

УДК 551.432+553.04

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА ПРИ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ НИЖНЕАМУРСКОЙ ПРОВИНЦИИ

Г.З. Гильманова¹, М.Ю. Носырев¹, А.Н. Диденко^{1,2}

¹Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН,
680000, Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65, Россия

²Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 1, Россия

Для центральной части Нижнеамурской провинции выполнен анализ цифровой модели рельефа (SRTM03). По комплексу признаков выделена Лимури-Амгунская кольцевая структура, где расположены золоторудные Пильда-Лимурийский и Херпучи-Вьюнский районы и Албазинский узел, в пределах которых известны как крупные промышленные месторождения золота, так и большое количество мелких месторождений и рудопроявлений. Проанализированы особенности распределения линейных и кольцевых элементов рельефа, дана их геологическая интерпретация и показано пространственное соотношение с ними месторождений и рудопроявлений золота. Показана связь морфологической выраженности кольцевой структуры с глубинным строением региона; структура имеет магматогенную природу, характеризуется высокой концентрацией интрузивных тел. Согласно литературным данным по возрасту и составу магматических комплексов региона, образование кольцевой структуры связано с процессами новообразования и преобразования земной коры и верхней мантии в конце позднего мела—начале палеоцена в надсубдукционной геодинамической обстановке.

Цифровая модель рельефа, кольцевая структура, месторождения золота, металлогения, Сихотэ-Алинь

USE OF DIGITAL ELEVATION MODELS IN METALLOGENIC INVESTIGATIONS ON THE EXAMPLE OF THE CENTRAL PART OF THE LOWER AMUR PROVINCE

G.Z. Gil'manova, M.Yu. Nosyrev, A.N. Didenko

The digital elevation model (SRTM03) of the central part of the Lower Amur province is analyzed. The Limuri-Amgun ring structure is identified on the basis of a set of features, and it is also the location of the Pilda-Limuri and Kherpuchin-V'yunsky gold-ore regions, as well as the Albazino deposit, known for large industrial gold deposits and many small deposits and ore occurrences. The distribution of linear and ring elements of the relief is analyzed and geologically interpreted, and its spatial relationship with gold deposits and ore occurrences is shown. The relationship between the morphological severity of the ring structure and the deep structure of the region is shown. It is revealed that the structure is magmatic and characterized by a high concentration of intrusive bodies. According to the reference data on the age and composition of the igneous complexes of the region, the formation of the ring structure is associated with the processes of neoformation and transformation of the Earth's crust and upper mantle during the end of the Late Cretaceous and the beginning of the Paleocene in a suprasubduction geodynamic setting.

Digital elevation model, ring structure, gold deposits, metallogeny, Sikhote-Alin

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что дуговые и кольцевые структуры больших размеров в первую очередь связаны с гранитогнейсовыми куполами и сводовыми магматическими образованиями над внедряющимися системами крупных интрузивов и вулканическими построениями, и рельеф является одним из основных индикаторов их развития [Волчанская, 1981; Гуревич, 2010; Горный и др., 2014]. Но выделение крупных структур кольцевых и овальных по морфологии достаточно проблематично на обычных геологических и физико-географических картах. Поэтому в последние годы при геолого-структурном и геоморфологическом анализе, поиске кольцевых структур и связанных с ними месторождений применяется большое количество программных продуктов, использующих различные алгоритмы выделения кольцевых структур [Иванов и др., 2020; Willemse et al., 2020; Eldosouky et al., 2021; и др.]. Одним из важных источников информации для целей геолого-структурного дешифрирования является цифровая модель рельефа (ЦМР).

© Гильманова Г.З., Носырев М.Ю., Диденко А.Н.

✉ e-mail: gigulya@yandex.ru

Нижнеамурская минерагеническая зона расположена в северной части Сихотэ-Алиньского орогенного пояса. Ее основным полезным ископаемым является золото [ГИС-Атлас..., 2021]. Зона условно может быть разделена на три участка: 1) северный, представленный в основном эпitherмальными золотыми месторождениями, включая эксплуатируемые Многовершинное и Белая Гора; 2) центральный, насыщенный золотыми месторождениями и проявлениями орогенного или связанного с интрузиями типов; 3) южный, в целом слабоизученный, но с высокими перспективами на медно-порфировое и золотое орудование. Именно здесь было открыто медно-порфировое месторождение мирового класса Малмыж.

Основное количество известных месторождений и рудопроявлений золота входит в состав Пильда-Лимурийского (Au, Mo, W, Sn) и Херпучи-Вьюнского (Au, Mo, W) рудных районов [ГИС-Атлас..., 2021]. Эти месторождения в основном не крупные, на данный момент непромышленные. В последние годы здесь было открыто месторождение с высоким промышленным потенциалом — Чульбаткан, ресурсный потенциал которого для золота 50 т [Алексеев, Старостин, 2017]. В 30 км к западу от границы зоны расположено крупное месторождение золота Албазино, балансовые запасы золота и серебра по категориям C1 и C2 для которого составляют 20 и 24 т соответственно [Государственный баланс..., 2020а,б]. Все это указывает на необходимость дополнительных исследований закономерностей локализации золотой минерализации в этой области и переоценки ее перспектив.

При анализе геопотенциальных полей и построенных на их основе глубинных моделей земной коры и литосферной мантии центральной части Нижнеамурской минерагенической зоны между реками Лимури на юге и Амгунь на севере была выделена структура овальной формы, отличающаяся специфическими глубинными характеристиками и названная нами Лимури-Амгуньская кольцевая структура (ЛАКС) [Носырев и др., 2023]. Выделенная структура охватывает как центральную часть Нижнеамурской минерагенической зоны, так и прилегающий с запада Албазинский золоторудный узел, включаемый уже в состав Монголо-Охотской минерагенической провинции [ГИС-Атлас..., 2021].

Все это определило актуальность проведения более детального анализа данной площади современными методами обработки рельефа земной поверхности с прогнозными и поисковыми целями. Поэтому основной целью настоящей работы являлось применение современных методов анализа ЦМР для решения задач геолого-структурного дешифрирования и поиска новых прогнозных критериев в пределах золоторудных территорий юга Дальнего Востока России, одной из которых является Нижнеамурская минерагеническая зона Сихотэ-Алиньского орогенного пояса.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ И НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ЕГО ПРЕДЕЛАХ

Рассматриваемая площадь располагается в северной части Сихотэ-Алиньского региона (рис. 1, а), на границе нескольких террейнов, сложенных юрскими и меловыми осадочными образованиями и входящих в состав Сихотэ-Алиньского (Журавлевско-Амурский и Баджальский террейны) и Монголо-Охотского (Ульбанский террейн) орогенных поясов. В палеогеодинамическом аспекте ее положение отвечает фрагменту поздне меловой активной континентальной окраины [Khanchuk, Kemkin, 2015], процессы на которой в значительной степени определили особенности глубинного строения данной территории. Упрощенная геологическая карта площади, составленная нами на основе геологических карт м-ба 1:1 000 000 [Государственная..., 2007а, 2007б, 2009а, 2009б, 2016а, 2016б, 2017а, 2017б], показана на рис. 1, б.

На площади развиты преимущественно юрско-меловые осадочные и в меньшей степени вулканогенные образования. Западная часть сложена в основном юрскими осадками, лишь на юго-западе наблюдается тектонический блок, где на поверхность выходят отложения позднего карбона и триаса. В этой же части исследуемой площади выделяются обширные поля вулканогенных пород, относимых к омельдинскому и малоомельдинскому комплексам [Государственная..., 2007а, 2007б, 2009а, 2009б, 2016а, 2016б, 2017а, 2017б]. Первые представлены лавами и туфами андезитов, андезибазальтов, реже дацитов. Породы малоомельдинского комплекса в целом более кислые — это дациты, риодациты, андезиты и их туфы. В составе обоих комплексов наблюдаются субвулканические интрузии. Данные образования объединяются в Эвурский вулканоплутонический ареал.

Самыми молодыми вулканическими образованиями на территории являются миоценовые базальты, андезибазальты, трахиандезибазальты, трахиандезиты Аякитской толщи одноименного вулканогенного комплекса. Они ограничено развиты в западной части площади и выполняют придолинные участки бассейнов рек Эвур, Бичи, Харпичикан.

На рассматриваемой территории широко распространены интрузивные образования поздне мелового возраста. Они объединяются в три интрузивных комплекса: нижнеамурский, эвурский, ульбанский [Государственная..., 2007а, 2007б, 2009а, 2009б, 2016а, 2016б, 2017а, 2017б]. В восточной части площади преобладают интрузивные породы нижнеамурского комплекса, в западной — развиты породы эвурского и ульбанского комплексов. Они представлены как крупными массивами, так и сериями неболь-

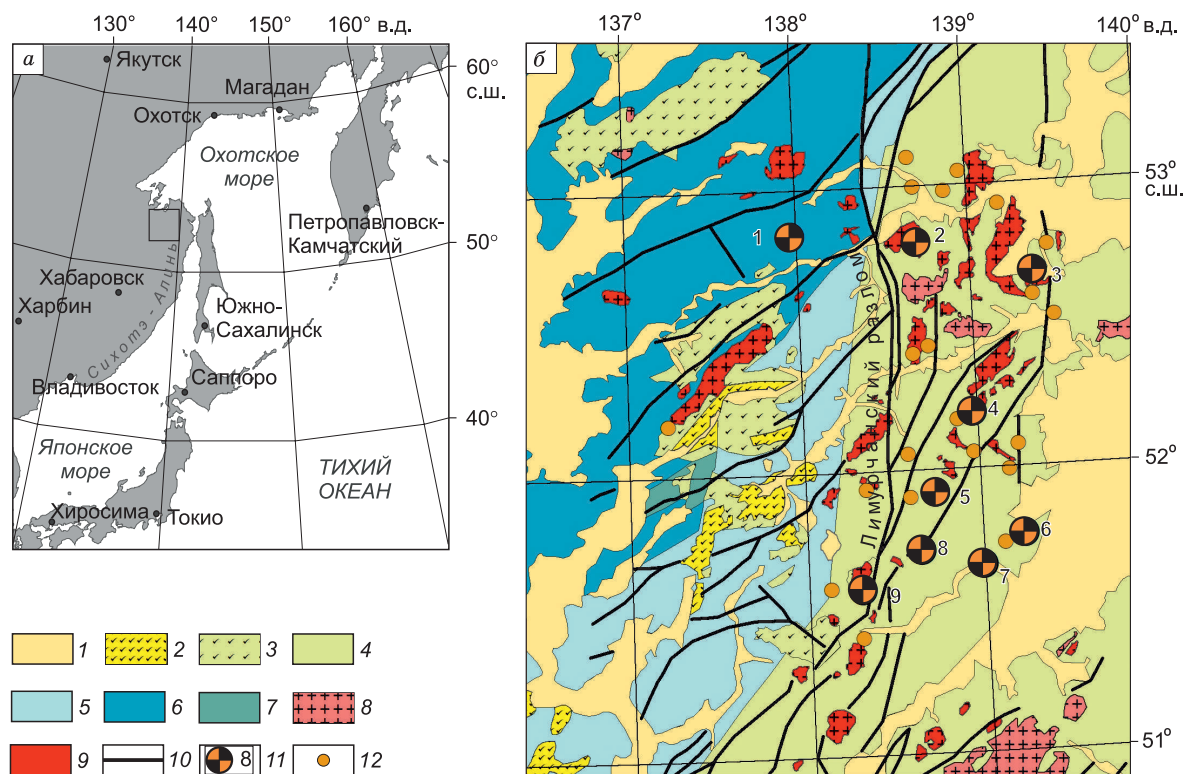


Рис. 1. Схема расположения площади исследований (а) и геологическая карта (б), по [Государственная..., 2006а, 2007а, 2016а, 2017а] с упрощением.

