

МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.4.012

ГОСТЕВА Т. С., ПАТРАКОВА В. С.

**ОПЫТ ТРЕНД-АНАЛИЗА РЕЛЬЕФА И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
ПРИ МОРФОСТРУКТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ
(НА ПРИМЕРЕ КАВКАЗА)**

Тренд-анализ используется как вспомогательный прием математического моделирования при геолого-геоморфологических исследованиях различной направленности, и методика его применения освещена во многих публикациях советских и зарубежных исследователей [1,2 и др.]. К тренд-анализу прибегают в тех случаях, когда возникает необходимость разделения изучаемого объекта на две или более компоненты, из которых одна отражает главные его особенности, основную структуру, а другая — второстепенные детали, наложенные черты, которые проявляются на фоне основной структуры.

Однако при проведении тренд-анализа возникает одно существенное затруднение, которое заключается в содержательной интерпретации отдельно взятых факторов — регионального и локального. На это не раз обращали внимание исследователи [2]. Трудность состоит в том, что региональный и локальный факторы обычно не проявляются раздельно, а существуют в тесной взаимосвязи друг с другом.

Вопрос объективности тренд-поверхностей рассматривается нами в процессе методических работ, касающихся применения тренд-анализа для решения геолого-геоморфологических задач. Эксперимент имеет целью выяснение объективности и геологической информативности моделей региональных и локальных составляющих современного рельефа Кавказа. Исходными данными для расчетов послужили абсолютные отметки рельефа (более 20 тыс. точек), снятые со среднемасштабной топографической карты по сетке с шагом в 2 см. При отборе данных вся территория Кавказа делилась на участки с учетом основных орографических провинций: Предкавказья, Большого Кавказа, Рионо-Куринской депрессии и Малого Кавказа. Однако отбор данных осуществлялся с большим перекрытием, поэтому можно считать, что расчеты проводились практически по произвольно выбранным участкам. Затем изолинейные карты тренд-поверхностей для каждого из участков согласовывались друг с другом.

Согласно используемой нами программе [3] и методике проведения тренд-анализа, разработанной в объединении «Аэрогеология» [4], для каждого из участков рассчитывались региональные составляющие рельефа (тренд-поверхности) и их отклонения от реального рельефа (остаточные поверхности) для последовательных уровней аппроксимации, которая выполнена с помощью многочленов пяти степеней от первой до пятой. Дальнейшее увеличение степени аппроксимации нецелесообразно, поскольку сила тренда региональной составляющей 5-го порядка составила в среднем 79%.

Помимо карт региональных и локальных (остаточных) составляющих рельефа строились карты разностей тренд-поверхностей двух соседних уровней аппроксимации. Эти карты характеризуют локальные закономерности, освобожденные от мелких, несистематических флукту-

аций исследуемого параметра. Из указанных трех групп аналитических карт нас интересовали две — карты региональных составляющих и разностные карты (модели «Δ»). Карты собственно остаточных поверхностей, отражающие закономерности локального уровня и несистематические, частные флуктуации абсолютных отметок рельефа, нами не анализировались. Обе указанные группы карт приведены на рис. 1. Визуальный анализ полученных моделей рельефа свидетельствует о том, что региональные составляющие характеризуют основные орографические единицы региона на разном уровне аппроксимации, а локальные (модели Δ) — внутреннюю их структуру. Полученные модели рельефа сравнивались с геологическими и геофизическими материалами, а также непосредственно с топографическими картами различных масштабов и данными дешифрирования космических снимков.

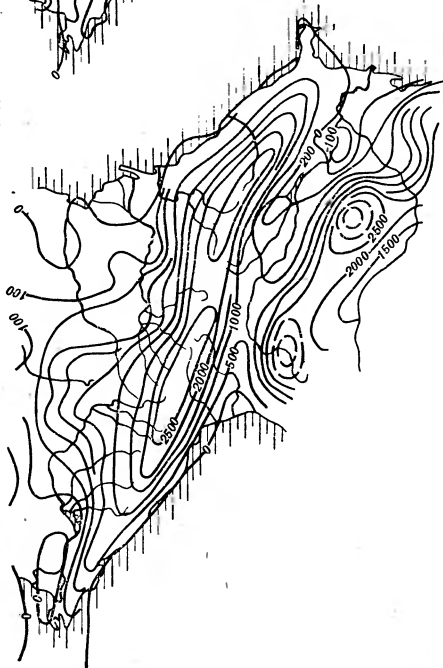
Сравнение моделей с топографическими картами показало, что все читающиеся на них структурные элементы, и в частности зоны тектонических нарушений, находят подтверждение в ряде структурно-геоморфологических признаков (рисунку гидросети, реликтах древнего рельефа, резкой смене гипсометрических уровней и т. п.). С другой стороны, в сложном сочетании разнопорядковых и генетически различных форм современного рельефа многие структурные закономерности затухают и не выявляются с той конкретностью, как на поверхностях тренда. Сопоставления с геологическими материалами показали, что модели рельефа несут реальную геологическую информацию, касающуюся тектонической основы рельефа и разнопорядковых элементов современной морфоструктуры региона. Так, элементы, отраженные на региональных составляющих, хорошо коррелируются с крупными мегаскладчатыми зонами Кавказа, а также с рельефом поверхности Мохо. Эти модели дают представление о характере и протяженности тектонических нарушений, ограничивающих мегаскладчатые зоны, что хорошо согласуется с данными дешифрирования космических снимков. При этом модели содержат и дополнительную информацию, касающуюся протяженности мегаскладчатых зон, параметров отдельных мегаскладок — их амплитуды, кулисообразного расположения, характера периклинальных замыканий и т. п. Модели позволяют более уверенно трассировать тектонические нарушения и ранжировать их. Что касается моделей Δ, то они несут информацию о характере и направлении тектонических нарушений, которые читаются по сгущению и рисунку изолиний. Кроме того, эти модели выявляют тектонические направления, существующие в рельефе, но выраженные недостаточно четко и потому ускользающие от внимания исследователей. Эти тектонические направления читаются по полосовидному расположению знакопеременных аномалий рельефа, их характеру и простираанию осей. Примером может служить зона северо-северо-западного простираания, которая фиксируется моделью Δ III порядка. Она совпадает с направлением «линии Шатского», четко дешифрирующейся на космических снимках, а также находит свое продолжение в тектонических нарушениях за пределами Кавказа, прослеживающихся в район Персидского залива.

