

УДК 551.1/.4(234.9)

Научная статья

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛИНЕАМЕНТНОГО АНАЛИЗА РЕЛЬЕФА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ПРИМЕРЕ КАВКАЗСКОГО РЕГИОНА

*Ю.П. Видяпин, И.В. Бондарь**

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Большая Грузинская 10/1, Москва, 123242, Россия

Аннотация. Линеаментный анализ современного рельефа земной поверхности, основанный на тотальном дешифрировании, позволяет выявлять полную картину региона, включающую линеаментные зоны, зоны рассеянных сдвиговых и содвиговых деформаций. Анализ выраженности этих зон в распределении геологических и геофизических характеристик, свидетельствующих о проявлении геодинамической активности, позволяет выделить современные и долгоживущие зоны геодинамической активности и изучить особенности их развития. Этот подход проверен на двух крупных структурных зонах в пределах Кавказского региона, известных как зоны геодинамической активности: Аграхан-Тбилисско-Левантийской левосдвиговой зоне и Транскавказском поперечном поднятии.

Ключевые слова: рельеф, линеаменты, Кавказ, зоны геодинамической активности

Original article

POSSIBILITIES OF USING LINEAMENT ANALYSIS OF THE EARTH'S SURFACE TOPOGRAPHY FOR GEODYNAMIC STUDIES ON THE EXAMPLE OF THE CAUCASUS REGION

Yu. P. Vidyapin, I. V. Bondar'

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Bolshaya Gruzinskaya 10/1, Moscow, 123242, Russia

Abstract. The lineament analysis of the modern relief of the earth's surface, based on total decoding, allows us to reveal a complete lineament picture of the region, including lineament zones, zones of scattered shear and co-shear deformations. The analysis of the severity of these zones in the distribution of geological and geophysical characteristics that indicate the manifestation of geodynamic activity allows us to identify modern and long-lived zones of geodynamic activity and study the features of their development. This approach has been tested on two large structural zones within the Caucasus region, known as geodynamic activity zones: the Agrakhan-Tbilisi-Levantine left-thrust zone and the Trans-Caucasian Transverse Uplift.

Keywords: topography, lineaments, Caucasus, zones of geodynamic activity

Линеаментный анализ некоторое время назад был весьма популярен и использовался для решения широкого круга как прикладных, так и теоретических задач — от поисков полезных ископаемых

до изучения глобальной делимости земной коры. Ныне интерес к нему несколько снизился, что отчасти связано с появлением критических материалов, ставящих под сомнение получаемые с его помощью результаты (Леонов [Leonov], 1994; Короновский и др. [Koronovsky et al.], 2014). Такая критика касается как надежности самих результатов линеаментного анализа, так и корректности их интерпретации. Необходимо обсудить эти крити-

* Ответственный за переписку автор — Иван Владимирович Бондарь;

e-mail: bond@ifz.ru

© 2021, Ю.П. Видяпин, И.В. Бондарь

ческие высказывания с целью реабилитации этого метода геологических исследований.

Понятие «линеament» было введено в науку в начале прошлого века У.Г. Хоббсом (Hobbs, 1911), определившим их как «закономерно повторяющиеся в рельефе и структуре земной поверхности направления». Применение этого определения к особенностям геологического строения, а также геофизических, геохимических и других геополей привело к тому, что линеamentы многими стали восприниматься как тектонические структуры, хотя это не всегда оправданно. Со временем это дало основание для развития представлений о регматической решетке разломов (Sonder, 1938), планетарной трещиноватости (Шульц [Shulz], 1964, 1973; Радкевич [Radkevich], 1989), а также об общей делимости земной коры и литосферы (Белоусов [Belousov], 1962; Суворов [Suvorov], 1986; Полетаев [Poletaev], 1994).

Значительный рост интереса к выделению линеamentов и анализу их распределения произошел в начале второй половины прошлого века и был связан с появлением больших объемов аэро- и космо-фотоматериалов. В это время активно развивались средства и методы дешифрирования фотоматериалов, в том числе и линеamentный анализ. Результаты такого анализа, основанного в значительной степени на выделении фототонных, интерпретировались чаще всего как отражение поля трещиноватости. В итоге, как правило, дело ограничивалось построением роз-диаграмм ориентировок линеamentов или карт их плотности, что не приводило к получению полезной геологической информации. Но наибольшие сомнения вызывает сложившаяся практика интерпретации результатов. Большинство исследователей априорно отождествляли выявленные линеamentы с тектоническими структурами (разломами, зонами повышенной трещиноватости и т.д.) и приписывали им те свойства, которыми такие структуры должны обладать, прежде всего единство истории развития и механизма формирования. Когда же такого единства не обнаруживалось, делался вывод о бессмысленности линеamentного анализа. Подобная ситуация сохраняется и сейчас.

Целью работы является рассмотрение основ линеamentного анализа, а также возможности его использования на примере Кавказского региона.

Понятие и свойства линеamenta

Несмотря на то что линеamentный анализ занимает далеко не последнее место в арсенале современных методов исследования и ему посвящена обширная литература, в понимании его предмета и основных терминов существуют разногласия, что часто приводит к ошибкам и недоразумени-

ям. Классическое определение линеamenta было приведено выше. Его можно расширить и применить не только к рельефу, но и к любому другому геополю. Тогда линеamentы следует трактовать как узкие протяженные линейные зоны, в пределах которых концентрируются некие характерные особенности анализируемого геополя. При этом совсем не обязательно, чтобы выделенная линейная зона была преобладающей в общей картине поля, она может прослеживаться и по слабым эффектам. Обязательна только их концентрация в пределах линейной зоны. Соответственно, линеamentный анализ состоит в выделении в картине различных геополей (геодезических, геоморфологических, геологических, геофизических, геохимических и т.д.) прямолинейных элементов и анализе их распределения.

При таком подходе имеет смысл различать линеamentы, выделенные по различным полям, и говорить о космо-, фото-, морфо-, грави-, магнито- и других линеamentaх. Следовательно, прежде чем давать геодинамическую, тектоническую или какую-либо другую интерпретацию конкретного линеamenta, необходимо проанализировать его выраженность в комплексе геополей. Из этого вытекает, что нельзя априорно считать линеamentы, выделенные по какому-либо одному виду материалов, и даже по ограниченному их комплексу, реальными тектоническими структурами — зонами повышенной трещиноватости или сгущения разрывов, крупными тектоническими разломами, зонами смятия и т.д. На недопустимость такого подхода неоднократно обращалось внимание (Космическая... [Peive et al.], 1983; Макаров [Makarov], 2008). К подобным выводам пришли Н.В. Короновский с соавторами, подробно обсудившие проблемы выделения и интерпретации линеamentов (Короновский и др. [Koronovsky et al.], 2014). Однако примеры упомянутого некорректного подхода продолжают встречаться (Архангельская [Arkhsngelskaya], 2008). При этом подразумевается, что выделенные линеamentы обладают свойствами тектонических структур: единым временем развития и кинематическим планом, пространственной сплошностью развития, единством формационной выраженности и т.д. В результате одни специалисты неоправданно априорно считают линеamentы, выделенные по какому-либо одному виду геоинформации, тектоническими структурами, а другие, не находя в выделенных линеamentaх признаков таких структур, объявляют их артефактами, рожденными формальным подходом к статистической обработке картографических данных.

Источник такого конфликта лежит, по-видимому, в том, что в период наиболее интенсивного применения линеamentного анализа, связанный с широким внедрением в практику гео-

логических работ дешифрирования аэро- и космоматериалов, основной задачей было прослеживание конкретных геологических тел или структур. Эта задача была перенесена и на собственно линеаментный анализ, который был ориентирован почти исключительно на изучение разломной тектоники, хотя идентификация дешифрируемых элементов как разломов или трещин далеко не всегда имела под собой реальную основу.