б: 1 — четвертичные отложения нерасчлененные; 2 — базальты, андезитобазальты неогеновые (аякитский вулканический комплекс); 3 — верхнемеловые вулканогенные образования, андезиты, дациты (омельдинский вулканический комплекс), дациты, риолиты (малоомельдинский вулканический комплекс), их экструзивные и субвулканические аналоги; 4 — верхнемеловые осадочные образования (горинская, пионерская, пиванская, горнопротокская свиты); 5 — верхнеюрские осадочные образования (падалинская, силинская свиты); 6 — нижнесреднеюрские осадочные образования (михалицинская, улыбинская, эльгонская свиты); 7 — верхнекарбоновые осадочные образования (крестовая, берендинская свиты); 8 — раннепалеогеновые граниты (бекчиулский интрузивный комплекс); 9 — позднемеловые интрузии: гранодиориты, диориты, граниты (нижнеамурский, эвурский интрузивные комплексы); 10 — основные разломы; 11 — месторождения золота (1 — Албазинское, 2 — Чульбаткан, 3 — Октябрьское, 4 — Покрово-Троицкое, 5 — Агние-Афанасьевское, 6 — Дяппе, 7 — Мартемьяновское, 8 — Учаминское, 9 — Делькен); 12 — рудопроявления золота.

ших тел и даек. Все три комплекса многофазны: начальная фаза представлена габбро-диоритами и диоритами, вторая основная — почти полностью гранодиоритами, третья заключительная — гранитоидами. Последние образуют небольшие по площади интрузивные массивы (до 5 км²) и мелкие (внемасштабные) трещинные тела, обычно залегающие среди пород краевых зон крупных массивов второй фазы. Все интрузивные массивы характеризуются широкими ореолами приконтактовых изменений вмещающих пород, в первую очередь ороговикованием. В центральной части площади наблюдаются также два гранитоидных массива палеоценового возраста, относимых к бекчиулскому комплексу.

Данных по абсолютному возрасту интрузивных комплексов недостаточно. Данные U-Pb метода по цирконам имеются только для нижнеамурского и бекчиулского комплексов. Ульбанский, эвурский комплексы охарактеризованы только K-Ar датировками. Для нескольких массивов пород нижнеамурского комплекса на территории исследований U-Pb методом по цирконам получены даты в диапазоне 84.7—93.5 млн лет [Государственная..., 20166]. Позднемеловой возраст гранитоидов этого комплекса определяется также исходя из их соотношений с палеонтологически датированными стратифицированными образованиями. Возраст интрузивных пород улыбанского комплекса по многочисленным датировкам K-Ag методом лежит в интервале 67—84 млн лет, что также соответствует верхнему мелу. Возраст гранитов эвурского комплекса по данным K-Ag метода находится в интервале 71—73 млн лет, а в одном случае — до 114 млн лет [Государственная..., 20076, 20176].

Возрастных датировок пород бекчиулского комплекса для массивов, расположенных непосредственно на рассматриваемой площади, нет. Для ближайшего, находящегося восточнее Тумнинского массива, результаты геохронологических исследований, проведенных U-Pb методом по цирконам пяти проб, укладываются в диапазон 82—86 млн лет, что соответствует верхней части позднего мела (кам-

пан—сантон). Эти данные свидетельствуют о полихронности Тумнинского массива, в котором ряд тел относился к нижеамурскому комплексу. U-Pb датировки цирконов из пород Бекчиулского массива, расположенного севернее, следующие: 65—75 млн лет — гранодиориты второй фазы; 64—66 млн лет для гранитов и лейкогранитов третьей фазы [Государственная..., 20166, 20176].

Указанные выше датировки для Бекчиулского интрузивного массива подтверждены и в недавно опубликованной работе [Alexandrov et al., 2023], согласно которой для гранодиорита второй и гранита третьей фаз бекчиулского комплекса был получен U-Pb возраст 73.8 ± 0.4 и 66.2 ± 0.3 млн лет соответственно. Показано, что эти магматические импульсы синхронны времени рудообразования месторождения Многовершинное и происходили в результате субдукции плиты Изагаги под окраину континента [Alexandrov et al., 2023].

На рассматриваемой площади выделяются разломы двух основных направлений — меридиональные и северо-восточные (см. рис 1, б).

Основным полезным ископаемым площади является золото, здесь известно много коренных месторождений этого металла разного масштаба и степени изученности. Золотая минерализация представлена орогенными месторождениями (исключая месторождение Чульбаткан), локализованными в осадочных и интрузивных образованиях [Гамянин и др., 1998]. Эпитермальной золотой минерализации, широко развитой севернее и западнее на рассматриваемой площади, не обнаружено.

Наиболее крупное из известных месторождений — *Албазинское*, разведанное в 2007—2008 гг. и сейчас разрабатываемое АО «Полиметалл». Месторождение располагается в пределах глубоко эродированной палеокальдеры [Трушин, Кириллов, 2018]. Среди пород терригенного основания в вулканической структуре картируются многочисленные дайки и штоки интрузивных пород преимущественно умеренно кислого состава. Интрузивные тела обычно невелики (до 4—5 км²), принадлежат к субвулканической фации, характеризуются лакколито- или лополитообразной формой. Рудные зоны локализуются в разломных структурах растяжения меридионального и северо-западного простирания. Наиболее значительные концентрации золота связаны с центральными частями ореолов березитизации, с линейными штокверками кварцевых и кварц-карбонатных прожилков с сульфидной минерализацией. Количество сульфидов в рудах 2—6 %. Минерализация проявлена как в песчаниках, так и в дайках гранодиоритов. По данным [Трушин, Кириллов, 2018], золотое оруденение в рамках российской классификации может быть отнесено к золото-сульфидно-кварцевой формации, золото-малосульфидному минеральному типу. Месторождение сформировано в позднемеловое время и генетически связывается с заключительным этапом магматической активности. По мнению [Трушин, Кириллов, 2018], в центре кальдеры выделяется палеомагматический очаг (субвулканическое тело Брусничное), с которым непосредственно связано рудообразование. При этом породы в кальдере характеризуются повышенной нарушенностью и гидротермальной проработкой. В целом отмечается, что одним из факторов, способствовавших образованию крупного золотого месторождения, наряду со структурно-литологическими, является наличие специализированных на золото гранодиоритов нижеамурского комплекса.

В последние годы в рассматриваемом районе открыто крупное месторождение золота *Чульбаткан*, которое находится в северной части площади в долине р. Амгунь. Оно расположено в сдвиговой зоне на контакте Чульбатского массива плагиогранитов и ороговикованных песчаников и алевролитов горинской и пионерской свит и контролируется разломами восточно-северо-восточного простирания, опирающимися основной разлом северо-восточного простирания [Алексеев, Старостин, 2017]. Возраст Чульбатского массива оценивается ими в интервале 75—91 млн лет. Месторождение представлено системой крутопадающих минерализованных зон. Основная их часть находится в интрузии, и лишь редкие маломощные тела на северо-восточном фланге локализованы в ороговикованных терригенных породах. Гидротермальные изменения представлены березитами и наложенным на них более поздним окварцеванием. Также широко развита наиболее поздняя карбонатизация. Единственный полезный компонент в руде — золото. Месторождение интересно также тем, что, по мнению [Алексеев, Старостин, 2017], его можно отнести к классу объектов, связанных с восстановленными интрузиями. В российской классификации оно может быть рассмотрено как представитель убогосульфидной кварц-золоторудной формации.

Несколько небольших месторождений золота располагаются в восточной части площади. Это — Агние-Афанасьевское, Покрово-Троицкое, Октябрьское, Дяппе, Мартемьяновское, Учаминское, Делькен.

Агние-Афанасьевское месторождение [Моисеенко, Эйриш, 1996, Юшманов, 2018а, 2018б] расположено в надынтрузивной зоне гранитоидного массива нижеамурского комплекса. Минерализованные малосульфидные кварцевые жилы локализованы в песчано-глинистой толще раннемелового возраста (пионерская свита) на северо-западном крыле Пильдинской антиклинали. Собственно жилы состоят из брекчированных обломков вмещающих пород, сцементированных кварцем. Простирание их преимущественно северо-восточное, углы падения 20—40°. Жилы располагаются кулисообразно по простиранию и падению, часто соединяются между собой тонкими прожилками, образуя жильную зону, прослежен-

ную по простиранию до 1 км, по падению на 0.5 км. Непосредственно на рудном поле и по его периферии распространены дайки и штоки диоритов, кварцевых диоритов.

Месторождение *Дяппе* [Моисеенко, Эйриш, 1996; Юшманов, 2016] расположено в юго-восточной части рассматриваемой площади (см. рис. 1). Площадь месторождения сложена верхнемеловыми песчано-сланцевыми отложениями с преобладанием алевролитов, слагающих ядро синклинали. Осадочные отложения в центральной части месторождения прорваны штоком позднемеловых кварцевых диоритов, также по всей площади наблюдаются дайки позднемеловых и палеоценовых гранодиоритов, гранодиорит-порфиров, андезитов.

По структурно-морфологическим особенностям на месторождении Дяппе выделяются три типа рудных тел: кварцевые жилы, штокверки и минерализованные зоны дробления, в которых развита рассеянная золотая и золотосульфидная минерализация. Длина кварцевых жил 30—800 м, мощность от 4 до 45 см. Протяженность минерализованных зон 180—780 м, мощность до 200 м. Они сложены жильным кварцем, серицит-кварцевыми и кварц-серицитовыми метасоматитами, прожилково- и метасоматически окварцованными породами. Золото присутствует во всех типах гидротермально измененных пород. В пределах штокверков и минерализованных зон минерализация локализуется в областях наибольшей гидротермальной переработки пород.

Золоторудные тела залегают как в осадочных, так и интрузивных породах в экзо- и эндоконтактах интрузии кварцевых диоритов (площадь 0.8 км²) горы Дяппе. На удалении от интрузии количество метасоматически измененных вмещающих пород уменьшается. Как для кварцевых жил, так и минерализованных зон доминируют два направления простирания: складчатые простираются по азимуту северо-восток 55° и кососекущая складчатость — северо-восток 20—30°. Содержание золота в кварцевых жилах составляет 5—6 г/т, достигая очень высоких значений до сотен г/т в окисленных рудах в приповерхностном слое (примерно до глубины 5—15 м). Содержание золота в зонах минерализации, как правило, невысокое 0.1—0.9 г/т. Повышенные концентрации золота от 2.1 до 15.7 г/т наблюдаются в участках развития одиночных или серии кварцевых жил и штокверков в составе этих зон.