Любопытны результаты анализа модели Δ V порядка, которая в непривычном для нас плане представляет структуру мегантиклинория Большого Кавказа. Эта модель фиксирует различия в генеральных простирааниях структурных элементов центрального и восточного секторов Кавказа — северо-западных для первого и северо-восточных для второго. Рисунок модели дает представление о принадлежности этих двух секторов к разным тектоническим единицам и выявляет поперечное положение Горного Дагестана по отношению к собственно кавказским структурным направлениям.

Сопоставление полученных моделей с палеоструктурными материалами свидетельствует о том, что локальные составляющие рельефа отражают элементы структурных планов, предшествующих новейшему, а региональные составляющие — элементы новейшей морфоструктуры. На результатах этого сопоставления имеет смысл остановиться более

РЕГИОНАЛЬНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ РЕЛЬЕФА

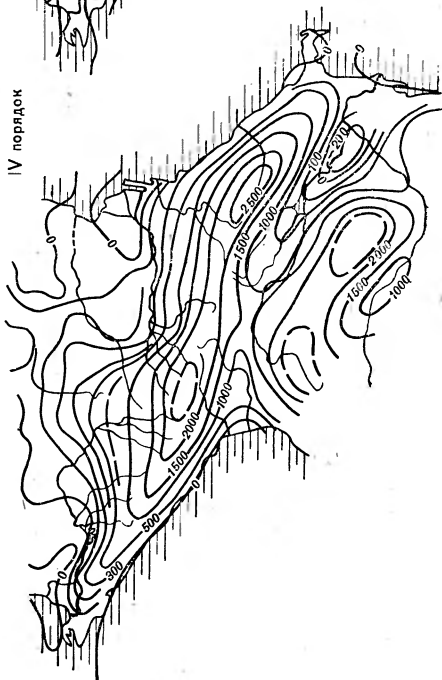
V порядок



ЛОКАЛЬНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ РЕЛЬЕФА



IV порядок



0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 1100 1200 1300 1400 1500 1600 1700 1800 1900 2000 2100 2200 2300 2400 2500 2600 2700 2800 2900 3000 3100 3200 3300 3400 3500 3600 3700 3800 3900 4000 4100 4200 4300 4400 4500 4600 4700 4800 4900 5000 5100 5200 5300 5400 5500 5600 5700 5800 5900 6000 6100 6200 6300 6400 6500 6600 6700 6800 6900 7000 7100 7200 7300 7400 7500 7600 7700 7800 7900 8000 8100 8200 8300 8400 8500 8600 8700 8800 8900 9000 9100 9200 9300 9400 9500 9600 9700 9800 9900 10000