С таким смешением задач обычного дешифрирования и линеаментного анализа связан и другой момент, приводящий ко многим недоразумениям. Существует мнение, что выделение прямолинейных линеаментов является неоправданной идеализацией и их следует прослеживать в соответствии с реальной кривизной осей и границ аномалий анализируемого поля. Криволинейные линеаменты выделяются часто при анализе геофизических (потенциальных) полей, а иногда даже и при геоморфологических исследованиях (Щукин и др. [Shchukin et al.], 2008). Это естественно для обычного дешифрирования, имеющего целью прослеживание конкретных геологических тел (пластов, пачек, разломов, полей) и границ со всеми особенностями их формы. При линеаментном же анализе задача, на наш взгляд, состоит в выявлении на разных масштабных уровнях основных закономерностей распределения именно линейных протяженных объектов (линейная аппроксимация), природа которых составляет предмет специального исследования. Любую кривую можно разложить на серию элементарных линейных отрезков и проанализировать на предмет наличия протяженных прямолинейных объектов и закономерностей распределения элементарных отрезков. Следует признать, что строго прямолинейные геологические тела и структуры значительной протяженности встречаются довольно редко, поэтому прямолинейные линеаменты, безусловно, являются в известной степени результатом идеализации. С другой стороны, такая идеализация имеет под собой реальную основу, проявляющуюся, как правило, на более высоком масштабном уровне. Многочисленные исследователи с давних пор замечали существование узких протяженных в целом прямолинейных зон неясной тектонической природы, прослеживающихся при анализе различных геоматериалов. Споры о природе таких объектов продолжаются доныне, однако реальность их существования признается многими авторитетными учеными, например (Хаин [Khain], 2007).

Таким образом, обнаруживается двойственность понятия «линеамент». С одной стороны, это идеализированный образ, используемый для удобства анализа картографических материалов, а с другой — он отражает некие, пока еще не понятные, но объективно существующие закономерности струк-

турной организации геологической среды.

Важной особенностью линеаментов является то, что они образуют системы параллельных линейных зон. При этом расстояние между параллельными зонами (шаг) с достаточной строгостью сохраняется. Более того, замечено, что углы между основными системами линеаментов также имеют устойчивые значения. Это позволяет выделять полигональные блоки, ограниченные линеаментами определенных систем (Видяпин, Муравьев [Vidyarin, Muraviev], 1993). Сказанное можно рассматривать как аргумент в пользу реальности существования линеаментных систем независимо от их природы.

Стоит отметить, что при проведении площадного линеаментного анализа представляется ошибочным концентрировать внимание на отдельных априорно заданных линеаментных зонах или их группах. Это ведет к снижению степени объективности выделения линеаментов и к потере возможности оценки их ранга и места в общей линеаментной картине. Для получения полноценной и объективной картины принципиально важно тотальное дешифрирование, то есть на изучаемой площади должны быть выделены все обнаруженные прямолинейные отрезки. На этой стадии анализа речь о выделении линеаментных зон вообще не должна идти.

Хотелось бы обратить внимание еще на одно свойство линеаментов, которое часто смущает исследователей, специально линеаментным анализом не занимавшихся. Это — прерывистость выраженности линеаментов. Протяженные линеаменты обычно имеют вид не сплошной зоны (линии), а состоят из отдельных отрезков, в пределах которых они отчетливо проявлены в одном или нескольких геопоях, разделенных интервалами, где такая проявленность обнаруживается совсем в других полях, или (и) выражена существенно хуже, а иногда совсем отсутствует. Такие интервалы чаще всего бывают приурочены к областям пересечения линеаментов разных направлений, где структурные особенности геополей, свойственные разнонаправленным линеаментам, интерферируют и часто в значительной степени гасят друг друга. Указанная особенность может служить источником неоправданных выводов. Так, например, Урало-Оманский линеамент — один из самых известных среди трансконтинентальных — объявлялся мифом на основании того, что его выраженность в области пересечения с Альпийско-Гималайским поясом оказывалась существенно меньшей, чем на Урале или в Индийском океане (Леонов [Leonov], 1994).

Учитывая сделанные замечания, можно избежать наиболее распространенных ошибок при проведении линеаментного анализа и интерпретации его результатов. Ниже описан опыт применения

линеamentного анализа для решения геодинамических задач. По ходу этого описания будут сделаны дополнительные замечания методического характера, позволяющие повысить достоверность сделанных выводов.

Линеamentный анализ Кавказского региона

В качестве примера применения линеamentного анализа современного рельефа земной поверхности для решения геодинамических задач рассмотрим Кавказский регион. В тектоническом отношении это альпийская коллизионная область, относящаяся к крупнейшему Альпийско-Гималайскому поясу и лежащая в той его части, где взаимодействуют Аравийская, Африканская и Евразийская плиты (Казьмин, Тихонова [Kazmin, Tikhonova], 2006) (рис. 1). Здесь широко и с высокой интенсивностью проявляются современные геодинамические процессы: сейсмичность, вулканизм, горизонтальные и вертикальные движения земной коры. Последние обеспечивают возникновение контрастных форм рельефа и, следовательно, возможность получения максимально надежных данных для анализа.

Основой линеamentного анализа Кавказского региона послужила топографическая карта масштаба 1 : 2 500 000. Следовательно, полученные результаты отражают региональную картину и не могут быть использованы для решения ни глобальных, ни локальных задач. Была применена стандартная методика анализа (Методическое... [Shulz], 1977), основанная на выделении короткими (1–2 см) прямолинейными штришками спрямленных отрезков (элементарных линеamentов или элементов дешифрирования) осей и цепочек аномалий и зон градиентов анализируемого поля. В приложении к рельефу земной поверхности это прежде всего спрямленные отрезки хребтов, тальвегов и уступов рельефа.

В результате применения описанных действий для территории Кавказского региона была получена сводная схема элементов дешифрирования (рис. 2, А).

Полная совокупность элементов дешифрирования раскладывалась на серию схем, на каждую из которых выносились элементы только определенных ориентировок (с шагом 10°). На этих схемах выделяются линейные зоны повышенной концентрации одинаково ориентированных элементов дешифрирования. В зависимости от положения линеamentов относительно простирающейся выделяемой зоны ей присваивается определенный кинематический тип. То есть если линеamentы параллельны простираанию границ выделенной зоны, то речь идет о пучках элементарных линеamentов (или о линеamentной зоне). Если линеamentы на-

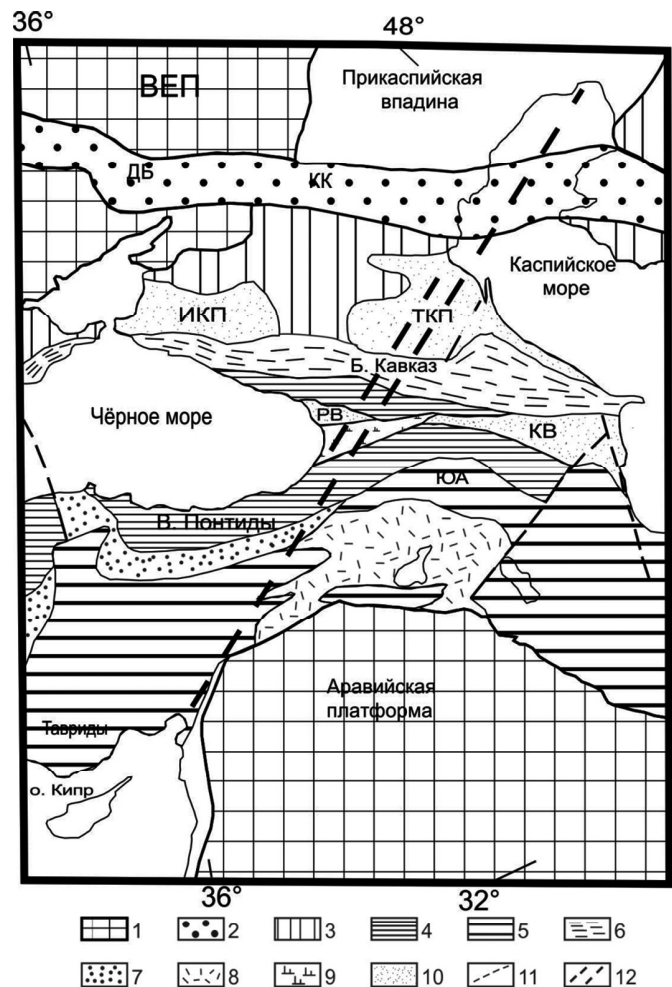


Рис. 1. Основные тектонические элементы Кавказской коллизионной области, по (Казьмин, Тихонова, 2006), с изменениями и дополнениями:

1 — древние платформы; 2 — девонская рифтовая система; 3 — эпигерцинская Скифская плита; 4, 5 — террейны в альпийском поясе: 4 — евразийского и 5 — гондванского происхождения; 6 — альпийские складчатые сооружения; 7, 8 — аккреционные комплексы: 7 — пермо-триасовый, 8 — кайнозойский; 9 — Аджаро-Триалетское складчатое сооружение; 10 — альпийские предгорные прогибы и межгорные впадины; 11 — разломы; 12 — положение Аграхан-Тбилисско-Левантийской зоны. Буквенные обозначения: ВЕП — Восточно-Европейская платформа, ДБ — Донбасс; КК — кряж Карпинского; ЗМ — Закавказский массив; ИКП — Индоло-Кубанский прогиб; ТКП — Терско-Каспийский прогиб; КВ — Куринская впадина; РВ — Рионская впадина; ЮА — Южно-Армянский терреин

Fig. 1. The main tectonic elements of the Caucasian collision region. According to (Kazmin, Tikhonova, 2006) with amendments and additions:

1 — ancient platforms; 2 — Devonian rift system; 3 — Epi-Hercynian Scythian Plate; 4, 5 — terranes in the Alpine Belt: 4 — Eurasian and 5 — Gondwanan origin; 6 — Alpine folded structures; 7, 8 — accretion complexes: 7 — Permo-Triassic, 8 — Cenozoic; 9 — Adjara-Trialeti folded structure; 10 — Alpine foreland troughs and intermountain depressions; 11 — faults; 12 — the position of Agrakhan-Tbilisi-Levantine Zone.

Letter designations: ВЕП — Eastern European Platform, ДБ — Donets Basin; КК — Karpinsky Ridge; ЗМ — Transcaucasian Massif; ИКП — Indol-Kuban Trough; ТКП — Terek-Caspian Trough; КВ — Kura Depression; РВ — Rioni Depression; ЮА — South Armenian Terrain

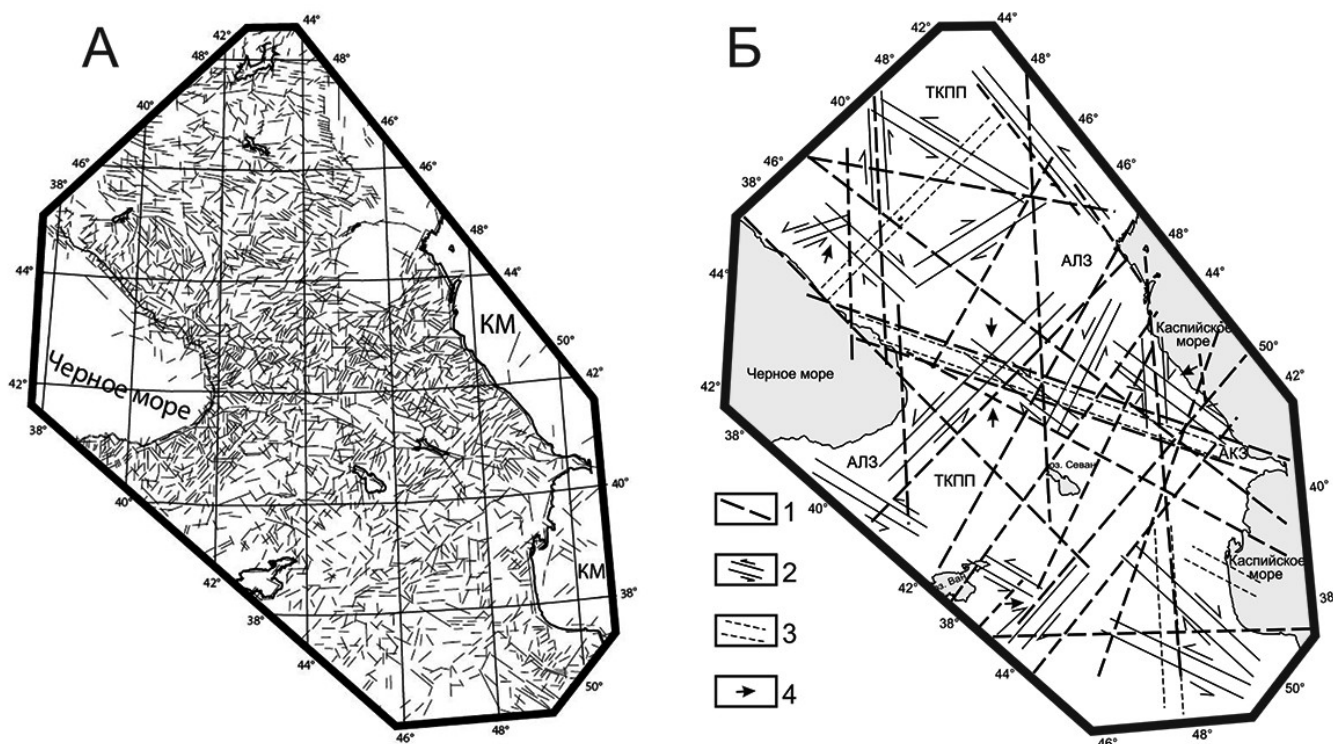


Рис. 2. А — элементарные линеаменты (элементы дешифрирования) Кавказской коллизионной области, выявленные при анализе рельефа земной поверхности в масштабе 1:2 500 000; буквенные обозначения: КМ — Каспийское море; Б — сводная схема линеаментов Кавказской коллизионной области: 1 — оси линеаментных зон (пучков элементарных линеаментов) разного порядка; 2 — зоны предполагаемых рассеянных сдвигов; 3 — зоны предполагаемых содвигов; 4 — направления сжатия, определенные по системам сдвигов; 5 — оси линеаментных зон, ограничивающие Транскавказское поперечное поднятие. Буквенные обозначения:

АЛЗ — Аграхан-Левантийская зона, АКЗ — Азово-Курунская зона, ТКПП — Транскавказское поперечное поднятие

Fig. 2. A — elementary lineaments (elements of identification) of the Caucasian collision region, identified during the analysis of the relief of the Earth surface on a scale of 1:2 500 000; Letter designations: КМ - Caspian Sea. Б — a summary diagram of the lineaments of the Caucasian collision region: 1 — axes of lineament zones (bundles of elementary lineaments) of different order; 2 — zones of supposed scattered shifts; 3 — zones of supposed shifts; 4 — compression directions determined by shift systems; 5 — axes of the lineament zones bounding the Transcaucasian Transverse Uplift. Letter designations: АЛЗ — Agrakhan-Levantine Zone, АКЗ — Azov-Kura Zone, ТКПП — Transcaucasian Transverse Uplift

ходятся под неким углом к простиранию границ выделенной зоны, то эту зону можно назвать линейной зоной предполагаемых рассеянных сдвиговых деформаций (если угол между простиранием линеаментов и простиранием зоны меньше 90°) или «сдвиговых» деформаций (если линеаменты перпендикулярны простиранию зоны) (Расцветев [Rastsvetaev], 2002). В таких зонах элементарные линеаменты рассматриваются как вероятные аналоги трещин отрыва, возникающих при сдвиге или двустороннем сжатии. Подробное обоснование такой интерпретации в приложении к сдвигам можно найти в работах Л.А. Сим (Сим [Sim], 1991).

В результате построена схема, на которой показаны линеаментные зоны и зоны предполагаемых сдвиговых и содвиговых деформаций (рис. 2, Б). На этой схеме обращает на себя внимание относительно слабая выраженность основных орографических элементов региона и прежде всего Главного Кавказского хребта. Линеаментные зоны, ориентированные поперечно к нему, проявлены существенно сильнее. Объяснение этому содержится в

самой методике анализа, когда элементы дешифрирования, проведенные по главному водоразделу и по второстепенному тальвегу, оказываются равнозначными. Результаты дешифрирования, проведенного по материалам разных масштабов, будут несколько отличаться, так как на изображениях мелкого масштаба второстепенные элементы рельефа исчезают, а главные приобретают все больший вес. Поэтому при переходе на более мелкий масштаб Главный Кавказский хребет делается ясно выраженным и становится основным линеаментом региона, а при укрупнении масштаба от него остаются лишь слабые следы.