Месторождение *Делькен* [Моисеенко, Эйриш, 1996; Носырев и др., 2023] состоит из двух локальных участков (Буровой и Водораздельный), локализованных на северном окончании Делькенской рудоносной структуры, протягивающейся на 8 км в северо-восточном направлении. Зона насыщена малыми линейно-ориентированными телами кварцевых диоритовых порфиров и гранодиорит-порфиров позднемелового нижнеамурского комплекса, а также многочисленными дайками среднего и кислого состава и зонами прожилкового и метасоматического окварцевания. Ширина зоны измененных пород меняется в основном от 300 до 700 м и только в одном месте, на уч. Водораздельный, достигает 1400 м. Позиция месторождения определяется его расположением в южном экзоконтакте крупного Лимурчанского интрузива и в зоне расщепления южной оконечности регионального Лимурчанского разлома, высокопроницаемой для магматических тел и рудных растворов.

В структурном плане Делькенская площадь расположена в пределах антиклинали первого порядка. Она прослеживается с юго-запада на северо-восток на 9 км. На площади развиты разрывы северо-западного и субмеридионального направлений, представляющие собой ветви Лимурчанского разлома. Разломы залечены многочисленными дайкообразными интрузивными телами и дайками гранодиорит-порфиров, кварцевых диорит-порфиров.

Рудовмещающими являются зоны дробления и интенсивной трещиноватости пород, параллельные основной оси Лимурчанского разлома и сложенные гидротермально измененными породами. Среди широко развитых на площади гидротермальных образований основными являются прожилково-окварцованные и метасоматически измененные (березитизированные) породы. Стержневые зоны метасоматитов являются минерализованными (рудными) зонами, вмещающими золотое оруденение. Они залегают в виде линейно-вытянутых в северо-восточном или субмеридиональном направлении тел мощностью от 3—5 до 70 м, протяженностью от нескольких десятков до сотен метров.

Учаминское месторождение расположено в поле развития дислоцированных песчано-глинистых толщ горюнской, пионерской и пиванской свит верхнего мела. Осадочные породы смяты в крутые складки и прорваны позднемеловыми дайками лампрофиров и штоками гранит порфиров [Моисеенко, Эйриш, 1996]. По некоторым данным [Юшманов, 2018а, 2018б], месторождение расположено в надинтрузивной зоне гранитоидов позднего мела.

Рудная зона расположена в полосе катаклазированных пород меридионального направления, протягивающейся на 1.5 км при мощности от 0.8 до 30 м и наклоненной на восток под углами 30—75°. В пределах зоны выделяется несколько кварц-сульфидных жил мощностью 1.5—3.0 м. В местах выклинивания жил развиты сетчато-вкрапленные руды с нечеткими ограничениями. На нескольких десятках метров в обе стороны породы гидротермально изменены и пиритизированы. Соотношение кварца и сульфидов в рудах переменное, во многих случаях содержание последних может достигать нескольких десятков процентов. В жиле среднее содержание золота составляет 12.2 г/т, в сетчато-вкрапленных рудах — 7 г/т. Помимо золота в рудах в значительных количествах присутствуют мышьяк, свинец, вольфрам, олово.

Обобщая рассмотренные выше данные, а также данные работ [Моисеенко, Эйриш, 1996; Godfarb et al., 2014; Khanchuk, Kemkin, 2015], отметим несколько важных, по нашему мнению, особенностей, касающихся золотоносности региона.

1. Золотое оруденение в основном относится к золото-кварцевому или золото-сульфидно-кварцевому типам при чрезвычайно малом содержании сульфидных минералов. Только отдельные объекты характеризуются большим количеством сульфидной минерализации (Учаминское месторождение и некоторые рудопоявления).

2. Известные месторождения золота локализованы как в меловых, так и в юрских осадочных породах (Албазино, Делькен).

3. Для всех месторождений наблюдается отчетливая пространственная связь с позднемеловыми магматическими образованиями нижнеамурского комплекса. В пределах золоторудных полей на поверхности отмечаются в основном небольшие штоки и дайки интрузивных пород, на глубине предполагаются крупные интрузии гранитоидов. Только для месторождения Чульбаткан на поверхности наблюдается относительно крупная Чульбатская интрузия.

4. Генетически золоторудные месторождения связываются с процессами позднемелового магматизма и более определенно с гранитоидами нижнеамурского комплекса. Надо отметить, что в печати практически нет данных о возрасте золотой минерализации для месторождений рассматриваемого региона. Известно, что U-Pb возраст цирконов из гранодиорит-порфиров окрестностей Агние-Афанасьевского золоторудного месторождения составил 84.7 млн лет, что соответствует сантону. В целом, имея в виду тесную связь золотой минерализации с нижнеамурским интрузивным комплексом, можно предполагать возрастной диапазон ее формирования 70—90 млн лет.

5. Золотое оруденение локализуется как в осадочных породах, в том числе и ороговикованных (большая часть за исключением месторождения Чульбаткан), так и в магматических образованиях: дайках, штоках, более крупных интрузивных массивах.

6. Для всех месторождений в той или иной мере наблюдается структурный контроль, отмечается наличие рудоконтролирующих разломов различной ориентировки.

Тесная связь золотого оруденения рассматриваемой площади с позднемеловыми интрузиями дополнительно подчеркивает важность анализа цифровых данных рельефа в аспекте выделения локальных интрузивных структур.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА

Рельеф является одним из основных индикаторов развития геологических и геодинамических процессов в тектонически активных регионах, каким является Сихотэ-Алинь, протекающих не только в приповерхностном слое Земли, но и в литосфере в целом [Волчанская, 1981; Симонов, 2005]. Развивая это научное направление в ИТиГ ДВО РАН с 2010 г., сотрудники ГИС-группы разрабатывают и применяют на практике специализированную обработку цифровых моделей рельефа [Рыбас, Гильманова, 2011, 2019; Забродин и др., 2015; Горошко и др., 2015; Горошко, Гильманова, 2018]. В основу методики обработки изображений положено применение теории масштабного пространства [Witkin, 1983; и др.]. Получаемые изображения являются компонентами масштабных представлений при расчете различных операторов. Этими операторами могут быть как модуль первой производной по координате, характеризующий состояние поверхности по крутизне, так и второй производной по координате на поверхности (лапласиан поверхности Гаусса), идентифицирующие объекты линейной или куполообразной форм. Разгрузка от маскирующих деталей преобразованных радарных снимков способствует выявлению наиболее существенных крупных черт геологического строения региона. При такой обработке ЦМР хорошо проявляются текстурные особенности изображения, что также несет информацию об отдельных чертах геологического строения.

В наших работах мы используем и цветовую составляющую при создании синтезированных изображений. При формировании цветного RGB-изображения каждый из цветовых каналов является масштабным представлением исходного рельефа или его производных со своим масштабным параметром. При большом возможном количестве комбинаций цвета, масштабных параметров и операторов для дешифрирования выбираются синтезированные изображения, которые максимально наглядно выделяют или разделяют те или иные тектонические структуры при решении конкретных задач.

Дополнительно к анализу цифровых моделей рельефа с помощью авторской программы [Рыбас, Гильманова, 2019] выполнялась обработка полутоновых изображений по программе линеаментного анализа Winlessa [Zlatopolsky, 1997; Златопольский, 2014], которая позволяет рассчитать элементарные линейные элементы (ЭЛЭ), провести их статистическую обработку, исследовать их распределение и структуру по площади с построением роз-диаграмм, линий вытянутости (ЛВ) роз-диаграмм, карт плотности линейных элементов, а также протяженных линеаментов, отвечающих долинам, разломам, хребтам и т. д. В программе предусмотрена возможность проводить расчеты с разными размерами окна, что

позволяет анализировать как локальные текстурные особенности цифровых моделей рельефа, так и выявить региональные закономерности расположения основных его форм.

Рассмотренный выше комплекс обработки был применен для изучения рельефа центральной части Нижнеамурской минерагенической зоны. Исходным материалом для анализа послужили ЦМР (SRTM03 — *Shuttle Radar Topography Mission*), которые имеют следующие характеристики: размер ячейки 3×3 с (примерно 90 м) с исходной отметкой над уровнем моря, определяемой геоидом WGS84-EGM96 (Earth Gravitational Model) [Rabus et al., 2003; Liping Yang et al., 2011].

При анализе металлогенических особенностей территорий большое внимание уделяется выделению кольцевых структур, соразмерных с рудными полями, узлами, реже месторождениями [Гуревич, 2010]. Поэтому для выделения круговых форм рельефа применен модуль CET Porphyry Detection [Holden Eun-Jung et al., 2011; Willemse et al., 2020], разработанный для соответствующего анализа аномального магнитного поля при поисках месторождений порфирового типа. Данный модуль хорошо работает также при выделении круговых элементов в пределах любой поверхности, представленной в цифровом виде, в том числе и ЦМР. Процесс выявления овальных (круговых) структур включает несколько последовательных шагов: обнаружение подобных структур в рельефе, определение их центров, трассирование наиболее вероятных границ.

Полученные материалы были интегрированы в проект ArcGIS для совместного анализа с геолого-структурными данными, цифровыми моделями аномального магнитного и гравитационного полей, картами расположения рудных полей, месторождений и рудопроявлений.

ПОЛУЧЕННЫЕ ФАКТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе были проанализированы исходный рельеф, карты модуля градиента и синтезированные цветные изображения рельефа (рис. 2).

Модуль градиента рельефа (первая производная по координате) выявляет изменения углов наклона рельефообразующих форм, которые, в свою очередь, являются следствием геологических процессов и вещественного состава горных пород, слагающих рельеф. В геологическом отношении рассматриваемая площадь включает в себя террейны как Монголо-Охотского, так и Сихотэ-Алиньского орогенных поясов и делится примерно пополам Лимурчанским разломом меридиональной ориентировки (см. рис. 1). Этот разлом отчетливо проявлен на рис. 2, б—г. Разрешение исходных ЦМР и идентичность состава осадочных пород не позволяет идентифицировать отдельные разновозрастные террейны или особенности осадочного разреза в их пределах. Вместе с тем выполненный анализ показывает, что по тону и особенностям текстуры возможно выделение магматических образований на площади. Здесь светлым тоном и более контрастным рисунком выделяются участки рельефа с повышенной крутизной склонов (см. рис. 2, б). Еще ярче они выделяются на синтезированном цветном изображении (см. рис. 2, в). Наложение осей этих зон на контуры интрузивных и вулканогенных образований показало высокую степень их совпадения, часть этих осей линейны, другая — имеет дугообразную форму, образуя кольцевую структуру (см. рис. 2, г), весьма сходную с выделенной нами ранее для Нижнеамурской минерагенической зоны [Носырев и др., 2023]. На отдельных участках дешифрованные светлые удлиненные области превосходят по размерам закартированные интрузии, что, возможно, позволит согласно этим данным уточнить контуры рельефообразующих интрузивных тел.