Рис. 1. Тренд-анализ рельефа Кавказа

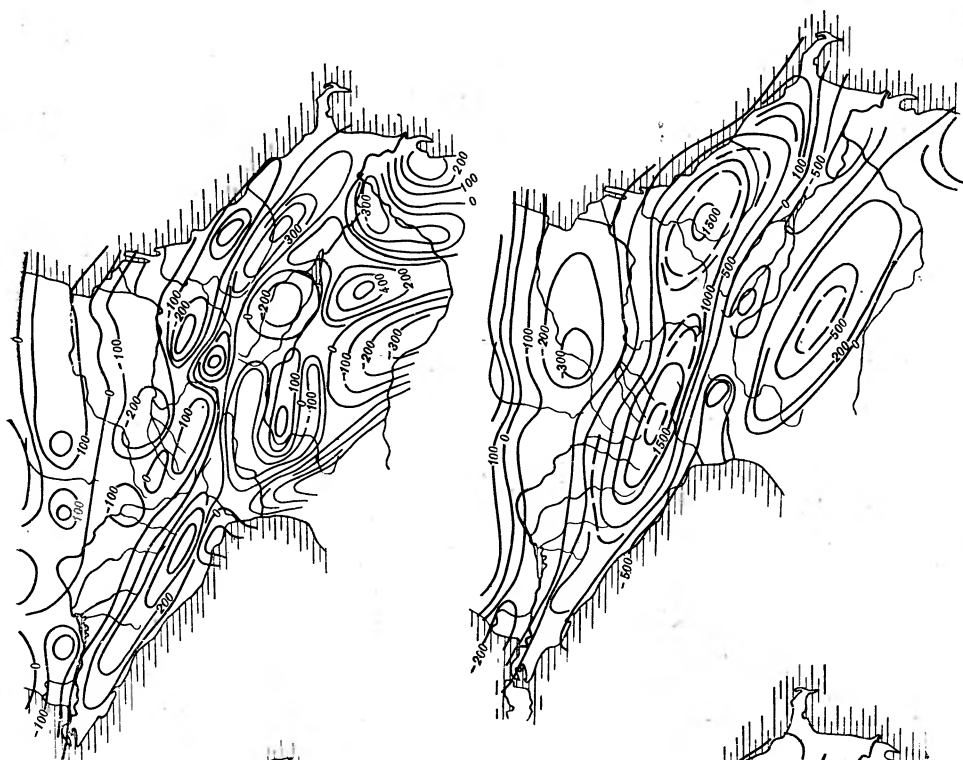
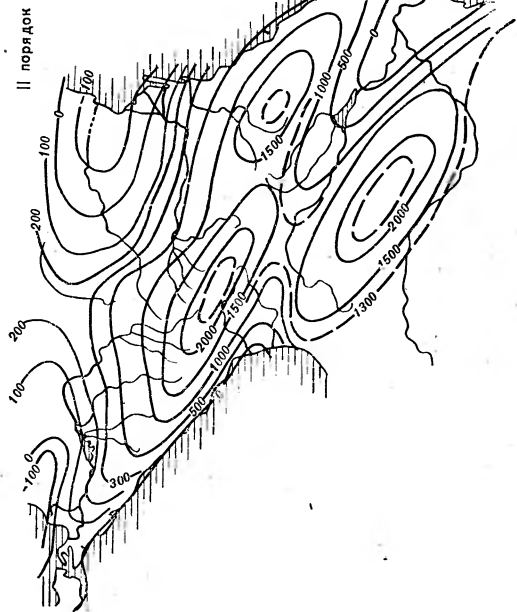
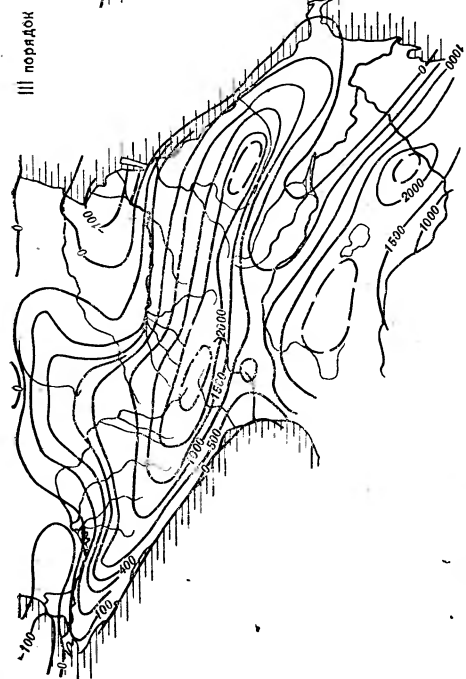


Рис. 1 (продолжение)

подробно, поскольку такой аспект интерпретации тренд-поверхностей представляется нам наиболее важным.

Палеоструктурные материалы, использованные для сравнения, заимствованы из монографии [5]. Достоинство этих материалов состоит в том, что они обобщают громадный опыт исследования Кавказа; касаются всего региона в целом; представлены в мелком масштабе, соответствующем масштабу наших работ; в определенной степени генерализованы, что позволяет сравнить их с моделями также генерализованного рельефа.

Сравнение проводилось по шести профилям (см. рис. 3) и сопровождалось расчетом коэффициентов парной корреляции между рельефом поверхности тренда и рельефом подошвы отложений того или иного возраста и составлением корреляционных схем. В конечном счете каждая из рассматриваемых аналитических карт — моделей рельефа была прокоррелирована (по разрезам) последовательно со всеми картами мощностей разновозрастных отложений, начиная от лейаса до апшерона включительно.

Массовому расчету коэффициентов корреляции (r) предшествовал эксперимент, имевший целью оценить r для всей линии профиля, пересекающего регион вскрест простираения структуры. Расчет показал, что значения r , полученные для всего профиля в целом, составляют 0,11; 0,13, тогда как для отдельных орографических провинций они приближаются к единице. Исключением являлась корреляция региональных составляющих рельефа с мощностями отложений орогенного этапа, характеризующаяся высокими положительными значениями r для всей линии профиля. Таким образом, эксперимент показал, что корреляционные связи рельефа с палеоструктурными элементами доорогенного плана специфичны для каждой из орографических провинций Кавказа, а с элементами орогенного структурного плана — едины для всего региона в целом, что, вероятно, отражает особенности истории его геологического развития. Последующий расчет коэффициентов корреляции производился раздельно, для каждой орографической провинции. Результаты расчетов были сведены в таблицу (рис. 2), анализ которой показывает следующее.