На схеме можно видеть несколько систем параллельных линеаментных зон и несколько сопряженных систем рассеянных сдвиговых зон. Основными из них являются системы северо-восточной и субмеридиональной ориентировки. Сравнение этой схемы со схемами, полученными другими авторами (Ваков, Никонов [Vakov, Nikonov], 1998; Надирадзе [Nadiradze], 2004), обнаруживает их хорошее соответствие. На ней можно обнаружить

практически все линеаменты и их системы, выделенные ранее другими авторами. В то же время она является более полной благодаря применению тотального дешифрирования.

Использование результатов линеamentного анализа для решения геодинамических задач

Попробуем теперь рассмотреть, какое значение выделенные линеаменты и их системы имеют для понимания тектонической и геодинамической структуры региона.

Наиболее известные линейные геодинамические структуры региона — Аграхан-Тбилиско-Левантийская левосдвиговая зона (Короновский и др. [Koronovsky et al.], 2014), пересекающая Кавказскую коллизионную область в северо-восточном направлении, и Транскавказское поперечное поднятие (рис. 1, 2, Б). Рассмотрим эти зоны более подробно.

Аграхан-Тбилиско-Левантийская зона упоминается многими авторами (Милановский [Milanovsky], 1968; Philip et al., 1989; Расцветаев

[Rastsvetaev], 2002). Отметим, что она выделена В.В. Надирадзе на схеме линеamentных структур Кавказа как Понтийско-Каспийский линеament (Надирадзе [Nadiradze], 2004). Однако наиболее подробно она была описана Н.В. Короновским [Koronovsky] (1994) как крупная левосдвиговая зона, пересекающая Кавказ от Средиземного моря до Каспия и контролирующая развитие ряда современных геодинамических процессов (молодого вулканизма и сейсмичности). Формирование этой зоны связывается с внедрением Аравийского клина в Кавказскую коллизионную область.

Наиболее отчетливо рассматриваемая зона проявлена в распределении эпицентров землетрясений, полей молодого вулканизма и фаций мезокайнозойских осадков (Короновский [Koronovsky], 1994; Глумов и др. [Glumov et al.], 2004), а также ряда сейсмических характеристик земной коры (Арефьев и др. [Arefiev et al.], 1989; Хаин, Лобковский [Khain, Lobkovsky], 1990) (рис. 3–5).

Как можно видеть на сводной схеме дешифрирования рельефа, вдоль линии Аграханский полуостров — Тбилиси отмечается ясно выраженная

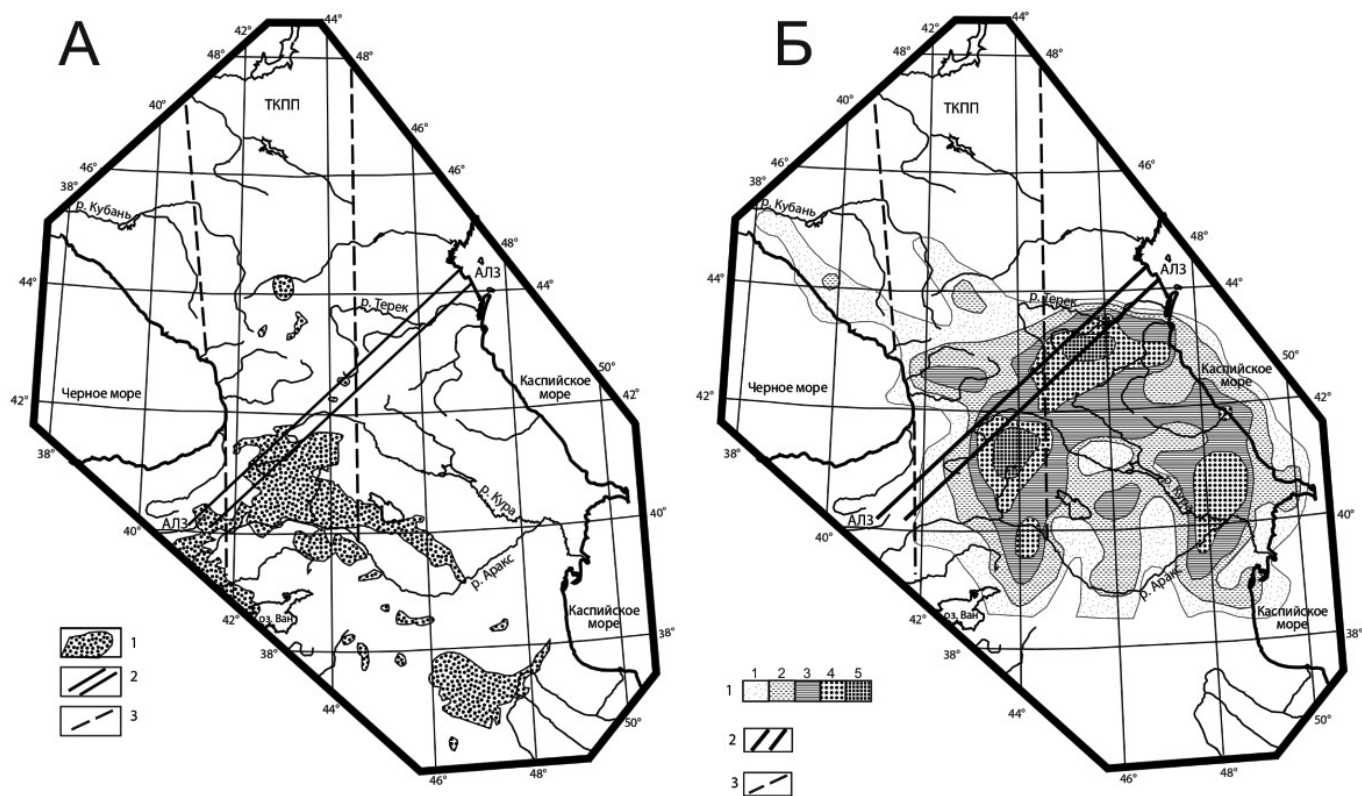


Рис. 3. А. Положение полей современных вулканитов в пределах Кавказской коллизионной области: 1 — поля современных вулканитов; 2 — Аграхан-Тбилиско-Левантийская зона; 3 — границы Транскавказского поперечного поднятия. Б. Схема плотностей эпицентров сейсмических событий (с магнитудой более 4) для Кавказской коллизионной области: 1 — шкала плотности сейсмических событий (от 1 до 5); 2 — положение Аграхан-Тбилиско-Левантийской зоны; 3 — границы Транскавказского поперечного поднятия. Буквенные обозначения: АЛЗ — Аграхан-Левантийская зона, ТКПП — Транскавказское поперечное поднятие

Fig. 3. А. The position of the fields of recent volcanites within the Caucasian collision region: 1 — fields of modern volcanites; 2 — Agrakhan-Tbilisi-Levantine Zone; 3 — boundaries of the Trans-Caucasian Transverse Uplift. Б. Diagram of the densities of epicenters of seismic events (with a magnitude greater than 4) for the Caucasian collision region: 1 — the scale of the density of seismic events (from 1 to 5); 2 — the position of the Agrakhan-Tbilisi-Levantine Zone; 3 — The boundaries of the Trans-Caucasian Transverse uplift. Letter designations: АЛЗ — Agrakhan-Levantine zone, ТКПП — Transcaucasian Transverse uplift