Затем нами были рассчитаны карты плотности элементарных линейных элементов по программе WinLessa [Zlatopolsky, 1997] с разным размером окна — 64 (рис. 3, а) и 128 (см. рис. 3, б) пикселей. На картах видно, что генеральное простирание области повышенных значений плотности северо-западное, в то время как отдельных элементов ее составляющих — северо-восточное. Практически вся площадь ЛАКС характеризуется повышенной плотностью элементарных линейных элементов (см. рис. 3), что связано с повышенной степенью расчлененности рельефа в ее пределах. Наиболее поднятые участки с максимальным перепадом высот характеризуются большей изрезанностью рельефа и, соответственно, большим значением параметра плотности штрихов. Они занимают большую часть кольцевой структуры. В геологическом плане эти области соответствуют ареалам развития гранитоидов позднего мела — палеоцена (см. рис. 1, б), здесь же располагается большинство известных месторождений и рудопроявлений коренного золота (см. рис. 3).

Также в программе WinLessa [Zlatopolsky, 1997] были рассчитаны линии преобладающей вытянутости роз-диаграмм с окном 64 (рис. 4, а) и 128 пикселей (см. рис. 4, б). В целом структура ЛВ зависит от характера рельефа рассматриваемой площади. На расчлененном рельефе они почти всегда перпендикулярны простиранию основных хребтов, фиксируя водотоки низших порядков. Наблюдается прямая связь между густотой этих линий и степенью изрезанности рельефа, области наибольшей плотности линий вытянутости проявляются в относительно поднятых блоках, тогда как в областях пониженного рельефа происходит разрежение и прерывание пучков этих линий. Важную роль в картине их простран-

ственного распределения играют долины, которые в большинстве случаев подчеркиваются обрывом линий вытянутости, сменой направлений их простирания. В меньшей степени такая ситуация наблюдается вдоль хребтов.

Участки площади с относительно равномерной густотой линий вытянутости с точки зрения выделения разломной тектоники интереса не представляют. Определяющими для решения этой задачи могут быть следующие их особенности.

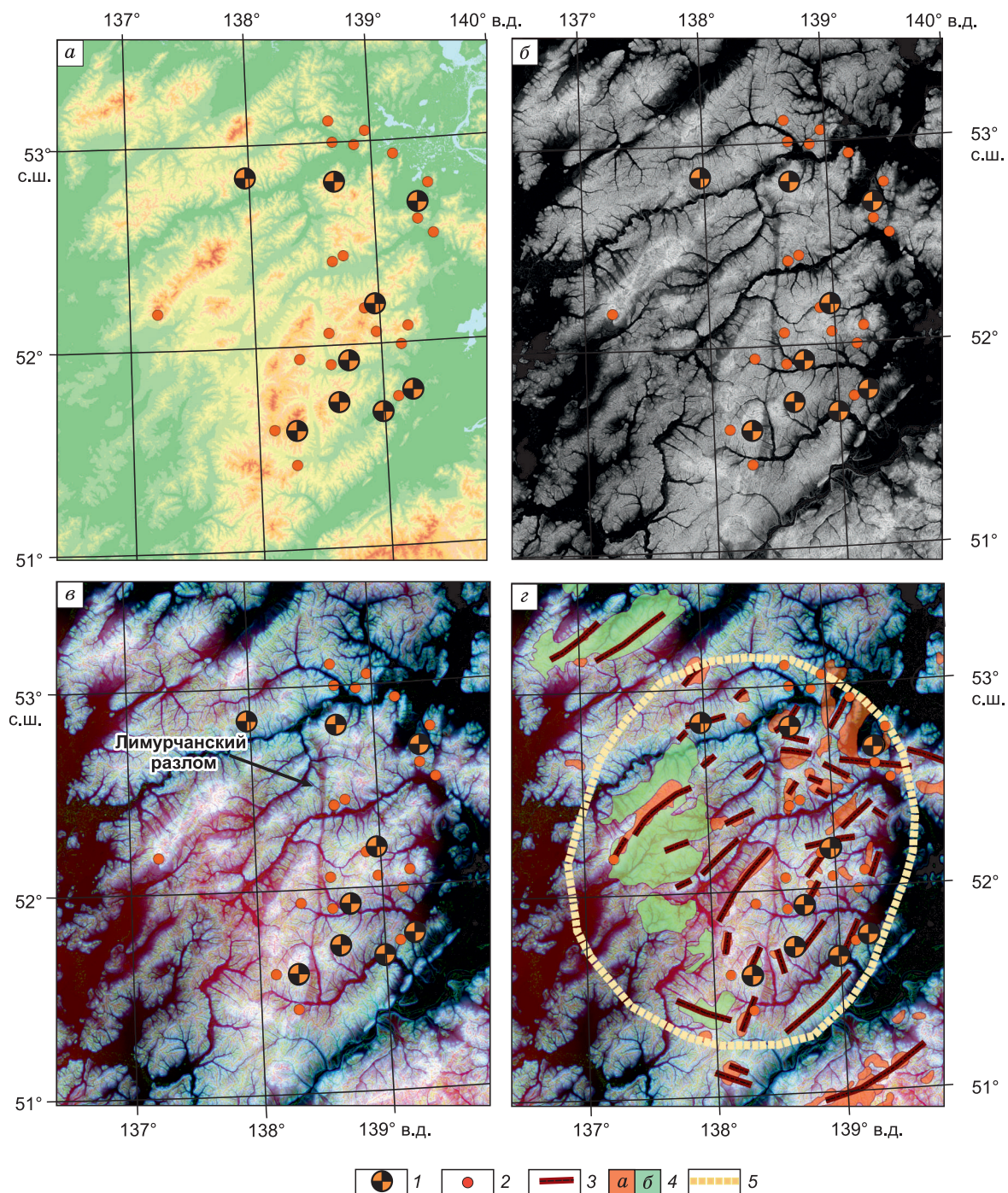


Рис. 2. Цифровая модель рельефа (а) и результаты ее обработки (б—г).

а — исходная ЦМР (SRTM03) с месторождениями (1), рудопоявлениями и пунктами минерализации (2) золота; б — модуль градиента рельефа; в — синтезированное цветное RGB изображение, в котором каналам соответствуют R — исходная ЦМР, G — модуль градиента с масштабным параметром $t = 1$, B — модуль градиента с масштабным параметром $t = 36$; г — то же, но с нанесенными линейными и дугообразными элементами (3), интрузивными (а) и вулканогенными (б) образованиями (4), границами ЛАКС (5). Здесь и далее: использована проекция Гаусс—Крюгера, зона 23, центральный меридиан 135° в.д.

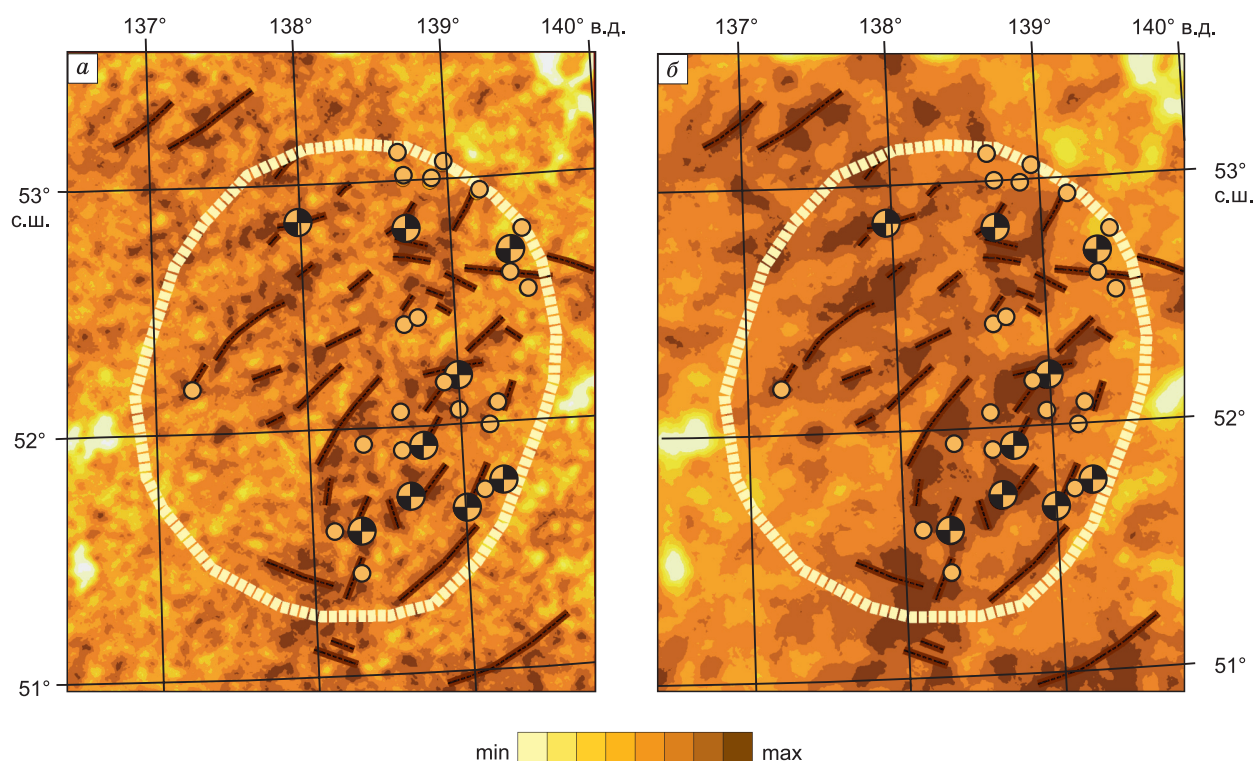


Рис. 3. Карты плотности элементарных линейных элементов (ЭЛЭ), рассчитанные с окном.

a — 64 пикселя; *б* — 128 пикселей. Показаны месторождения и рудопроявления золота в соответствии с условными обозначениями на рис. 1 и линейные и дугообразные элементы (см. рис. 2).

1. Локальное протяженное сгущение линий вытянутости определенного направления.
2. Пересечение такими «пучками» долин без нарушения корреляции или прерывания линий.
3. Резкие протяженные изгибы линий вытянутости.
4. Линии нарушения корреляции линий вытянутости, резкого уменьшения их плотности в случае

расположения вне долин или водоразделов.

Также надо заметить, что интерпретационный смысл с точки зрения выделения локальных элементов разрывной тектоники наблюдается только при небольшом размере окна, когда полученные неоднородности сопоставимы с рассматриваемыми геологическими структурами. При окнах больших размеров геологический смысл данного параметра на нашем уровне рассмотрения снижается.