Все разнопорядковые модели рельефа, отражающие как региональные, так и локальные закономерности его строения, обнаруживают корреляцию с теми или иными палеоструктурными элементами, которые фиксируются картами мощностей и фаций. По характеру корреляционных связей и возрастному порогу четко определяются три группы моделей рельефа. Первые две — региональные составляющие II—V порядка и модель Δ II порядка обнаруживают прямую корреляцию с распределением мощностей новейших отложений Кавказа. При этом для региональных составляющих рельефа III—V порядков наиболее характерна корреляция с мощностями отложений позднеорогенного этапа ($N_2^1 - N_2^2 - N_2^3 - Q_1$), а для региональной составляющей и модели Δ II порядка — с мощностями отложений раннеорогенного этапа ($P_3 - N_1^2 - N_2^1$).

Существование указанных корреляционных связей подтверждается сопоставлением тренд-поверхностей этих двух групп с картами мощностей отложений орогенного этапа (рис. 3). Взаимное соответствие карт составляет 90—96%. Как видно из сопоставления, региональные составляющие III—V порядков отражают элементы структуры позднеорогенного этапа, а региональная составляющая и модель Δ II порядка — элементы структуры раннеорогенного этапа. Прогреты совпадают с отрицательными, а области размыва — с положительными аномалиями рельефа, что позволяет рассматривать эти тренд-поверхности как модели, несущие палеоструктурную информацию. При этом модели рельефа фиксируют изменение структурного плана, имевшее место на границе раннеорогенного ($P_3 - N_1^2 - N_2^1$) и позднеорогенного ($N_2^1 - N_2^2 - N_2^3 - Q_1$) этапов. Это в первую очередь касается территории Предкавказья, где начало позднеорогенного этапа знаменуется возникновени-

ем Ставропольского поднятия — элемента, поперечного общему структурному плану Кавказа, существование которого в олигоцене едва намечается.

Третья группа карт — модели Δ III—V порядков — обнаруживает более широкий диапазон положительных и отрицательных корреляционных связей с мощностями отложений практически всего альпийского