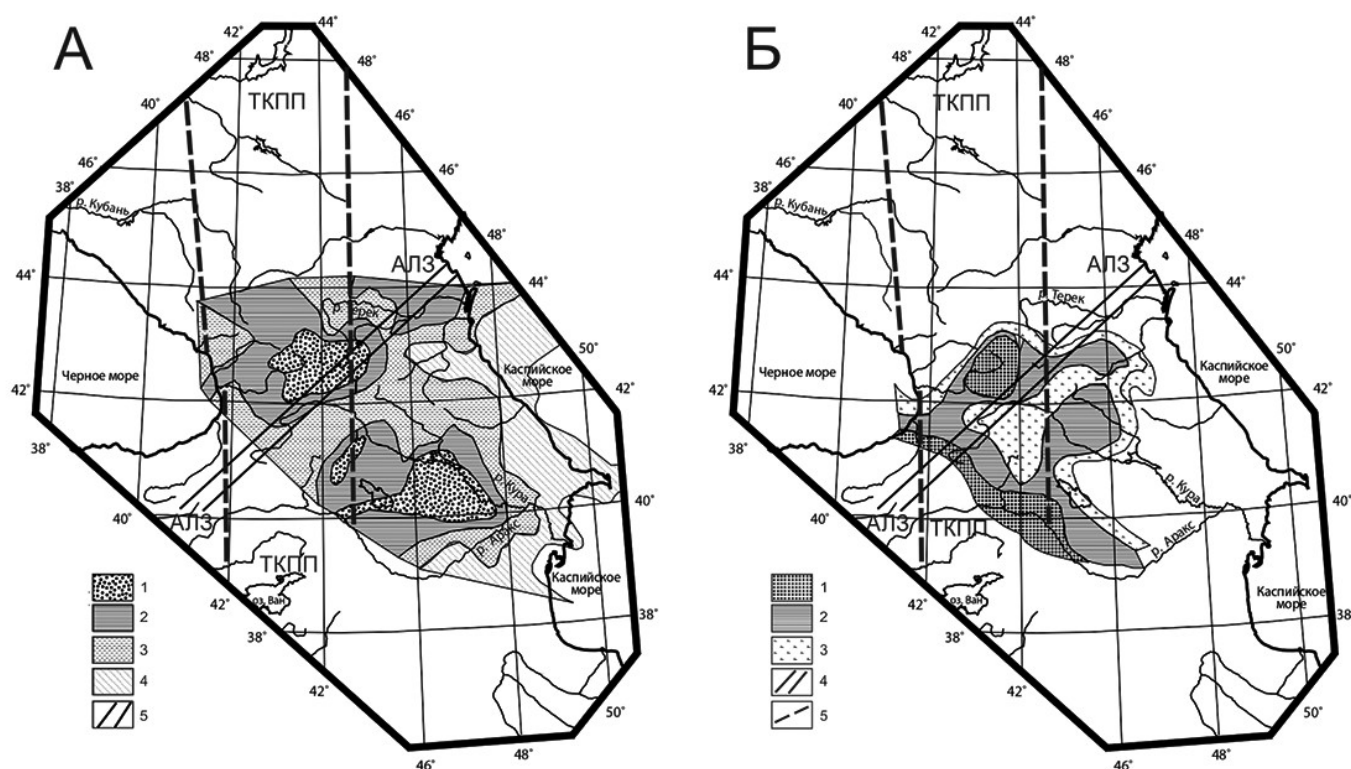


Рис. 4. А. Схема дробности (параметр γ) по каталогу ВКА в пределах Кавказской коллизионной области, по (Арефьев et al., 1989): 1 — $\geq 0,6$; 2 — $0,5-0,6$; 3 — $\gamma - 0,4-0,5$; 4 — $0,3-0,4$; 5 — границы Аграхан-Тбилиско-Левантийской зоны. Б. Схема добротности среды (параметр Q) Кавказа, по (Кузнецова [Kuznetsova], 1997): 1 — менее 210; 2 — 210–370; 3 — 370–460; 4 — границы Аграхан-Тбилиско-Левантийской зоны; 5 — Границы Транскавказского поперечного поднятия. Буквенные обозначения: АЛЗ — Аграхан-Левантийская зона, ТКПП — Транскавказское поперечное поднятие

Fig. 4. A. The fractional scheme (parameter γ) according to the BKA catalog within the Caucasian collision region (according to Arefyev et al., 1989): 1 — $\geq 0,6$; 2 — $0,5-0,6$; 3 — $\gamma - 0,4-0,5$; 4 — $0,3-0,4$. 5 — the boundaries of the Agrakhan-Tbilisi-Levantine Zone. B. The Q -factor scheme of the environment (parameter Q) of the Caucasus (Kuznetsova, 1997). 1 — Q — less 210; 2 — 210–370; 3 — 370–460; 4 — the boundaries of the Agrakhan-Tbilisi-Levantine Vone; 5 — The boundaries of the Transcaucasian Transverse Uplift. Letter designations: АЛЗ — Agrakhan-Levantine Zone, ТКПП — Transcaucasian Transverse Uplift

линеamentная зона, сопровождаемая зонами рассеянных левых сдвигов (рис. 2, Б). Она составляет вместе с правосдвиговой Азово-Куриной сопряженную пару, указывающую на сжатие в субмеридиональном направлении (давление со стороны Аравийской плиты) (Видяпин [Vidyarin], 2008). Составленная кинематическая схема хорошо согласуется с моделями коллизионных процессов, протекающих в регионе, полученными на основе других методов (сейсмотектонического, структурно-тектонического, геодезического и т.д.) (Копп [Kopp], 1989; Philip et al., 1989). Это можно считать свидетельством того, что результаты проведенного анализа рельефа корректны и могут быть использованы при геодинамическом анализе.

Интересно отметить, что эта зона развивается параллельно крупному Средне-Русскому линеamentу, пересекающему центральную область Евразийской плиты и контролирующему Среднерусскую систему авлакогенов на Восточно-Европейской платформе (Видяпин, Муравьев [Vidyarin, Muraviev], 1993).

Результаты линеamentного анализа, проведенного за пределами Кавказского региона, позволяют проследить эту зону в пределы Африканской и Евразийской плит (Видяпин [Vidyarin], 2010) (рис. 6). В связи с этим можно считать ее крупной транс-плитной зоной геодинамической активности.

Другая известная сквозная поперечная зона — Транскавказское поперечное поднятие. В рельефе оно включает наиболее высокогорные области Большого и Малого Кавказа, Курино-Рионский водораздел, Ставропольскую возвышенность. Положение и ориентировку границ поднятия фиксируют наиболее развитые линеamentные зоны суб-меридиональной ориентировки (рис. 2, Б).

В пределах поднятия располагаются: все основные выступы кристаллического основания Главного и Передового хребтов; Ставропольский выступ, разделяющий Кубанский и Терско-Каспийский краевые прогибы; Дзирульский выступ, разделяющий Рионский и Куринский межгорные прогибы; Аджаро-Триалетская зона. Оно проявлено и в распределении фаций и мощностей мезо-

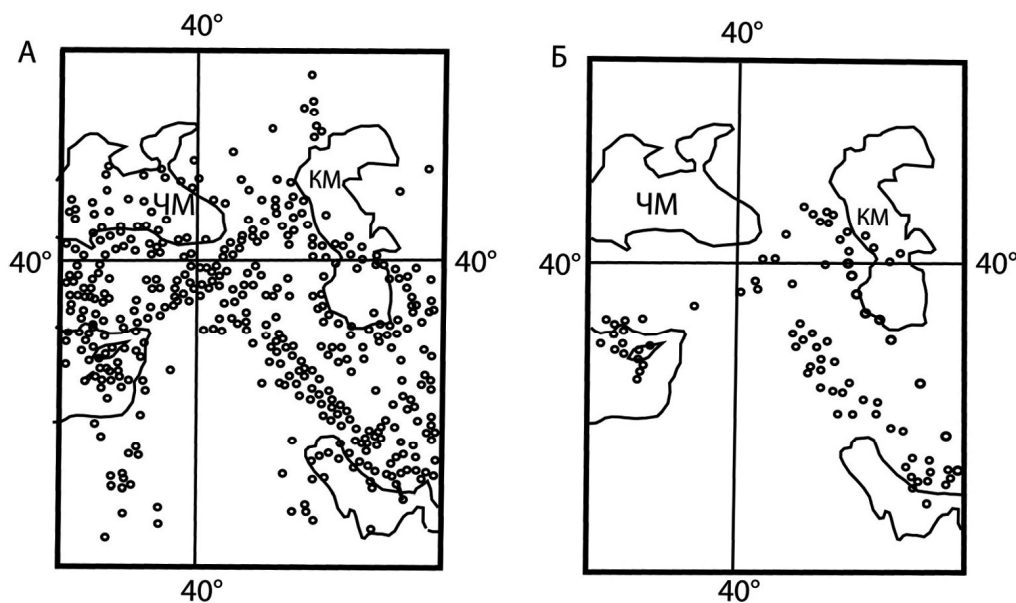


Рис. 5. Положение эпицентров крупных сейсмических событий (А — корových, Б — мантийных) в пределах Кавказской коллизионной области (Хаин, Лобковский [Khain, Lobkovsky], 1990). Буквенные обозначения: ЧМ — Черное море; КМ — Каспийское море
 Fig. 5. The position of the epicenters of large seismic events (A — crustal, Б — mantle) within the Caucasian collision region (Khain, Lobkovsky, 1990). Letter designations: ЧМ — Black Sea; КМ — Caspian Sea

кайнозойских осадков на Закавказском срединном массиве и в Предкавказье. В пределах этого поднятия располагаются основные поля неоген-четвертичных и современных вулканитов, а также субмеридиональная полоса повышенной плотности эпицентров землетрясений (рис. 3, А-Б), что позволяет говорить о ее высокой молодой геодинамической активности.

