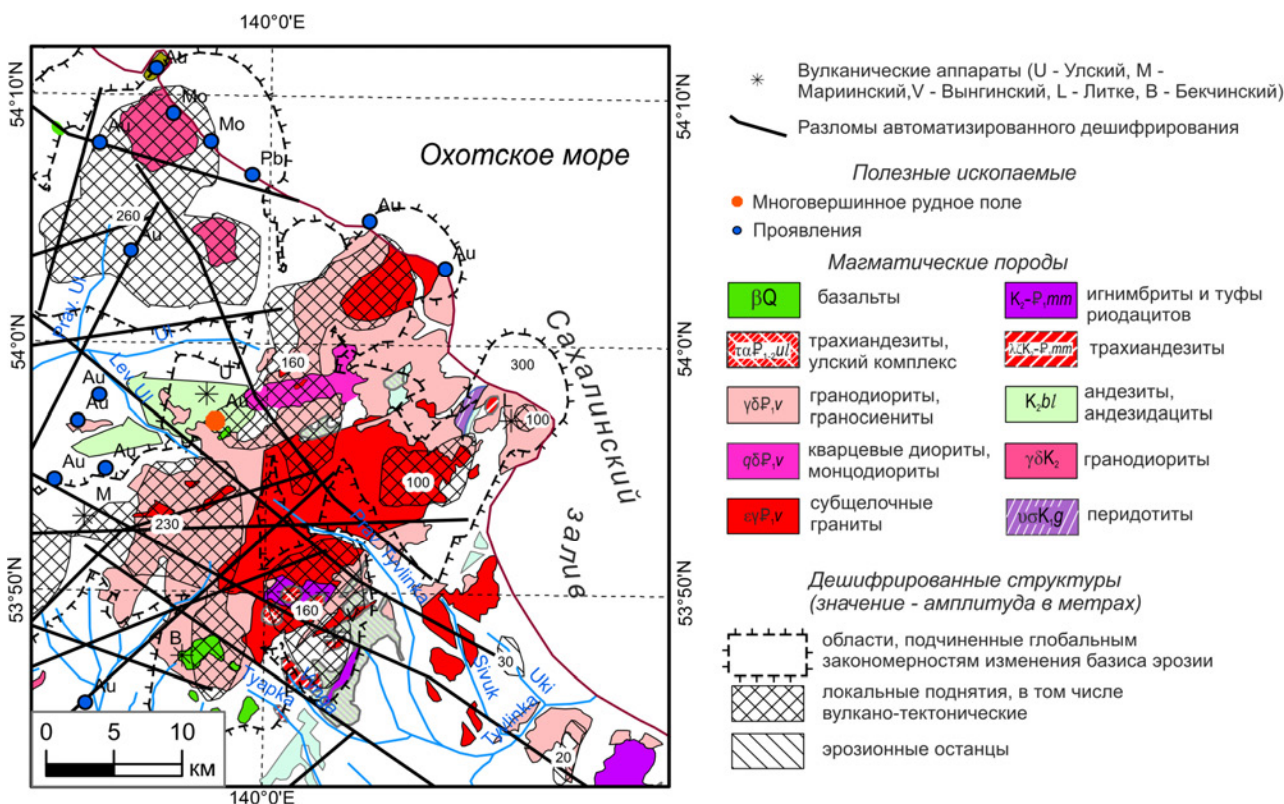


Рис. 5. Интерпретация схемы разности базисных поверхностей в сопоставлении с разрывной тектоникой Бекчуулского ВПС.

Разностная поверхность (см. рис. 4в) отражает величину вертикального перемещения локального базиса эрозии с момента заложения водотоков второго порядка до заложения третьего, т.е. изменения, произошедшие на неоген-четвертичном этапе.

Рассчитанные базисные поверхности и их разность сопоставлялись с вещественными комплексами территории, а заверялись сведениями, полученными в результате геологической съемки дна Сахалинского залива Охотского моря [9].

При составлении итоговой схемы дешифрирования также использовались сведения о разрывной тектонике. Для ее выявления дешифрировались линейные объекты космических снимков Landsat 8 (канал 7, пространственное разрешение 30 м), с использованием Matlab и средств, описанных ранее [15].

Анализ позволил выявить участки аномалий разностей базисных поверхностей второго и третьего порядка, превышающих амплитуды понижения глобального базиса эрозии. Таковым принят уровень Охотского моря в максимальную регрессию до изобаты 120 м, установленную в зырянское оледенение, по результатам геологической съемки шельфа масштаба 1:200000 [9]. Эти участки, интерпретируемые нами как зоны активизации тектонических движений в послепозднепалеогеновое время, вынесены на итоговую схему дешифрирования (рис. 5).