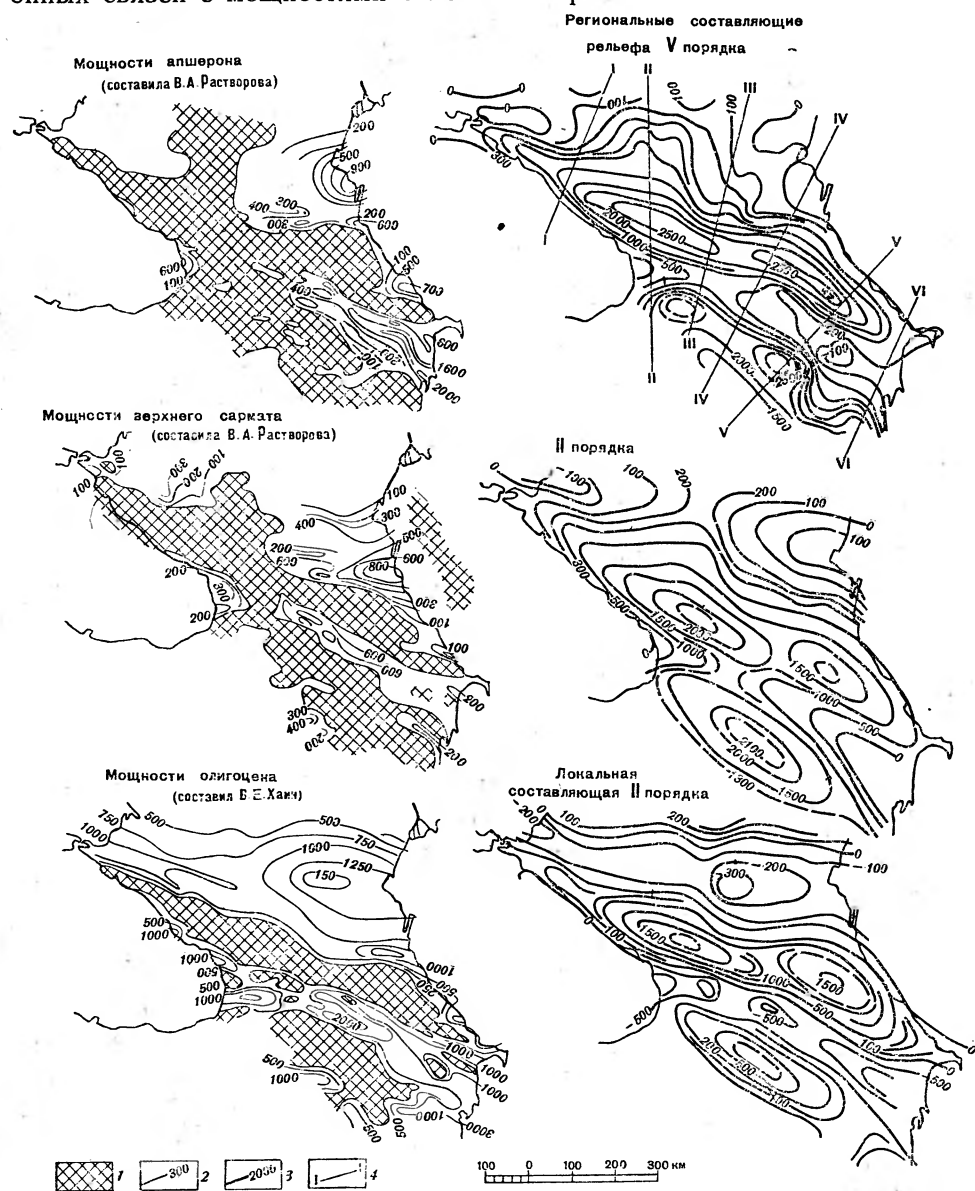


Рис. 3. Схема пространственной корреляции региональных составляющих рельефа II и V порядков и локальной составляющей II порядка с мощностями отложений орогенного этапа развития Кавказа. 1 — области размыва; 2 — изолинии мощностей; 3 — изолинии поверхности тренда; 4 — линии профилей

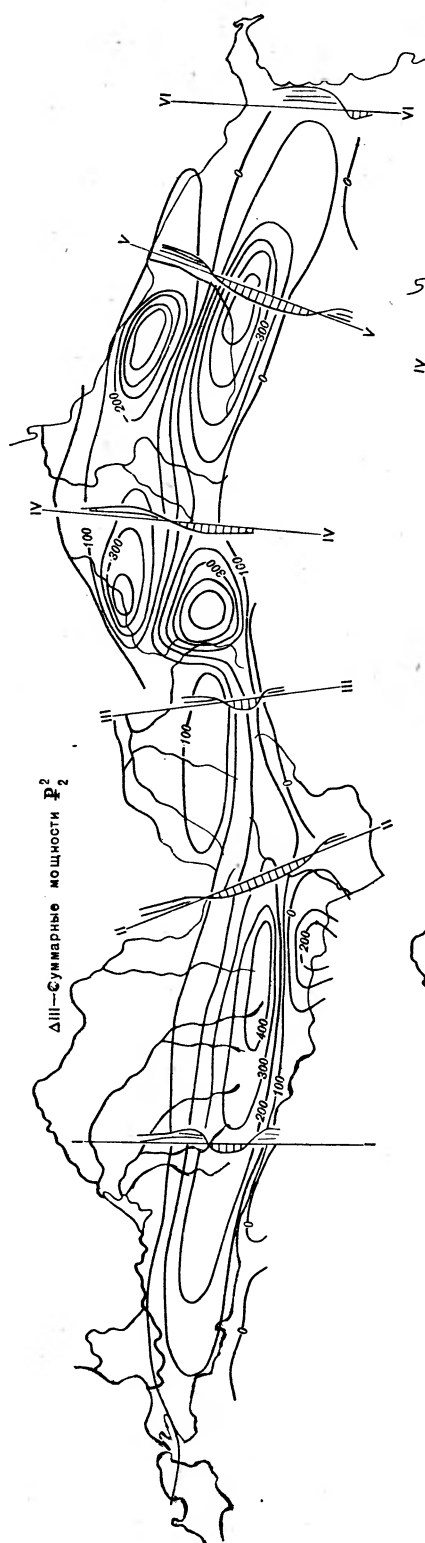
этапа. Сказанное можно проиллюстрировать следующим примером. На модели Δ III порядка (рис. 4) читается положительная аномалия, прослеживающаяся на оси Большого Кавказа. С севера она ограничена отрицательной аномалией, а южное ограничение читается по рисунку и сгущению изолиний. Ее восточная, высокоамплитудная часть как бы сдвинута относительно западной. Сопоставление с картами мощностей по разрезам показывает, что границам этой аномалии соответствуют границы структурных зон, читающихся в тектоническом плане региона,

начиная с лейаса. При этом совпадение с элементами структуры нижней юры выражается в совпадении простираций аномалии рельефа и юрских трогов, а также в совпадении границ их фациальных зон с границами отдельных элементов рельефа. Наиболее четко аномалии рельефа соотносятся с элементами структуры нижнего мела и палеоэоцена-эоцена. Со структурами верхнего мела соотношения несколько смазаны. Но если для нижнего мела, при общем совпадении границ, восточной части аномалии соответствует поднятие, а западной — трог, то для палеоэоцена-эоцена этой аномалии соответствует сквозное поднятие, которое и оказывается выраженным в современном рельефе в виде указанной положительной аномалии. С мощностями отложений более позднего времени корреляция прямая, причем отрицательным аномалиям рельефа соответствуют аномальные изменения мощностей в пределах прогибов, а положительным — аномально поднятые участки суши в пределах областей размывов. Приведенный пример свидетельствует о том, что модель Δ III порядка в данном случае отражает существование долгоживущих тектонических зон раннего, вероятно, доальпийского заложения, проявленных в современном рельефе.