С ним совпадают также зона повышенных средних сейсмических скоростей в коре (Арефьев и др. [Arefiev et al.], 1989; Краснопевцева [Krasnopedtseva], 1996) и основная область, характеризующаяся повышенными значениями дефицита скоростей продольных сейсмических волн в верхней мантии (Кузнецова [Kuznetsova], 1997) (рис. 3, Б), что свидетельствует о глубинности источника этой активности.

Линеаментные зоны, контролирующие Транскавказское поперечное поднятие, по комплексу геоморфологических, геологических и геофизических данных могут быть прослежены севернее на территории Восточно-Европейской платформы (Видяпин [Vidyarin], 2010), что указывает на глобальный (трансконтинентальный) ее характер.

Интересно обратить внимание на систему субмеридиональных линеаментов, также находящихся отражение в распределении проявлений геодинамической активности (прежде всего, современной). Она включает не только линеаменты, ограничивающие Транскавказское поперечное поднятие, но и ряд параллельных линеаментов, в частности Урало-Оманский. Все они, так же как и Аграхан-Тбилисский линеамент, могут быть прослежены на обеих конвергирующих плитах — Аравийской и Евразийской.

Обсуждение результатов

Изложенные факты позволяют говорить о том, что рассмотренные геодинамически активные зоны имеют хорошую выраженность в поле линеаментов, выявленных на основании анализа современного рельефа (морфолинеаментов). Указанные морфолинеаменты, таким образом, служат дополнительными доказательствами существования этих зон. Оценка ориентировки поля напряжений в пределах рассмотренного региона, проведенная по сопряженным парам морфолинеаментов сдвиговой природы, дает такой же результат, как и при использовании других методов (сейсмологических или геотектонических). Это позволяет утверждать, что линеаментный анализ может быть использован для оценки некоторых параметров современного поля напряжений.

Особенно важную роль морфолинеаменты имеют при прослеживании таких геодинамически активных зон, которые пересекают крупные тектонические единицы (Большой и Малый Кавказ) и выходят в пределы соседних платформенных областей. В этом случае проследить их по геологическим и геотектоническим данным надежно нельзя в силу существенного различия режимов тектонических процессов в платформенных и складчатых областях. Здесь необходим оценочный параметр, качественно не отличающийся в их пределах. Одним из таких параметров, несомненно, самым надежным, а также самым легкодоступным, служит современный рельеф земной поверхности. При этом его линеаментный анализ наиболее информативен. Конечно, вынесение оценок геологическо-

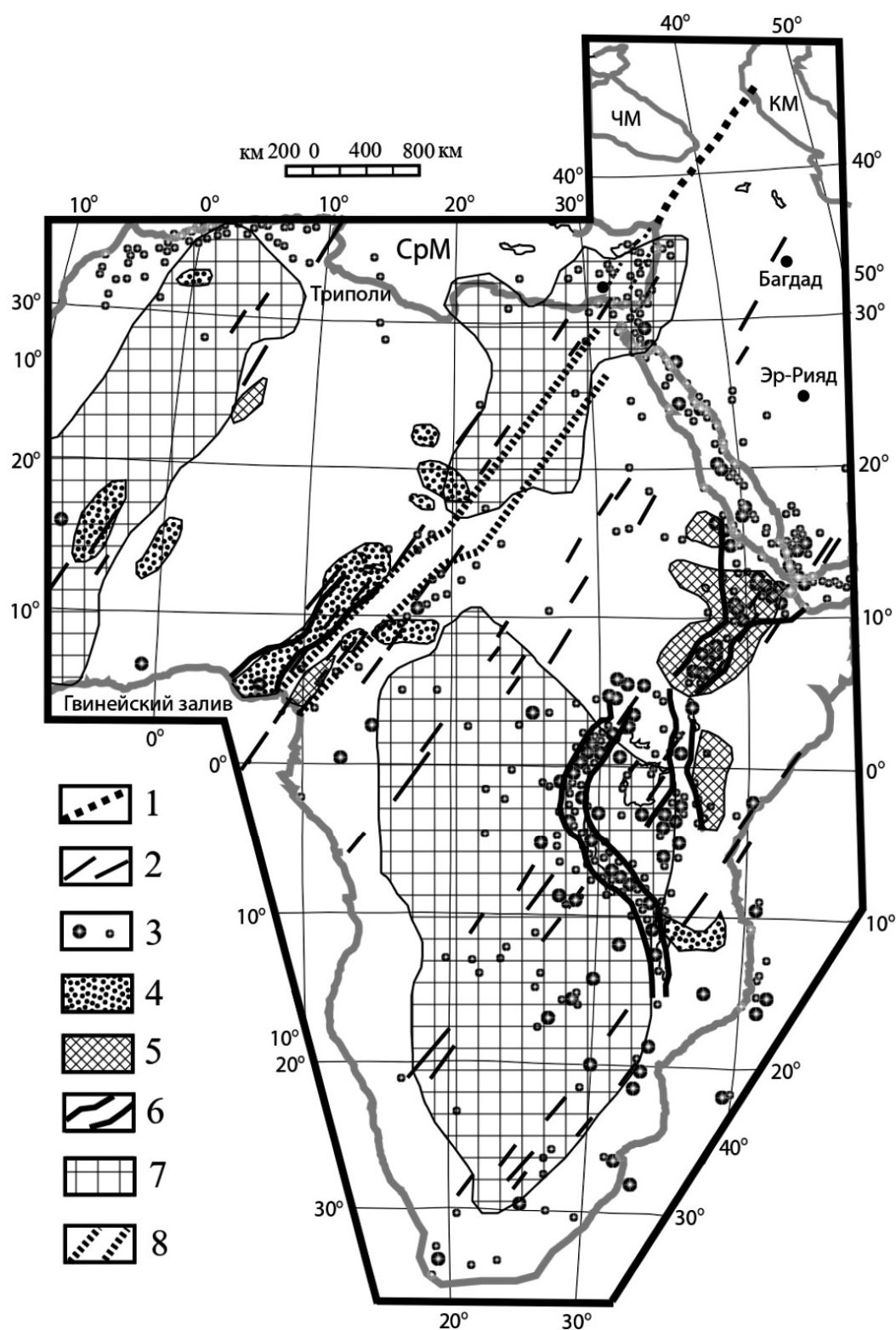


Рис. 6. Проявленность Камерун-Египетской геодинамически активной зоны и параллельных ей линеаментов в геолого-геофизических материалах:

1 — положение Аграхан-Тбилиско-Левантиской зоны; 2 — линейные элементы дешифрирования рельефа; 3 — эпицентры землетрясений (M — более 5); 4 — бассейны накопления плиоцен-эоценовых континентальных осадков; 5 — области развития кайнозойского вулканизма; 6 — границы кайнозойских рифтов; 7 — области с мощностью коры более 30 км; 8 — границы Камеруно-Суданского протерозойского складчатого пояса. Буквенные обозначения: СрМ — Средиземное море; ЧМ — Черное море; КМ — Каспийское море

Fig. 6. The manifestation of the Cameroon-Egypt geodynamic active zone and its parallel lineaments in geological and geophysical materials:

1 — the position of the Agrakhan-Tbilisi-Levantine Zone; 2 — linear elements of relief identification; 3 — earthquake epicenters (M — more than 5); 4 — Pliocene-Eocene continental sedimentary basins; 5 — areas of Cenozoic volcanism development; 6 — the boundaries of Cenozoic rifts; 7 — areas with a crust thickness of more than 30 km; 8 — the boundaries of the Cameroon-Sudanese Proterozoic folded belt. Letter designations: CpM — Mediterranean Sea; ЧМ — Black Sea; КМ — Caspian Sea

го, геотектонического и геодинамического плана только на основе линеamentного анализа рельефа невозможно, но использование его результатов, безусловно, полезно.