В результате анализа разности базисных поверхностей водотоков второго и третьего порядков выявлены следующие генетические разновидности объектов:

- Эрозионные останцы;
- Зоны локальных поднятий, в том числе тектономагматических;
- Площади, подчиненные глобальным закономерностям изменения базиса эрозии (гляциоэвстатическим).

По результатам анализа схемы интерпретации (см. рис. 5) получены свидетельства активности тектонических структур Бекчиулского массива и его обрамления на неоген-четвертичном этапе. Примечательно, что локальные поднятия находятся на пересечении крупных линейных разрывов. Исследовательский интерес вызывают факторы, обусловившие их формирование, которые могут быть учтены в модельных минарагенетических построениях.

Обсуждение результатов

Особый интерес с точки зрения использования дистанционных данных для регионального прогноза месторождений полезных ископаемых представляют собой эрозионные останцы и полигенетические зоны локальных поднятий. На территории северного фланга ВСАВПП эти объекты соответствуют обнаженным, частично обнаженным и погребенным массивам (выраженным в геофизических полях), а также эродированным вулканическим аппаратам.

Важным фактом является пересечение "Главной" рудоносной зоны Многовершинного поля телами кварцевых диоритов-гранодиоритов магматической

фазы Бекчиулского массива, а также неравномерный эрозионный срез рудоносных зон [16].

Это может объясняться холодным протрудированием вмещающих осадочных и вулканогенно-осадочных пород мелового возраста гранитоидами ВПК. Однако кинематика процесса, а равно и источник напряжения остаются невыясненными.

Процессы протрудирования вмещающих пород, и, соответственно, формирования локальных поднятий, сопряженные с относительным понижением базисов эрозии, выражаются в рельефе увеличением относительных превышений тальвегов речных долин над водоразделами. Возможно, процессы, способствовавшие как раскрытию трещин, так и эрозии рудоносных зон, являются относительно молодыми, послепалеоценовыми и могут выражаться в современном рельефе. Накопление и разгрузка напряжений в активных тектонических структурах отражены в новейшей сейсмике: с территорией, прилегающей к Бекчиулскому массиву, совмещаются эпицентры современных (1962-2004 г.) мелкофокусных (<10 км) и маломagnitude (<4,9 магнитуд) землетрясений [2, 17]. Юго- и Северо-западные фланги Бекчиулской ВПС характеризуются наибольшим превышением водоразделов, а значит наибольшей потенциальной энергией рельефа, накопленной в результате горообразующих процессов в постпалеоценовое время. На схеме интерпретации контрастно выделяются и молодые неоген-четвертичные вулканические центры (см. рис. 5).

Помимо прогноза парагенетически связанного с магматизмом оруденения, важным является построение моделей горообразования, приведшего к формированию упоминаемых аномалий разностных поверхностей, интерпретируемых нами как новейшие поднятия. Возраст этих процессов, с учетом возраста водотоков – позднеплиоцен-четвертичный. В соответствии с этим можно говорить о продолжающейся тектонической активности ВСАВПП.

Интересно соответствие "лейкократовому" ядру Бекчиулского массива контрастного гравитационного минимума (<-10 мГл) и окаймление его более основными и плотными породами [18]. Магнитная восприимчивость пород также возрастает с увеличением их основности [14, рис. 4]. Это позволяет предположить применимость реологических (вязкопластических) моделей для объяснения формирования периферических поднятий за счет всплывания менее плотного ядра массива, что не противоречит приводимым фактам.

Выводы

В пределах Бекчиулской ВПС в неоген-четвертичное время развивались локальные поднятия, приведшие к неравномерному эрозионному срезу и дифференцированной обнаженности рудных зон Многовершинного месторождения.

Сопоставление аномалий разностной поверхности со значениями зырянской регрессии Охотского моря позволило оценить некоторые поднятия как результат активного воздымания. Это означает, что рассматри-

ваемые объекты являются активными морфоструктурными, а не остаточными морфоскульптурными образованиями.

Использованный подход позволяет, при условии привлечения дополнительной геолого-геофизической информации, строить модели формирования и развития сложных вулcano-тектонических сооружений, а также прогноза связанного с ними оруденения.