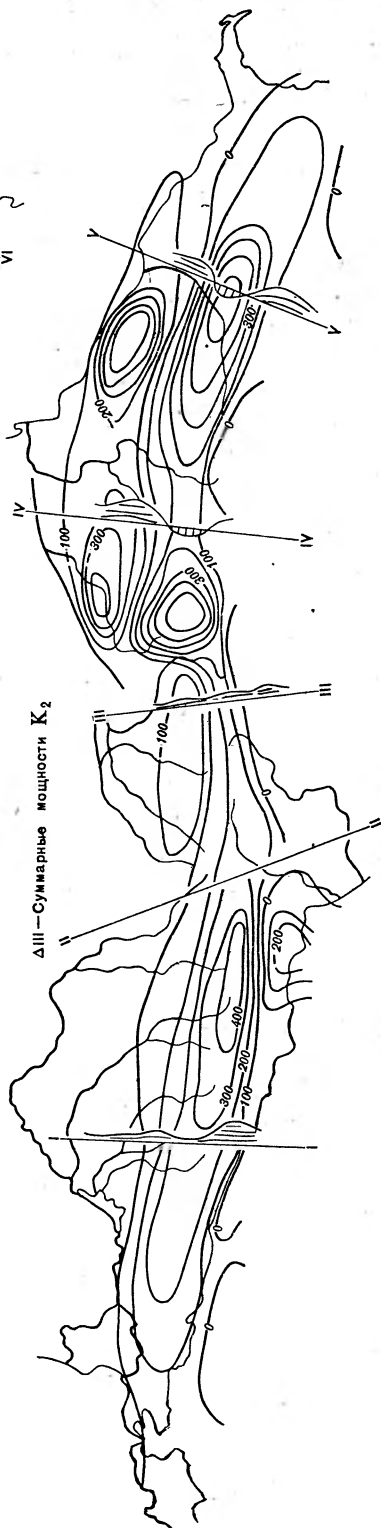
Особенность этих зон — стабильность их положения, мало меняющегося во времени, хотя интенсивность и знак движения внутри ограниченных ими блоков могли меняться. В равной степени это относится ко всем моделям Δ .

Проведенные сопоставления показали также, что существует определенная зависимость между порядком модели Δ и возрастом структурных элементов, с которыми она лучше всего коррелирует. Эта зависимость менее четкая, чем в случае с региональными составляющими рельефа, но все же, хотя и с большой долей условности, можно считать, что с повышением порядка локальной составляющей модели Δ на ней отражаются элементы все более древнего структурного плана. Так, модели Δ V и IV порядков обнаруживают наиболее четкую корреляцию с элементами структурного плана юры, модель Δ III порядка — с элементами структурного плана нижнего мела, а Δ II порядка, о чем уже говорилось выше, имеет прямую корреляцию с элементами структурного плана олигоцена. При этом корреляционные связи моделей рельефа с элементами палеоструктуры проявляются неравномерно как «по вертикали» (отдельные их «пики» приходится на основные тектонические этапы альпийской истории развития Кавказа), так и в пределах отдельных орографических провинций региона. Среди них особое место занимает Большой Кавказ, для которого корреляционные связи моделей рельефа с палеоструктурными элементами проявляются особенно четко. С этим согласуется плановая корреляция моделей Δ с элементами доорогенного структурного плана. Для Большого Кавказа их взаимное соответствие достигает в среднем 60%, для Предкавказья и Рионо-Куринской депрессии — 50 и 45%, а для Малого Кавказа достаточное соответствие (до 45%) наблюдается только в пределах восточной части, вероятно, отличающейся повышенной тектонической активностью и унаследованностью развития. Обращает на себя внимание, что в пределах таких тектонических активных зон локальные аномалии рельефа, отраженные на моделях Δ , имеют высокую амплитуду и резкую контрастность.

Таким образом, проведенная корреляция региональных и локальных (моделей Δ) составляющих рельефа Кавказа с палеоструктурными материалами показала, что эти модели, представленные в виде ряда аналитических карт, несут реальную палеоструктурную информацию. Обнаружена определенная зависимость между порядком тренд-поверхности и возрастом палеоструктурных элементов, которые она отражает. Так, региональные составляющие отражают элементы структуры орогенного, новейшего этапа, причем чем выше порядок тренда, тем более молодые структурные элементы он отражает. И наоборот, чем ниже порядок тренд-поверхности, тем более ранние орогенные структуры она отражает. Локальные составляющие рельефа (модели Δ) обна-