С учетом сделанных замечаний применение линеamentного анализа, с нашей точки зрения, позволяет:

1) производить разложение сложного реального структурного рисунка какого-либо геопоя на системы прямолинейных составляющих (линейная аппроксимация);

2) выделять слабовыраженные протяженные линейные зоны различной природы;

3) устанавливать геометрические закономерности линейных структурных рисунков в пределах различных площадей или блоков (преобладающие направления, шаг линеamentов по интервалу и по углу и т.д.);

4) выявлять некоторые более сложные сочетания линеamentов в строении геопоев (концентрические и многоугольные структуры и др.);

5) обнаруживать структурные связи удаленных друг от друга геобъектов.

Заключение

Таким образом, линеamentный анализ современного рельефа позволяет выделять как отдель-

ные линеamentные зоны, так и их закономерно построенные системы. После дифференциации таких зон на сбросовые и сдвиговые некоторые из таких систем могут служить основанием для определения некоторых элементов напряженного состояния. Наиболее крупные линеamentные зоны должны стать предметом тестирования по комплексу геодинамических параметров с целью выделения геодинамически активных зон, как современных, так и имеющих длительную историю. Кроме этого, результаты линеamentного анализа современного рельефа позволяют проследить сквозные линеamentные зоны, пересекающие несколько геодинамических зон с разными геодинамическими режимами, и ставить вопросы о природе связей удаленных и, казалось бы, разнородных структур — таких, как бассейн Северного Каспия и зона Восточно-Анатолийского разлома. Интерес представляет и оценка связи различных процессов, в том числе и разновозрастных, например современной сейсмичности и мезо-кайнозойского осадконакопления.

Благодарности/Финансирование

Работа выполнена в рамках Госзадания ИФЗ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

Арефьев С.С., Татевосян Р.Э., Шебалин Н.В. Об устойчивости собственной пространственно-временной структуры сейсмичности Кавказа // Физика Земли. 1989. № 12. С. 34–47.

Архангельская В.В. Линеamentная тектоника — современная концепция геологической истории Земли (на примере Байкальской горной области России) // Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики. Материалы ХLI Тектонического совещания. Т. 1 / Ред. Ю.В. Карякин. М.: ГЕОС, 2008. С. 35–38.

Белоусов В.В. Основные вопросы геотектоники. М.: Гостехиздат, 1962. 608 с.

Ваков А.В., Никонов А.А. Космофотолинеamentы Кавказского региона // Геоморфология. 1998. № 1. С. 52–55.

Видяпин Ю.П. Глубинные зоны геодинамической активности и их роль в строении и развитии Кавказской коллизионной области // Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики. Материалы ХLI Тектонического совещания. Т. 1. / Ред. Ю.В. Карякин. М.: ГЕОС, 2008. С. 138–142.

Видяпин Ю.П. Камерун-Египетская зона геодинамической активности как продолжение Аграхан-Тбилисско-Левантийской зоны дислокаций // Тектоника и геодинамика складчатых поясов и платформ фанерозоя. Материалы ХLIII Тектонического со-

вещения. Т. 1 / Ред. Н.Б. Кузнецов. М.: ГЕОС, 2010. С. 107–111.

Видяпин Ю.П., Муравьев В.В. Структура геофизических полей и очаговые системы Восточно-Европейской платформы // Международная научная конференция «Геофизика и современный мир». 9–13 августа 1993 г. Сборник рефератов докладов. М.: ВИНТИ, 1993. С. 154.

Глумов И.Ф., Маловицкий Я.П., Новиков А.А., Сенин Б.В. Региональная геология и нефтегазоносность Каспийского моря. М.: Недра, 2004. 342 с.

Казьмин В.Г., Тихонова Н.Ф. Позднемезозойские эоценовые окраинные моря в Черноморско-Каспийском регионе: палеотектонические реконструкции // Геотектоника. 2006. № 3. С. 9–22.

Копп М.Л. Кинематика Кавказа на орогенном этапе // Геодинамика Кавказа / Ред. А.А. Белов, М.А. Сатиан. М.: Наука, 1989. С. 113–122.

Короновский Н.В. Аграхан-Тбилисско-Левантийская зона — важная структура Кавказского региона // Доклады Академии наук. 1994. Т. 337, № 1. С. 75–79.

Короновский Н.В., Брянцева Г.В., Гончаров М.А., Наймарк А.А., Конаев А.В. Линеamentы, планетарная трещиноватость и регматическая сеть: суть явлений и терминология // Геотектоника. 2014. № 2. С. 75–88.

- Космическая информация в геологии / Ред. А.В. Пейве, А.В. Сидоренко, А.Л. Яншин, В.И. Макаров, В.М. Моралев, Ю.Г. Сафонов, В.Г. Трифонов, П.В. Флоренский. М.: Наука, 1983. 534 с.
- Краснопевцева Г.В. Глубинное строение Кавказского региона // Геофизические параметры литосферы южного сектора Альпийского орогена / Ред. Б.С. Вольвовский, В.И. Старостенко. Киев: Наукова думка, 1996. С. 151–178.
- Кузнецова К.И. О факторе растяжения в процессе горообразования // Проблемы эволюции тектоносферы / Ред. В.Н. Шолпо. М.: ОИФЗ РАН, 1997. С. 388–401.
- Леонов Ю.Г. Миф об Урало-Оманском линейменте // Геотектоника. 1994. № 5. С. 82–84.
- Макаров В.И. Четвертичная тектоника и геодинамика платформенных территорий: актуальные проблемы изучения // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. 2008. № 68. С. 10–25.
- Методическое руководство по изучению планетарной трещиноватости и линейментов / Ред. С.С. Шульц. Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1977. 136 с.
- Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, 1968. 483 с.
- Надирадзе В.В. Роль линейментов в геологическом строении и распределении месторождений полезных ископаемых Кавказа // Труды Геологического института Академии наук Грузии. Новая серия. 2004. Вып. 119. 122 с.
- Поletaев А.И. Линейментная делимость земной коры // Общая и региональная геология морей и океанов: геологическое картирование. Обзор. М.: АО «Геоинформмарк», 1994. 44 с.
- Радкевич Е.А. Системы разломов Земли // Доклады АН СССР. 1989. Т. 304, № 1. С. 171–174.
- Расцветаев Л.М. О некоторых актуальных проблемах структурной геологии и тектонофизики // Тектонофизика сегодня (к юбилею М.В. Гзовского) / Ред. В.Н. Страхов, Ю.Г. Леонов. М.: ОИФЗ РАН, 2002. С. 333–374.
- Сим Л.А. Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам: (методы, результаты, рекомендации) // Известия Высших учебных заведений. Геология и разведка. 1991. № 10. С. 3–22.
- Суворов А.И. Тектоническая делимость литосферы: проблемы и перспективы изучения. Статья 1. Характеристика форм тектонической делимости // Геотектоника. 1986. № 1. С. 17–31.
- Хаин В.Е. Главные противоречия современной геотектоники и геодинамики и возможные пути их преодоления // Области активного тектогенеза в современной и древней истории Земли. Материалы XL Тектонического совещания / Ред. Ю.В. Карякин. М.: ГЕОС, 2007. Т. 2. С. 324–329.
- Хаин В.Е., Лобковский Л.И. Об особенностях формирования коллизионных орогенов // Геотектоника. 1990. № 6. С. 20–31.
- Шульц С.С. Об изучении планетарной трещиноватости // Деформации пород и тектоника / Ред. А.В. Пейве. 22 сессия Международного геологического конгресса. Доклады советских геологов. Проблема 4. М.: Наука, 1964. С. 147–153.
- Шульц С.С. Планетарная трещиноватость (основные положения) // Планетарная трещиноватость / Ред. Шульц С.С. Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1973. С. 5–37.
- Шукин Ю.К., Бабак В.И., Краснопевцева Г.В. О связи структурно-геоморфологических и геолого-тектонических глубинных направлений земной коры // Связь поверхностных структур земной коры с глубинными. Часть 2 // Материалы четырнадцатой международной конференции, 27–31 октября 2008 г. / Ред. Н.В. Шаров, В.В. Щипцов, Ю.К. Шукин, А.В. Первунина, Н.А. Яблокова, Г.Н. Соколов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2008. С. 369–373.
- Hobbs W. Repeating patterns in the relief and the structure of the land // Bulletin of Geological Society of America. 1911. Vol. 2. P. 123–176.
- Philip H., Cisternas A., Gvshiani F., Gorshkov A. The Caucasus: An actual example of the initial stages of continental collision // Tectonophysics. 1989. Vol. 161. P. 1–21.
- Sonder R.A. Die Lineamenttektonik und ihre Probleme // Eclogae Geologicae Helveticae. 1938. Vol. 31, N 1. S. 199–238.