Было выделено несколько возможных разломных зон. Они показаны на рис. 4, *a* (окно 64 пикселя) и имеют преимущественно северо-западное направление. Разломы такого направления слабо фиксируются геологическими данными, полученными при геолого-съемочных работах, однако выявляются при детальном изучении локальных участков. Так, они играют существенную рудолокализирующую роль на месторождении Албазино [Алексеев, Старостин, 2017] и, возможно, будут важны для анализа золотоносности кольцевой структуры.

Также по линиям нарушения корреляции линий вытянутости, рассчитанных с окном 128 пикселей, выделены две крупные разломные зоны меридиональной ориентировки (см. рис. 4, *б*). Одна из них (восточная) пространственно соответствует известному Лимурчанскому разлому. Вторая (западная) соответствует зоне глубинного разлома, выделяемого по геофизическим данным [Носырев и др., 2023]. По мнению всех исследователей, изучавших золотоносность района, разломы меридиональной ориентировки играют важную роль в размещении золотой минерализации в регионе [Моисеенко, Эйриш, 1996]. Поэтому выделенный западный разлом может свидетельствовать о перспективах золотоносности площадей, расположенных вдоль него к югу от месторождения Албазино.

Рассчитанные на первом этапе элементарные линейные элементы (см. рис. 3), являющиеся исходным материалом для выделения линеаментов, в программе WinLessa [Zlatopolsky, 1997] с помощью соответствующего модуля были объединены в линии (рис. 5), которые дают общее представление о структурном плане исследуемой площади и могут анализироваться с точки зрения выделения линейных или дугообразных линеаментов, генетически связанных с разломами или зонами повышенной трещиноватости.

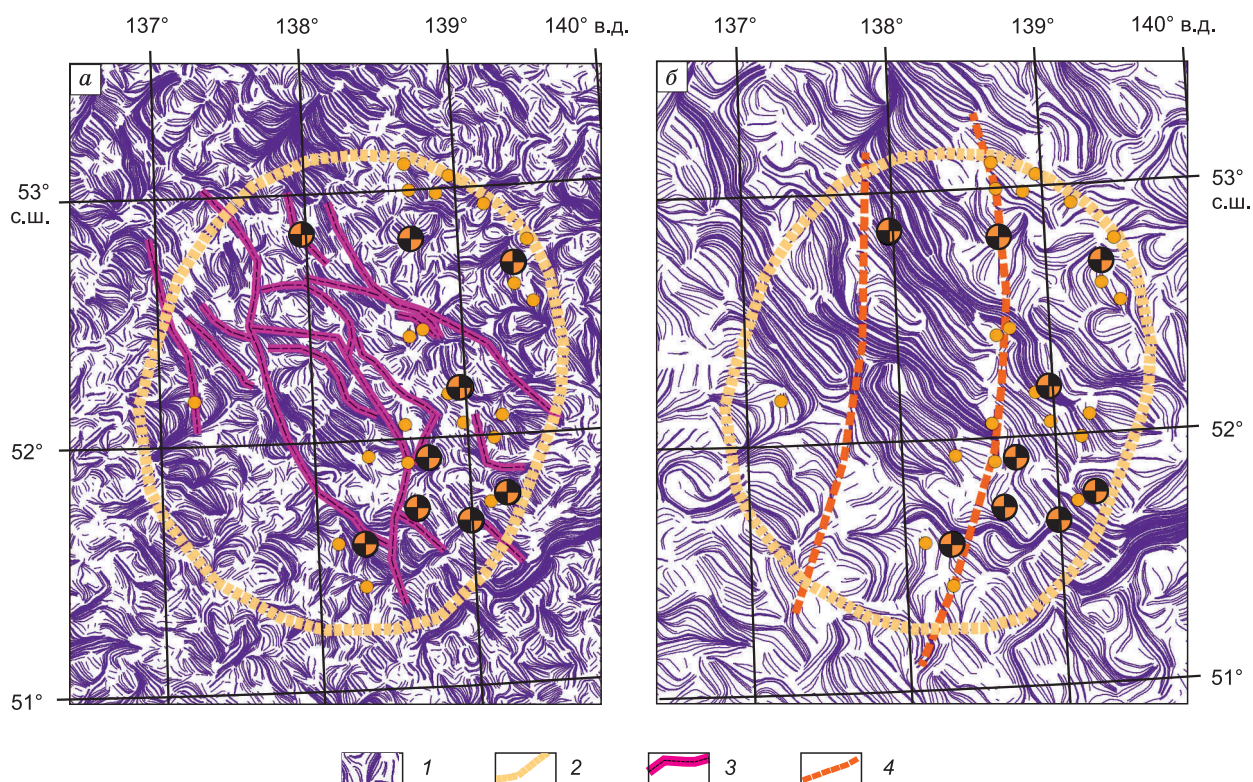


Рис. 4. Линии преобладающей вытянутости роз-диаграмм, рассчитанные по программе Winlessa [Zlatopolsky, 1997] с контуром кольцевой структуры, месторождениями и рудопроявлениями золота.

a — с окном 64 пикселя; *б* — с окном 128 пикселей. 1 — линии преобладающей вытянутости роз-диаграмм; 2 — границы кольцевой структуры; 3, 4 — выделенные зоны предполагаемых разломов северо-западного и субмеридионального направлений соответственно. Остальные усл. обозн. см. на рис. 2.

Рассмотрение линеаментов позволяет выделить два важных аспекта их пространственной организации. Во-первых, объединение в непрерывно-прерывистые линии того или иного направления, которые при их достаточной проявленности и протяженности могут быть интерпретированы как вероятные разломы. Наиболее представительная часть этих линий показана на рис. 5, *б*. Они имеют в основном субширотную ориентировку. Выделение разломов этой ориентировки представляется весьма важным с точки зрения локализации золотой минерализации, поскольку на ряде месторождений они играют рудоконтролирующую роль. Нужно отметить, что, согласно [Алексеев, Старостин, 2017], минерализацию месторождения Чутьбаткан контролируют субширотные разломы. Поэтому участки пересечения таких разломов со структурами других направлений могут быть важным прогнозным элементом при рассмотрении золотоносности данного региона.

Второй особенностью является пространственная концентрация этих элементов в определенные полосы шириной 8—15 км и протяженностью 50—25 км (см. рис. 5, *б*). При этом надо заметить, что здесь присутствуют линейные элементы всех направлений. Данные полосы могут интерпретироваться как зоны повышенной тектонической нарушенности верхней части земной коры. Они подтверждаются разломами, выделенными по данным интерпретации линий вытянутости (см. рис. 4). Эти зоны сгущения линеаментов также могут играть важную роль с точки зрения локализации золотой минерализации. Все известные на площади месторождения золота, за исключением Дяппе и Октябрьского, располагаются в выделенных полосах сгущения линеаментов или непосредственно примыкают к ним.

Как было сказано выше, для выявления дуговых и кольцевых структур нами был использован программный модуль SET Porphyry Detection [Willemse et al., 2020; Holden Eun-Jung et al., 2011]. Данный модуль состоит из нескольких плагинов, последовательно выделяющих круговые элементы поверхности, центры круговых структур, их границы. Выполненный анализ показал, что в пределах рассматриваемой площади имеется значительное количество положительных кольцевых морфоструктур с размерами от 1 до 50 км. Для дальнейшего анализа использованы структуры с диаметром более 5 км,

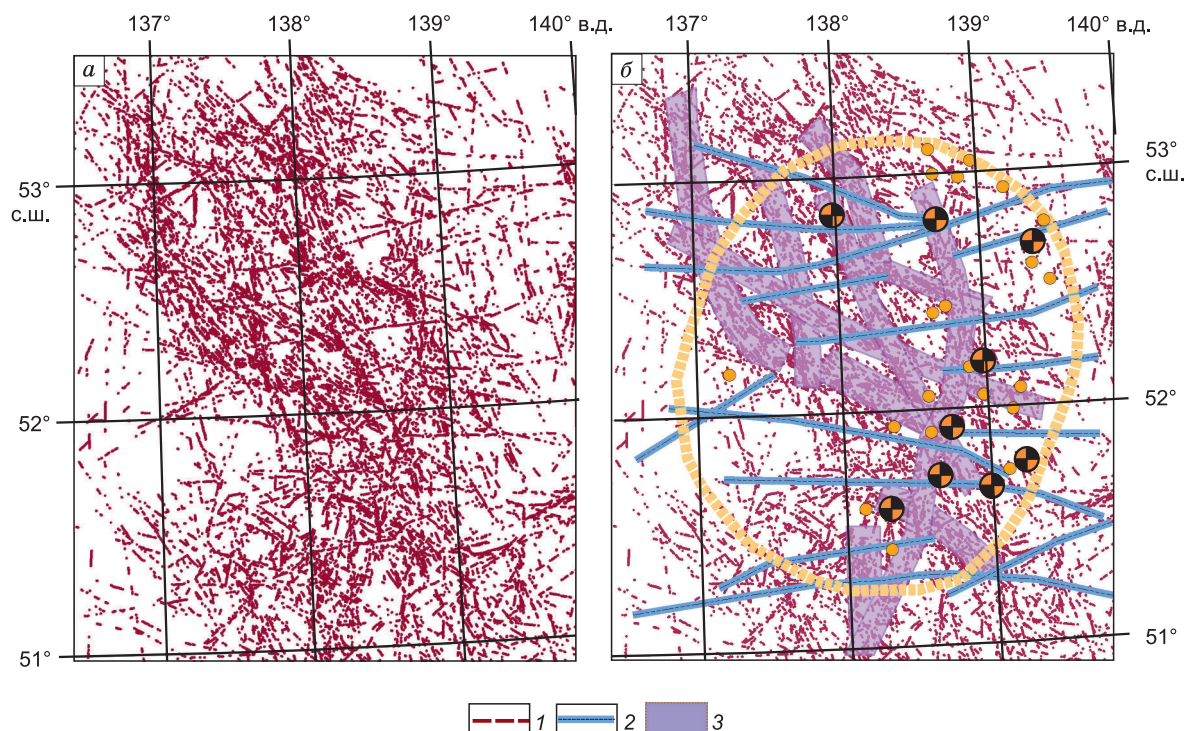


Рис. 5. Линеаменты, рассчитанные по программе Winlessa [Zlatopolsky, 1997]:

а — рассчитанные, *б* — с элементами анализа. 1 — линеаменты; 2 — предполагаемые разломы субширотной ориентировки; 3 — зоны разломов — линейные области повышенной нарушения верхней части земной коры. Остальные усл. обозн. см. на рис. 2.

которые могут определять положение рудных полей и узлов. На рисунке 6 показаны выделенные кольцевые структуры на фоне карты амплитудного контраста рельефа между отметкой в центре структуры и по ее периферии, рассчитанного по определенным радиусам. Максимальные значения данного параметра соответствуют наиболее вероятным границам кольцевой структуры.