Благодарности

Автор искренне благодарит д.г.-м.н., профессора Хомича В. Г. и к.г.-м.н. Фатьянова И. И. за ценные замечания, рекомендации и плодотворную дискуссию в процессе работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Многовершинное месторождение / Региональный портал Дальний Восток. Недропользование. URL: http://nedradv.ru/mineral/places/mineral-objinfo.cfm?id_obj=6523d3f2a049e7e13f19f0300e032c9d (Дата обращения: 17.07.2017)
2. Ханчук, А. И. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. Т. 1/2 / – Владивосток: Дальнаука. – 2006. – 982 с.
3. Геологическая карта СССР N-54-XIV-XV / Под ред. Р. А. Кочановой, Д. А. Аронсона // ВСЕГЕИ. – 1969.
4. Геологическая карта СССР N-54-XX / Под ред. Р. А. Кочанова, Д. А. Аронсона // ВСЕГЕИ. – 1970.
5. Геологическая карта Российской Федерации N-54-XXI / Под ред. В. А. Кайдалова, В. Г. Роганова // Роснедра. – 2013.
6. Фатьянов, И. И. Бекчиульское золотоносное вулcano-плутоническое сооружение: магматические ассоциации, особенности развития, схема формирования (Нижнее Приамурье) / И. И. Фатьянов, В. Г. Хомич // Тихоокеанская геология. – 1997. – Т.16. – №1. – С. 32–44.
7. Фатьянов, И. И. Нетрадиционный метод типизации руд золотосеребряных месторождений (на примере Многовершинного месторождения, Нижнее Приамурье) / И. И. Фатьянов, В. Г. Хомич, Н. Г. Борискина // Вестник ТПУ. – 2007. – № 304. – С. 211–217.
8. Khomich, V. G. Characteristics and genesis of the Mnogovershinnoe gold-silver deposit, SE Russia. *Ore Geology Re-*

views. – 2017. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.01.017> (Дата обращения: 23.03.2017).

9. Кайдалов, В. А. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Серия Николаевская, лист N-54-XXI. Объяснительная записка. / В. А. Кайдалов, Б. А. Новоселов, Л. Б. Максимова // – СПб. – 2001. – 247 с.
10. Философов, В. П. О значении порядков долин и водораздельных линий при геолого-географических исследованиях / В. П. Философов // Вопросы морфометрии. – № 2. – Саратов. – СГУ. – 1967. С. 4–67.
11. Философов, В. П. Основы морфометрического метода поисков тектонических структур / – Саратов. – СГУ. – 1975. – 232 с.
12. Хортон Р. Е. Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. Гидрофизический подход к количественной морфологии // М.: Государственное издательство иностранной литературы, 1948. – 158 с.
13. Strahler, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology / A. N. Strahler // – 1957. *Eos Trans. AGU.* – Vol. 38(6), – p. 913–920.
14. Schwanghart, W. TopoToolbox: a set of Matlab functions for topographic analysis. *Environmental Modelling & Software / W. Schwanghart, N. J. Kuhn* // – 2010. – Vol. 25, – p. 770–781.
15. Шевырёв, С. Л. Алгоритмизация дистанционного анализа структурно-вещественных парагенезисов золоторудных районов (Многовершинное рудное поле, Хабаровский край) / С. Л. Шевырёв // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 2017. – № 2. – С. 115–121.
16. Фатьянов, И. И. Реконструкция рудообразующей системы Многовершинного золото-серебряного месторождения (Нижнее Приамурье) по данным о строении рудоносных зон по изотопным исследованиям / И. И. Фатьянов, В. Г. Хомич, Н. Г. Борискина // Тихоокеанская геология. – 2009. – Том 28. – №1. – С. 21–31.
17. Тихонов, И. Н. Мелкофокусная сейсмичность Охотского моря и ее вероятная тектоническая природа / И. Н. Тихонов, В. Л. Ломтев // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2014. – Т.41. – №1. – С.25.
18. Петрищевский, А. М. Тектоника Нижнего Приамурья. / А. М. Петрищевский // Тихоокеанская геология, – №1. – 1984. – С.62–67.

Дальневосточный геологический институт (ДВГИ ДВО РАН),

Дальневосточный федеральный университет (ДФУ), Владивосток

Шевырёв Сергей Леонидович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, доцент

E-mail: shevirev@mail.ru

Far East Geological Institute

Far Eastern Federal University, Vladivostok

Shevirev S. L., Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, senior researcher, associate professor

E-mail: shevirev@mail.ru