REFERENCES

- Arefiev S.S., Tatevosyan R.E., Shebalin N.V. On the stability of the intrinsic space-time structure of seismicity of the Caucasus. *Fizika Zemli*. 1989. 12:34–47.
- Arkhangelskaya V.V. Lineament tectonics — a modern concept of the geological history of the Earth (on the example of the Baikal Mountain region of Russia). In: Karyakin Yu.V. (ed.). *Obshchie i regionalnye problemy tektoniki i geodinamiki*. Materialy XLI Tektonicheskogo soveshchaniya. Volume 1. Moscow: Publishing House "GEOS", 2008:35–38.
- Belousov V.V. The main issues of geotectonics. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1962:1–608.
- Glumov I.F., Malovitsky Ya.P., Novikov A.A., Senin B.V. Regional geology and oil and gas potential of the Caspian Sea. Moscow: Publishing House "Nedra", 2004:1–342.
- Hobbs W. Repeating patterns in the relief and the structure of the land. *Bulletin of Geological Society of America*. 1911. 2:123–176.
- Kazmin V.G., Tikhonova N.F. Late Mesozoic-Eocene marginal seas in the Black Sea-Caspian region: Paleotectonic reconstructions. *Geotektonika*. 2006. 3:9–22.
- Khain V.E. The main contradictions of modern geotectonics and geodynamics and possible ways to overcome them.

In: Karyakin Yu.V. (ed.). Oblasti aktivnogo tektogeneza v sovremennoy i drevney istorii Zemli. Materialy XL Tektonicheskogo Soveshchaniya. Moscow: Publishing House "GEOS", 2007. 2:324–329.

Khain V.E., Lobkovsky L.I. On the peculiarities of the formation of collisional orogens. *Geotektonika*. 1990. 6:20–31.

Kopp M.L. Kinematics of the Caucasus at the orogenic stage. In: Belov A.A., Satian M.I. (eds). Geodynamics of Caucasus. Moscow: Publishing House "Nauka", 1989:113–122.

Koronovsky N.V. Agrakhan-Tbilisi-Levantine Zone – the most important structure of the Caucasus region. *Doklady Akademii Nauk*. 1994. 337(1):75–79.

Koronovsky N.V., Bryantseva G.V., Goncharov M.A., Naimark A.A., Kopaev A.V. Lineaments, planetary fracturing and regmatic network: the essence of phenomena and terminology. *Geotektonika*. 2014. 2:75–88.

Krasnopevtseva G.V. The deep structure of the Caucasus region. In: Volvovsky B.S., Starostenko V.I. (eds). Geophysical parameters of the lithosphere of the southern sector of the Alpine Orogen. Kiev: Publishing House "Naukova dumka", 1996:151–178.

Kuznetsova K.I. About the stretching factor in the process of mountain building. In: Sholpo V.N. (ed.). Problemy evolyucii tektonosfery. Moscow: OIFZ RAN, 1997: 388–401.

Leonov Yu.G. The myth of the Ural-Omani lineament. *Geotektonika*. 1994. 5:82–84.

Makarov V.I. Quaternary tectonics and geodynamics of platform territories: actual problems of studying. *Byulleten Komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda*. 2008. 68:10–25.

Milanovsky E.E. The neotectonics of the Caucasus. Moscow: Publishing House "Nedra", 1968:1–483.

Nadiradze V.V. The role of lineaments in the geological structure and distribution of mineral deposits of the Caucasus // *Trudy Geologicheskogo Instituta Akademii Nauk Gruzii*. Novaya seriya. 2004. 119:1–122.

Peive A.V., Sidorenko A.V., Yanshin A.L., Makarov V.I., Moralev V.M., Safonov Yu.G., Trifonov V.G., Florensky P.V. (eds). Space Information in Geology. Moscow: Publishing House "Nauka", 1983:1–534.

Philip H., Cisternas A., Gvshiani F., Gorshkov A. The Caucasus: An actual example of the initial stages of continental collision. *Tectonophysics*. 1989. 161:1–21.

Poletaev A.I. Lineament divisibility of the Earth's crust. In: General and regional geology of the seas and oceans: geol. Mapping: Overview. Moscow: Geoinformmark, 1994:1–44.

Radkevich E.A. Earth Fault Systems. *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 1989. 304(1):171–174.

Rastsvetaev L.M. About some actual problems of structural geology and tectonophysics. In: Strakhov V.N., Leonov Yu.G.

(eds). Tektonofizika segodnya (k yubileyu M.V. Gzovskogo). Moscow: OIFZ RAN, 2002:333–374.

Shchukin Yu.K., Babak V.I., Krasnopevtseva G.V. On the relationship of structural-geomorphological and geological-tectonic deep directions of the Earth's crust. In: Sharov N.V., Shchiptsov V.V., Shchukin Yu.K., Pervunina A.V., Yablokova N.A., Sokolov G.N. (eds). Svyaz Poverhnostnykh Struktur Zemnoy Kory s Glubinnymi. Chast 2. Materialy chetyrnadtsatoy mezhdunarodnoy konferentsii. Petrozavodsk: Karelskiy Nauchnyy Centr RAN, 2008:369–373.

Shulz S.S. On the study of planetary fracturing. In: Peive A.V. (ed.). Deformatsii Porod i Tektonika. 22 sessiya mezhdunarodnogo geologicheskogo kongressa. Doklady sovetskikh geologov. Problema 4. Moscow: Publishing House "Nauka", 1964. 2:147–153.

Shulz S.S. Planetary fracturing (main positions). In: Shulz, S.S. (ed.). Planetarnaya treshchinovatost. Leningrad: Leningrad University Press, 1973:5–37.

Shulz S.S. (ed.). Methodological guide for the study of planetary fracturing and lineaments. Leningrad: Leningrad University Press, 1977:1–136.

Sim L.A. Study of tectonic stresses by geological indicators: (Methods, results, recommendations). *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Geologiya i Razvedka*. 1991. 10:3–22.

Sonder R.A. Die Lineamenttektonik und ihre Probleme. *Eclogae Geologicae Helveticae*. 1938. 31(1):199–238.

Suvorov A.I. Tectonic divisibility of the lithosphere: problems and prospects of study. Article 1. Characteristics of tectonic divisibility forms. *Geotektonika*. 1986. 1:17–31.

Vakov A.V., Nikonov A.A. Cosmophotolineaments of the Caucasus Region. *Geomorfologiya*. 1998. 1:52–55.

Vidyapin Yu.P. Deep zones of geodynamic activity and their role in the structure and development of the Caucasian collision region. In: Karyakin Yu.V. (ed.). Obshchie i regionalnye problemy tektoniki i geodinamiki. Materialy XLI Tektonicheskogo soveshchaniya. T. 1. Moscow: Publishing House "GEOS", 2008:138–142.

Vidyapin Yu.P. Cameroon-Egyptian Zone of geodynamic activity as a continuation of the Agrakhan-Tbilisi-Levantine dislocation zone. In: Kuznetsov N.B. (ed.). Tektonika i geodinamika skladchatykh poyasov i platform fanerozoia. Materialy XLIII Tektonicheskogo soveshchaniya. T.1. Moscow: Publishing House "GEOS", 2010:107–111.

Vidyapin Yu.P., Muraviev V.V. The structure of geophysical fields and focal systems of the East European Platform. In: Anonymous. Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya "Geofizika i Sovremenniy Mir". 9–13 August 1993. Collection of papers abstracts. Moscow: VINITI, 1993: 154.

Сведения об авторах: *Видяпин Юрий Петрович* — канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотр. лаб. тектоники и геодинамики № 103, ИФЗ РАН; *Бондарь Иван Владимирович* — науч. сотр. лаб. фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики № 204 ИФЗ РАН, bond@ifz.ru

Information about the authors: *Yuriy P. Vidyapin* — Cand. Sci. (Geol. Mineral), senior researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth; *Ivan V. Bondar* — researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth, bond@ifz.ru

Поступила в редакцию 12.01.21

Received 12.01.21