Известные интрузивные массивы в целом достаточно хорошо совмещаются с выделенными кольцевыми структурами, имея, конечно, более сложную конфигурацию контактов, что определяется их морфологическими особенностями и уровнем эрозионного среза. В этом случае кольцевая структура ограничивает надинтрузивную область, наиболее перспективную для выявления золотой минерализации. В некоторых достаточно крупных кольцевых структурах не закартировано интрузивных массивов или наблюдаются только единичные очень мелкие штоки. В таких случаях можно обоснованно предполагать здесь наличие не вскрытого эрозией относительно крупного гранитоидного массива, как это, например, наблюдается в районе Учаминского месторождения. Такие области также должны рассматриваться как наиболее перспективные на выявление золотого оруденения. Большинство выделенных кольцевых структур хорошо укладываются в полосы сгущения ЭЛЭ (см. рис. 3), что указывает на их связь с разломами.

На рисунке 7 показана сводная интерпретационная схема с выделением морфоструктурных элементов, которые могут иметь отношение к золотоносности территории. Достаточно отчетливо видно пространственное совпадение золоторудных объектов с выделенными выше особенностями рельефа, что указывает на их прогнозно-поисковую значимость и возможность эффективного использования в аналогичных геологических обстановках и природных условиях. Хорошо видно совпадение отдельных интерпретационных элементов, полученных разными способами, что усиливает их достоверность. Отметим отдельно локальную КС, расположенную вне собственно ЛАКС, к югу от нее. Аномалия соответствует гранитоидному массиву, и полагаем, что данная область также может быть перспективна на выявление золотого оруденения.

Появление подобной структуры связано, по нашему мнению, с процессами, происходившими на палеоазиатской окраине в позднем мелу—палеоцене. В это время режим трансформной окраины сменился на очередной субдукционный этап и фиксируемые на площади магматические тела относятся к надсубдукционным [Khanchuk, Kemkin, 2015]. Выделяемая кольцевая структура характеризуется ано-

Рис. 6. Выделенные кольцевые структуры (заштрихованные контуры) на фоне карты амплитудного контраста рельефа (АКР).

Границам кольцевых структур соответствуют максимальные значения расчетного параметра. Остальные усл. обозн. см. на рис. 2.

мально высокой (по сравнению с соседними площадями) насыщенностью разнообразными интрузиями позднего мела и палеоцена. Более интенсивное проявление здесь позднемелового-палеоценового магматизма связано, скорее всего, с тем, что данная территория является узлом пересечения трех крупных разломных систем:

1. Широтную систему на данной территории представляют Пауканский, Ниланский и Ассини разломы (рис. 8, а, б). Первый, Пауканский глубинный разлом, является восточным продолжением Южно-Тукуринского разлома, а вместе они принимаются за границу между восточной частью Монголо-Охотского и Сихотэ-Алиньского орогенов [Богданов, 1960; Забродин и др., 2015]. Второй, Ниланский, — это субвертикальный левый взбрососдвиг, граничный дизъюнктив Пауканского. Третий, Ассини, меняет свою ориентировку с широтной на западе на восточно-северо-восточную в районе исследования. Возраст заложения этой системы разломов относится к палеозою, возможно, даже к раннему [Богданов, 1960; Забродин и др., 2015].

2. Северо-восточную систему разломов на исследованной территории представляют Докуинский, Курский, Бокторский и Приамурский. Наиболее протяженные из них это Курский и Приамурский, и являются они частью межрегиональной разломной системы Тан-Лу, протягивающейся по восточной окраине Евразийского континента от Южно-Китайского моря до Охотского. Система Тан-Лу, как и широтная система разломов, заложилась в палеозое, а в позднемеловое время произошла ее активизация [Уткин, 2012; Забродин и др., 2015], что и обусловило формирование Тан-Лу-Охотской рифтовой системы, частью которой являются Среднеамурский и Нижнеамурский осадочные бассейны [Забродин и др., 2015].

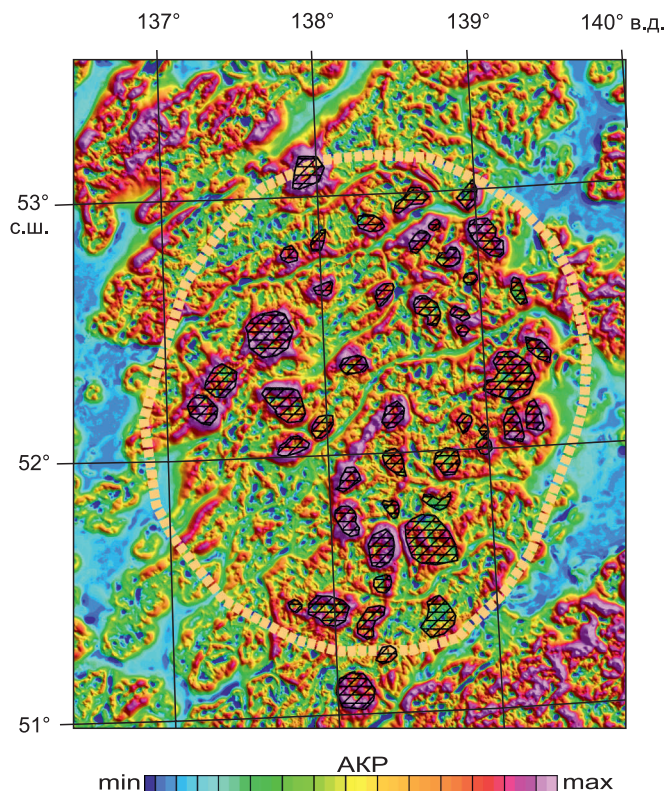
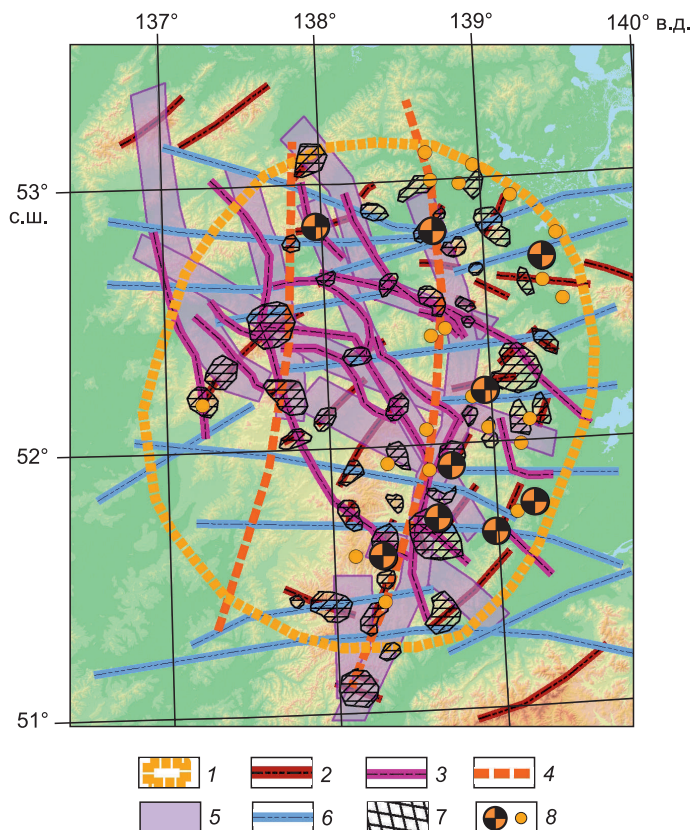


Рис. 7. Результирующая интерпретационная схема.

1 — граница ЛАКС; 2 — фрагменты линейных и дугообразных элементов рельефа; 3 — предполагаемые разломы северо-западной ориентировки, выделенные по ЛВ; 4 — предполагаемые зоны разломов субмеридиональной ориентировки; 5 — зоны разломов — линейные области высокой нарушенности верхней части земной коры; 6 — предполагаемые разломы субширотной ориентировки; 7 — выделенные кольцевые структуры; 8 — месторождения и рудопроявления золота.

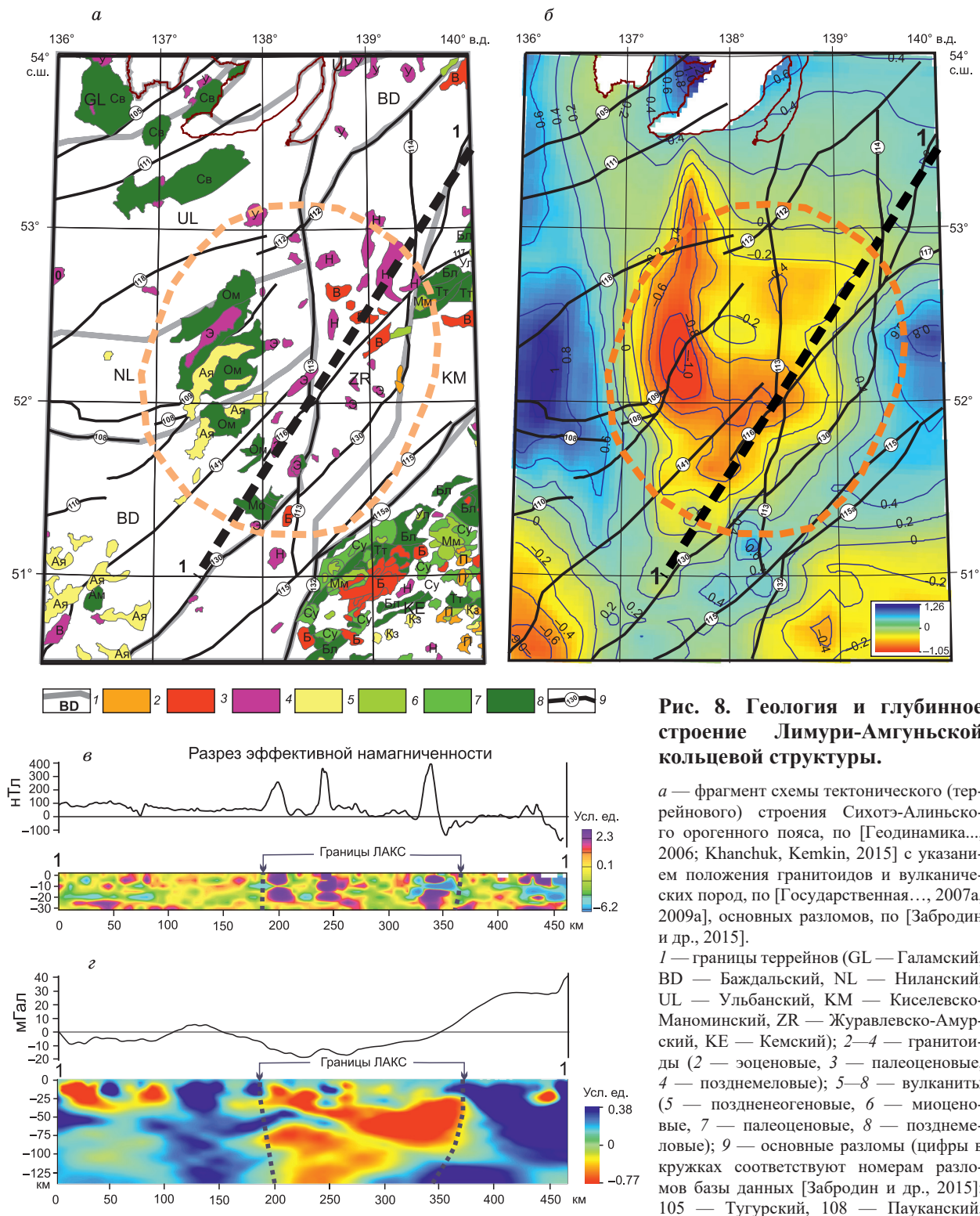


Рис. 8. Геология и глубинное строение Лимури-Амгуньской кольцевой структуры.