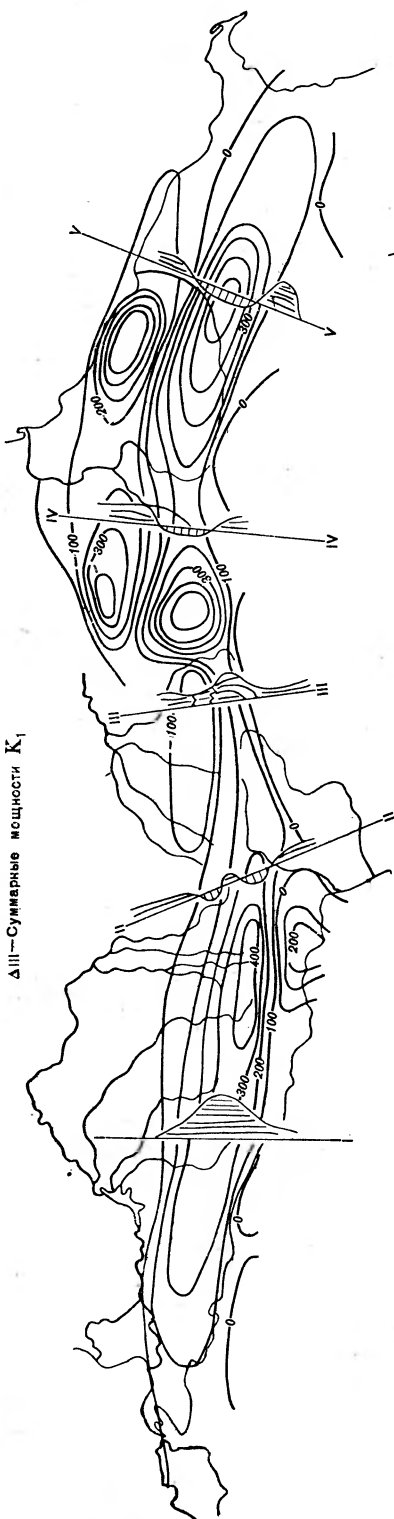
ΔIII — Суммарные мощности P_2^2



ΔIII — Суммарные мощности K_2

Рис. 4 (I)

Δ III — Суммарные мощности K_1



Δ III — Суммарные мощности I_1

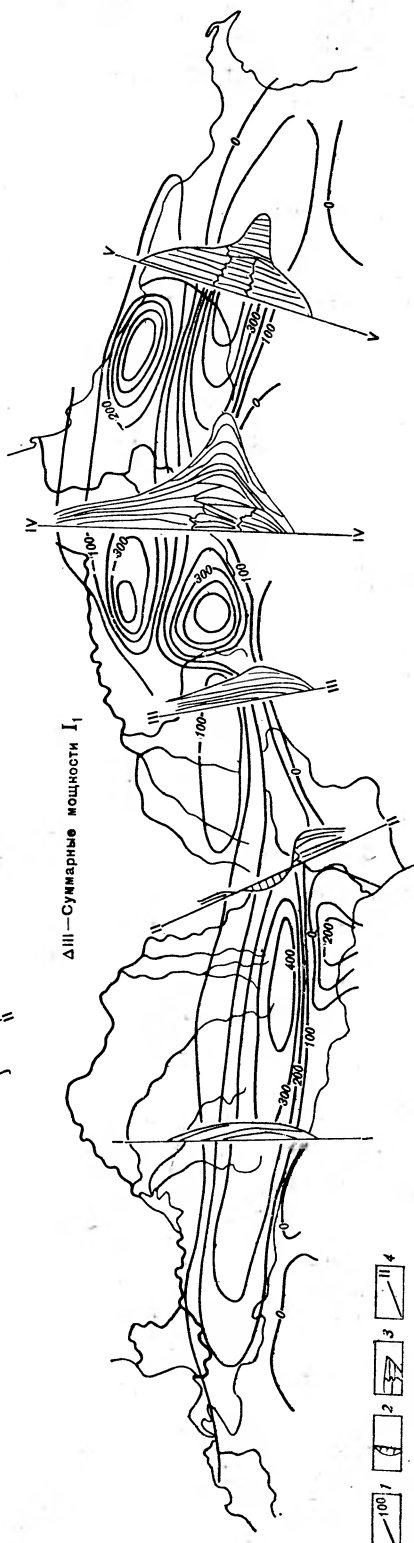


Рис. 4. Схема корреляции локальной составляющей рельефа III порядка (Δ III) с суммарными мощностями отложений нижней юры, нижнего и верхнего мела и палеогена-эоцена. Фрагмент. 1 — изолинии поверхности тренда; 2 — области размыва; 3 — области осадконакопления с указанием границ фациальных зон; 4 — линия профиля

руживают обратную зависимость, например, локальная модель ΔII порядка отражает элементы начала раннеорогенного этапа (P_3), а модели $\Delta III-V$ порядков — элементы доорогенного этапа. В то же время современный рельеф коррелируется только с элементами новейшего (современного) структурного плана. Объяснение этому, вероятно, следует искать в интегрирующем характере новейших движений, объединяющих мелкие разнопорядковые блоки ранних структур в крупные орогенные мегаскладчатые зоны.

Наиболее четкой оказалась положительная корреляция между региональными составляющими рельефа и моделью ΔII , с одной стороны, и мощностями отложений орогенного этапа, с другой. Эти модели по своей информативности приближаются к палеоструктурным схемам, и последовательный их анализ дает представление о развитии новейшей структуры региона во времени.