а — фрагмент схемы тектонического (террейнового) строения Сихотэ-Алиньского орогенного пояса, по [Геодинамика..., 2006; Khanchuk, Kemkin, 2015] с указанием положения гранитоидов и вулканических пород, по [Государственная..., 2007а, 2009а], основных разломов, по [Забродин и др., 2015].

1 — границы террейнов (GL — Галамский, BD — Баждальский, NL — Ниланский, UL — Ульбанский, KM — Киселевско-Маноминский, ZR — Журавлевско-Амурский, KE — Кемский); 2–4 — гранитоиды (2 — эоценовые, 3 — палеоценовые, 4 — позднемиоценовые); 5–8 — вулканиды (5 — позднеэоценовые, 6 — миоценовые, 7 — палеоценовые, 8 — позднемиоценовые); 9 — основные разломы (цифры в кружках соответствуют номерам разломов базы данных [Забродин и др., 2015]: 109 — Ниланский, 110 — Дукинский, 111 — Ассиинская зона, 112 — Дигдаланский, 113 — Лимурчанский, 114 — Вьюнский, 115 — Приамурский, 115а — Приамурский (Киселевский), 116 — Бичи-Амурский, 117 — Ярки-Акинский, 118 — Ассиин-Омало-Усалинский, 130 — Бокторский, 132 — Центральный Сихотэ-Алиньский, 141 — Курский).

На «*а*» буквами указаны гранитоидные комплексы (Б — бекчиулский, В — верхнеудоминский, М — мяочанский, Н — нижнеамурский, П — прибрежный, У — ульбанский, Э — эвурский) и вулканические толщи/свиты (Ая — аякитская, Ам — амутская, Бл — большинская, Кз — кизинская, Мм — маломихайловская, Мо — малоомельдинская, Ом — омельдинская, Св — савояжская, Су — сусанинская, Тт — татарскинская, Ул — улакская). *б* — карта распределения плотности на глубине 100 км [Диденко, Носырев, 2020]. Значения изолиний даны в % от среднего для всей территории (нулевая изолиния). На «*а*» и «*б*» использована проекция Гаусс—Крюгера, центральный меридиан 138° в.д. *в* — разрез эффективной намагниченности с графиком аномального магнитного поля по профилю 1—1 [Носырев и др., 2023]. *з* — разрез эффективной плотности с графиком поля силы тяжести в редукции Буге по профилю 1—1 [Носырев и др., 2023].

109 — Ниланский, 110 — Дукинский, 111 — Ассиинская зона, 112 — Дигдаланский, 113 — Лимурчанский, 114 — Вьюнский, 115 — Приамурский, 115а — Приамурский (Киселевский), 116 — Бичи-Амурский, 117 — Ярки-Акинский, 118 — Ассиин-Омало-Усалинский, 130 — Бокторский, 132 — Центральный Сихотэ-Алиньский, 141 — Курский).

3. Меридиональную систему разломов на исследованной территории представляют Центральный Сихотэ-Алиньский, крупнейший на Дальнем Востоке, надстраивающий его в северном направлении Лимурчанский разлом и параллельный последнему Вьюнский. Время заложения этой системы разломов доберриаское, но основные перемещения по нему произошли в позднем мелу [Забродин и др., 2015]. Кумулятивная амплитуда сдвига этой системы оценивается по-разному — от 200 км [Геодинамика..., 2006] до тысяч километров, если исходить из данных [Забродин и др., 2015, с. 44]: «сдвиговые смещения по разлому происходили в интервале времени от юры (?) до палеоцена, скорость их оценивается в 5—7 см/год».

Это привело, очевидно, к повышенной проницаемости земной коры и образованию многочисленных интрузий (см. рис. 8, а). Такой режим, судя по имеющимся данным, продолжался и в палеоцене. Имеются только две крупные интрузии палеоценового возраста в контуре ЛАКС, однако всеми исследователями, детально изучавшими в пределах месторождений позднемеловые интрузии, отмечается их прорывание небольшими палеоценовыми дайками. Таким образом, можно сделать вывод, что формирование и специфика рассматриваемой кольцевой структуры определяется ее высокой насыщенностью крупными многофазными интрузиями позднего мела—палеоцена (см. рис. 8, а). Формирование ЛАКС завершилось в палеоцене и после этого значительных сдвиговых перемещений в ее пределах не происходило. Кайнозойская трансформная окраина располагалась много восточнее. По мнению [Забродин, 2017], сдвиговые перемещения по Центральному Сихотэ-Алиньскому и Лимурчанскому разломам также завершились в палеоцене.

На территории Северного Сихоте-Алиня с олигоцена начинается этап образования рифтогенных впадин [Забродин, 2017]. Они группируются в две полосы меридиональной ориентировки — Торомскую и Нижнеамурскую системы раздвигов протяженностью 750 и 450 км соответственно. Между этими полосами впадин находится блок земной коры меридиональной ориентировки шириной в среднем 220 км, не захваченный процессами рифтогенеза, в пределах которого и располагается ЛАКС. Это способствовало сохранности элементов кольцевой структуры в течение относительно длительного времени. Также надо отметить, что вдоль обеих полос грабенов широко развиты разновозрастные (миоцен—неоген) базальты, которые практически отсутствуют в пределах ЛАКС, только в юго-восточной части на границе с Торомской системой грабенов отмечается несколько незначительных по размерам покровов неогеновых базальтов (см. рис. 1, 8, а). Таким образом, вмещающий кольцевую структуру блок не был захвачен кайнозойскими процессами рифтогенеза, что способствовало сохранению здесь ряда кольцевых элементов, связанных с более ранним магматизмом. Также надо отметить, что, возможно, именно насыщенность данного блока гранитоидными интрузиями обусловила его всплывание и стабилизацию.

Особенности ЛАКС, определившие ее появление и сохранность на протяжении достаточно длительного времени подчеркиваются и особенностями ее глубинного строения [Диденко, Носырев, 2020; Носырев и др., 2023]. Проявление процессов надсубдукционного магматизма обусловило преобразование вещества в надсубдукционном мантийном клине за счет воздействия мантийных расплавов и флюидов, что привело к появлению областей разуплотнения на этом уровне под структурой (см. рис. 8, б, г). Подобные процессы достаточно хорошо изучены в современных зонах субдукции [Добрецов и др., 2017]. Они определили также высокую насыщенность верхней (до глубины 15—20 км) части земной коры крупными интрузиями, сложенными как гранитоидами, так и породами среднего и основного составов. Первые фиксируются отрицательными аномалиями поля силы тяжести (области разуплотнения земной коры), вторые — частично положительными магнитными аномалиями (магнитные тела, связанные с отдельными фазами интрузивных комплексов), что и показано на разрезах эффективных намагниченности (см. рис. 8, в) и плотности (см. рис. 8, г) по профилю, пересекающему ЛАКС.

Хорошо видны погружающаяся на запад зона разуплотнения в мантии и более локальные зоны в земной коре. Выделяется менее разуплотненная центральная часть в коре. На магнитном разрезе видно сложное расположение магнитных тел как в виде колонн, так и изолированных по глубине. Глубина области разуплотнения литосферной мантии по геофизическим данным достигает 130 км. Опубликованные ранее данные по соотношению диаметра купольно-кольцевых структур и глубинам магматических очагов [Гуревич, 2010] свидетельствуют, что при диаметре КС около 200 км глубина магматических очагов может лежать в диапазоне 50—170 км.

Таким образом, выделенная по анализу рельефа кольцевая структура подтверждается геофизическими данными и особенностями глубинного строения литосферы. Она имеет магматогенную природу, характеризуется высокой концентрацией интрузивных тел и вулканотектонических структур и связана с процессами преобразования земной коры и верхней мантии на восточной окраине Азии в позднемеловое-палеоценовое время.

ВЫВОДЫ

Изучение особенностей рельефа и выделение морфоструктур определенного класса может рассматриваться как отдельное направление в комплексе прогнозных и поисковых работ на коренное золото в условиях Приамурья.

1. Проведенная обработка цифровой модели рельефа (SRTM03) позволила выявить в центральной части Нижнеамурской металлогенической зоны дугообразные элементы рельефа, формирующие Лимури-Амгуньскую кольцевую структуру. Большая часть этих элементов соответствует интрузивным и вулканогенным образованиям. Данная структура подтверждается глубинными особенностями литосферы и имеет глубинные корни, связанные с проявлением магматических и метасоматических процессов в земной коре и верхней мантии.

2. Согласно обработке ЦМР, Лимури-Амгуньская кольцевая структура характеризуется повышенной плотностью элементарных линейных элементов (степень расчлененности рельефа). Линии вытянутости исследуемой области имеют преобладающее северо-западное направление. Распределение линейных элементов в пределах Лимури-Амгуньской кольцевой структуры неравномерно, они формируют пучки северо-западного и субмеридионального направлений, пересекаемые линейными элементами северо-восточного и субширотного направлений. Также в пределах ЛАКС широко развиты многочисленные кольцевые структуры более мелкого масштаба.

3. Данная кольцевая структура насыщена месторождениями и рудопроявлениями коренного золота, пространственное расположение которых коррелируется с морфоструктурными особенностями площади. Выполненный анализ показал, что ряд выделенных элементов может иметь определенное прогнозно-поисковое значение, и они могут использоваться в общем комплексе прогнозно-поисковых работ. Целесообразно выделение следующих признаков геологического строения изучаемой территории, важных с точки зрения локализации золотой минерализации.

Учитывая структурный контроль, характерный для месторождений рассматриваемого типа, важным прогнозно-поисковым признаком являются линейные элементы рельефа, выраженные в различных его трансформациях. Эти элементы с высокой вероятностью связаны с разломной тектоникой площади. Выполненный анализ позволяет также выделять крупные зоны повышенной нарушенности (области повышенной плотности элементарных линейных элементов), которые могут контролировать размещение минерализованных зон. Узлы их пересечения с поперечными разломами являются наиболее благоприятными участками для рудолокализации. Большинство известных месторождений и рудопроявлений золота на изученной территории располагается в пределах таких зон. Их плотность заметно повышается в узлах пересечения зон с разломами северо-восточного и субширотного направлений.

В условиях, когда рудоносность площади связывается пространственно и генетически с интрузиями, представляется весьма актуальным, наряду с выделением линейных структур, проводить выделение кольцевых структур, с которыми могут соотноситься как рудные поля, имеющие размер в десятки и сотни км², так и отдельные месторождения.

4. С точки зрения последовательности и масштаба выделяемых морфоструктурных элементов можно наметить несколько этапов такой работы.

Выделение региональных морфоструктур. В большинстве случаев это будут кольцевые структуры диаметром 100—300 км, которые будут соответствовать рудным районам.

Детальный анализ структуры рельефа в пределах этих областей с целью выделения как линейных, так и кольцевых элементов, с которыми пространственно могут ассоциировать рудные поля, узлы, месторождения. Это наиболее важный этап, поскольку определяет выделение локальных площадей для проведения среднемасштабных поисковых работ. Исследования в рамках именно этого этапа показаны в статье.

Детальный анализ рельефа в пределах локальных участков площадью в первые км², отвечающих отдельным месторождениям или минерализованным зонам.

Рассмотренный в статье материал показывает, что в целом морфоструктурный анализ должен являться определенным этапом общего комплекса прогнозно-поисковых работ различных масштабов, а его результаты рассматриваться совместно с геолого-геофизическими данными как один из факторов выбора поисковых площадей и изучения закономерностей локализации рудной минерализации в конкретном районе.

Авторы выражают признательность и благодарность Н.Н. Добрецову и анонимному рецензенту, чьи замечания и предложения существенно способствовали улучшению качества представляемого материала. Помощь при подготовке цифровой модели рельефа и графического и цифрового материала оказали О.В. Рыбас, Е.Ю. Диденко, А.С. Тютюник, за что авторы им благодарны.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (№ 22-17-00023). Базовое финансирование за счет субсидий на выполнение госзаданий ИТиГ ДВО РАН (темы НИР № 121021000095-1, № 121021000094-4) и ГИН РАН (тема № FMMG-2023-0010).

ЛИТЕРАТУРА

Алексеев А.С., Старостин В.И. Новое месторождение золота в Нижнем Приамурье // Вестник Моск. ун-та. Серия 4. Геология, 2017, с. 33—38.

Богданов Н.А. Строение глубинных разломов южного склона Тукурингра и Джагды // Бюл. МОИП. Отд. геол., 1960, т. 35, вып. 2, с. 52—61.

Волчанская И.К. Морфоструктурные закономерности размещения эндогенной минерализации. М., Наука, 1981, 239 с.

Гамянин Г.Н., Гончаров В.И., Горячев Н.А. Золото-редкометалльные месторождения Северо-Востока России // Тихоокеанская геология, 1998, т. 17, № 3, с. 94—103.

Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. В 2 кн. / Ред. А.И. Ханчук. Владивосток, Дальнаука, 2006, кн. 1, 572 с.; кн. 2, 409 с.

ГИС-Атлас Недр России. Дальневосточный федеральный округ. Хабаровский край. Карта минералогического районирования. По состоянию на 01.09.2021, <http://atlaspacket.vsegei.ru/#a12e28281b7771117>.

Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Тронин А.А. Особенности минералогической зональности рудно-магматических систем, вмещающих кварцево-жильные месторождения золота (по материалам спутниковой спектроскопии) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2014, т. 11, № 3, с. 140—156.

Горошко М.В., Гильманова Г.З. Условия образования урановых месторождений в зонах «несогласия» мезопротерозойских платформенных отложений с палеопротерозойскими метаморфическими образованиями в обрамлении Идюмо-Хайканского купола метаморфических пород Алдано-Станового щита // Руды и металлы, 2018, № 2, с. 14—24.

Горошко М.В., Гильманова Г.З., Рыбас О.В. Анализ цифровых моделей рельефа при геологических исследованиях Эльконского урановорудного района (Алдано-Становой щит) // Тихоокеанская геология, 2015, № 2, т. 34, с. 61—66.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист N-53 — Шантарские острова. Геологическая карта, лист 1. СПб, Картфабрика ВСЕГЕИ, 2007а.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист N-53 — Шантарские острова. Объяснительная записка. СПб, Картфабрика ВСЕГЕИ, 2007б, 448 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист М-53 — Хабаровск. Геологическая карта, лист 1. СПб, Картфабрика ВСЕГЕИ, 2009а.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист М-53 — Хабаровск. Объяснительная записка. СПб, Картфабрика ВСЕГЕИ, 2009б, 376 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист N-54 — Николаевск-на-Амуре. Геологическая карта, лист 1. СПб, Картфабрика ВСЕГЕИ, 2016а.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист N-54 — Николаевск-на-Амуре. Объяснительная записка. СПб, Картфабрика ВСЕГЕИ, 2016б, 477 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист М-54 — Александров-Сахалинский. Геологическая карта дочетвертичных образований, лист 1. СПб, Картфабрика ВСЕГЕИ, 2017а.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист М-54 — Александров-Сахалинский. Объяснительная записка. СПб, Картфабрика ВСЕГЕИ, 2017б, 609 с.

Гуревич Д.В. Семейство купольно-кольцевых структур как результат деятельности мантийных и литосферных плюмов // Региональная геология и металлогения, 2010, № 43, с. 74—65.

Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 1 января 2020 года. Вып. 29: Золото. Т. VIII. Дальневосточный федеральный округ. Ч. 8. Хабаровский край. ФГБУ «Росгеолфонд», 2020а, 274 с.

Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 1 января 2020 года. Вып. 30: Серебро. Т. IV. Дальневосточный федеральный округ. ФГБУ «Росгеолфонд», 2020б, 430 с.

Диденко А.Н., Носырев М.Ю. Плотностная структура литосферы Сихотэ-Алиньского орогенного пояса // ДАН, 2020, т. 492, № 2, с. 66—71.

Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Кулаков И.Ю., Котляров А.В. Проблемы фильтрации флюидов и расплавов в зонах субдукции и общие вопросы теплофизического моделирования в геологии // Геология и геофизика, 2017, т. 58 (5), с. 701—722, doi: 10.15372/GiG20170503.

Забродин В.Ю. Тектоника и эволюция северо-восточного окончания Восточно-Азиатского рифтового пояса // Тихоокеанская геология, 2017, т. 36, № 3, с. 3—11.

Забродин В.Ю., Рыбас О.В., Гильманова Г.З. Разломная тектоника материковой части Дальнего Востока России. Владивосток, Дальнаука, 2015, 132 с. + 1 цв. вкл.

Златопольский А.А. Эффективное пространственное разрешение данных и инструмента на примере мультимасштабного анализа ЦМР // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2014, т. 11, № 2, с. 18—25.

Иванов Ю.Н., Выхристенко Р.И., Викентьев И.В. Структурный контроль золоторудной минерализации центральной части Малоуральского вулканоплутонического пояса (Полярный Урал) по результатам анализа мультиспектральных снимков космического аппарата Landsat 8 // Исследование Земли из космоса, 2020, № 4, с. 51—62, doi: 10.31857/S0205961420040089.

Моисеенко В.Г., Эйриш Л.В. Золоторудные месторождения востока России. Владивосток, Дальнаука, 1996, 352 с.

Носырев М.Ю., Диденко А.Н., Гильманова Г.З. Строение земной коры и литосферной мантии центральной части Нижнеамурской металлогенической зоны, закономерности распределения золота в ее пределах // Тихоокеанская геология, 2023, № 3, с. 3—19.

Рыбас О.В., Гильманова Г.З. Применение теории масштабируемого пространства для выделения и анализа структур рельефа по радиолокационным данным // Исследование Земли из космоса, 2011, № 6, с. 45—52.

Рыбас О.В., Гильманова Г.З. Применение теории масштабных пространств для ЦМР среднего разрешения в геологических и тектонических исследованиях // Геоморфология, 2019, № 2, с. 68—78.

Симонов Ю.Г. Геоморфология. СПб, Питер, 2005, 427 с.

Трушин С.И., Кириллов В.Е. Месторождение Албазино — новый для Дальнего Востока промышленный тип золотого оруденения // Региональная геология и металлогения, 2018, № 73, с. 60—66.

Юшманов Ю.П. Геолого-структурная позиция, структура и условия локализации золотого оруденения в Дяппе-Мартемьяновском рудном узле, Нижнее Приамурье // Отечественная геология, 2016, № 4, с. 56—62.

Юшманов Ю.П. Геолого-структурные особенности Агние-Афанасьевского месторождения в Нижнем Приамурье // Региональные проблемы, 2018а, т. 21, № 4, с. 5—21.

Юшманов Ю.П. Учаминский Be-W-Au рудный узел в региональных и локальных структурах Нижнего Приамурья // Тихоокеанская геология, 2018б, т. 37, № 2, с. 102—108.

Alexandrov I.A., Ivin V.V., Budnitskiy S.Yu., Moskalenko E.Yu. Age of granitoids of the Bekchiul Pluton (Lower Amur Region) // Geodyn. Tectonophys., 2023, v. 14 (2), 0694, doi: 10.5800/GT-2023-14-2-0694.

Eldosouky A.M., Pour A.B., Hamed A., Taha A., Gamal M., Mahmoud A., Pham L.T. Utilization of Landsat-8 imagery and aeromagnetic data for deciphering alteration zones and structures: implications for mineral exploration in the Southeastern Desert of Egypt // Front. Sci. Res. Technol., 2021, doi: 10.21608/fsrt.2021.62989.1035.

Goldfarb R., Taylor R.D., Collins G.S., Goryachev N.A., Orlandini O.F. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia // Gondwana Res., 2014, v. 25 (1), p. 48—102.

Holden E.-J., Fu Sh.Ch., Kovesi P., Dentith M., Bourne B., Hope M. Automatic identification of responses from porphyry intrusive systems within magnetic data using image analysis // J. Appl. Geophys., 2011, v. 74, p. 255—262.

Khanchuk A.I., Kemkin I.V. Jurassic geodynamic history of the Sikhote-Alin-Priamurye region // Late Jurassic Margin of Laurasia: A Record of Faulting Accommodating Plate Rotation / Eds. T.H. Anderson, A.N. Didenko, C.L. Johnson, A.I. Khanchuk, J.H. MacDonald, Jr. Boulder, CO, GSA, 2015, v. 513, p. 509—525.

Liping Yang, Xigmin Meng, Xiaoqiang Zhang. SRTM DEM and its application advances // Int. J. Remote Sens., 2011, v. 32 (14), p. 3875—3896.

Rabus B., Eineder M., Roth A., Bamler R. The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar // ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., 2003, v. 57, p. 241—262.

Willemse J., van der Vaart M., Yang W., Briegel A. Mathematical mirroring for identification of local symmetry centers in microscopic images local symmetry detection in FIJI // Microsc. Microanal., 2020, v. 26, p. 978—988, doi: 10.1017/S1431927620024320.

Witkin A.P. Scale-space filtering // Proc. 8th Int. Joint Conf. Artif. Intell., 1983, v. 2, p. 1019—1022.

Zlatopolsky A. Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA // Comput. Geosci., 1997, v. 23 (1), p. 45—62.