Корреляционная зависимость между локальными составляющими $III-V$ порядков ($\Delta III-\Delta V$) и элементами палеоструктуры обнаруживается, начиная со структурных элементов юры. Однако связь в плане неоднородна и с различной силой проявляется в пределах отдельных участков территории, причем, судя по знаку и величине коэффициента корреляции, унаследованность в пределах этих зон выражается в стабильности их положения, хотя знак и интенсивность тектонических движений в их пределах могли меняться. В силу этих особенностей модели Δ могут рассматриваться как схемы новейших структурных элементов, отражающих палеоструктурные особенности предшествующих этапов развития, а сама эта группа моделей рельефа может быть использована для выделения долгоживущих тектонически активных зон, проявленных в современном рельефе. Эти зоны маркируются на моделях высокоамплитудными аномалиями и частой сменой аномалий разного знака.

Предлагаемая геолого-геоморфологическая интерпретация тренд-поверхностей, безусловно, еще не может считаться полностью доказанной; для этого необходимы дополнительные исследования того же плана в районах, отличных по своему строению от Кавказа, и в первую очередь в эпиплатформенных областях типа Тянь-Шаня. Однако есть основание предполагать, что выявленная для территории Кавказа информативность моделей рельефа не случайна и сохранит свою значимость для иных в структурно-геоморфологическом отношении областей.

Как нам представляется, изменение масштаба исследований не должно влиять на информативность моделей рельефа. При исследованиях, проведенных в более мелком масштабе и для больших территорий, будут получены закономерности более высоких иерархических уровней, в той же мере расшифровывающих «память» рельефа об истории его развития.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крамбейн У., Грейбилл Ф. Статистические модели в геологии. М.: Мир, 1969. 396 с.
2. Берлянт А. М. Разложение поверхностей на составляющие как метод структурно-геоморфологического анализа. — Геоморфология, 1971, № 3, с. 78.
3. Эберлинг Н. И., Калаченко А. А. Алгоритм и программы построения поверхности тренда с помощью ортогональных полиномов П. Л. Чебышева. — В. кн.: Математические методы в геологии. Алма-Ата, 1966, с. 26.
4. Гостева Т. С., Патракова В. С. К вопросу о методике тренд-анализа рельефа при морфоструктурных исследованиях. М.: Моск. фил. ГО СССР, 1981.
5. Анализ тектонического развития и сейсмичности Кавказа. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 340 с.
6. Шолло В. Н. Альпийская геодинамика Большого Кавказа. М.: Недра, 1978. 216 с.

TREND ANALYSIS AS APPLIED TO MORPHOSTRUCTURAL STUDIES (WITH REFERENCE TO CAUCASUS)

GOSTEVA T. S., PATRAKOVA V. S.

Summary

Present-day topography of the Caucasus has been studied using trend analysis. When compared with geological and geophysical data, and with data on paleostructures in particular (such as thickness and facies of Alpine stage sediments), the models of topography (both of regional and local components) proved to be adequate. As the comparison reveals, the trend analysis models of topography bear the information on both the relief's morphology and on all heterogenous elements of structure which contribute to the regional morphostructure.

УДК 551.4 : 551.24(265/266)

МИХАЙЛОВ О. В., СОЛОВЬЕВ В. Н., ВОЛЬСКАЯ В. А.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ДНА ТИХОГО ОКЕАНА И РАЗЛИЧИЯ В ИХ ИНТЕНСИВНОСТИ

С точки зрения распространенных современных представлений динамика земной литосферы обычно характеризуется горизонтальными перемещениями крупных сегментов — литосферных плит. Несмотря на все большее число постоянно усложняющихся моделей плитовой тектоники, непрерывно растущее количество выделяемых плит и предполагаемую теперь цикличность спрединга, термин «литосферная плита» как первичное понятие тектоники плит не имеет до сих пор отчетливой интерпретации ни в тектоническом, ни в геохимическом смыслах [1]. Вместе с тем сравнительная внутренняя неоднородность различных блоков земной коры проявляется в первую очередь через вертикальные движения различной интенсивности, приводящие вследствие орогенеза и подъема магматических масс к структурным деформациям литосферных слоев и, в частности, к созданию сложного и своеобразного рельефа поверхности каждого блока. Правомерность и необходимость учета интенсивности вертикальных движений при тектонической характеристике материковых областей высказана в работе Е. В. Артюшкова, А. Е. Шлезингера, А. Л. Яншина [2], где отмечено, что «... вертикальные движения литосферных плит не зависят от горизонтальных, а большая длительность, однонаправленность и унаследованный характер первых не противоречат глобальным горизонтальным перемещениям литосферных плит».

Так как нет оснований считать океаническую кору однородной по составу, возрасту пород и характеру развития, то различные литосферные блоки океанического дна наряду с другими геолого-геофизическими признаками должны характеризоваться различной длительностью вертикальных движений, зафиксированных в неоднородностях современного рельефа дна, и как следствие этого различными значениями вертикальной составляющей тектонических сил.

Рельеф дна океанов вследствие сравнительно слабой аккумуляции и эрозии в значительно большей степени, чем рельеф суши, отражает доминирующее влияние внутренних процессов преобразования коры. Об этом свидетельствуют как малые мощности рыхлых осадков, практически не захороняющих первичный тектонический и вулканогенный рельеф абиссальных пространств, так и параллельное залегание этих осадков на субгоризонтальных слоях консолидированного фундамента в пределах равнин океанического ложа [3—5]. В связи с этим морфоструктурные особенности служат обычно основой при тектоническом районировании дна океанов.