

**ON A MORPHOSTRUCTURAL ANALYSIS USED
FOR GEOMORPHOLOGICAL SURVEYING OF A MOUNTAIN RELIEF**

N. V. BASHENINA and A. A. TRESHCHOV

Summary

The article deals with one of the methods of a morphostructural analysis used for geomorphological surveying of mountain regions. The authors proceed from the following widespread concepts: 1) block tectonics is the principal geomorphic agent in mountain areas; 2) the river system forms in breaks and cleavage disturbances, which serve as «lines of least resistance» for a selective erosion. The technique is based on the analysis of topographic maps followed by a compilation of the relief's principal morphological and morphometric indices. Analysing topographic and thematic maps the authors detected breaks and cleavage disturbances of different orders and then compiled a map of block structural forms. The technique is simple and may be used for mountain regions with great differences of altitudes. For other regions, both mountain and plain (all the more for the plain ones), more effective will, probably, be the methods suggested by V. F. Filosofov, which have afterwards been revised by A. A. Lukashov and Yu. G. Simonov, by L. B. Aristarkhova, N. G. Shubina and others, in accordance with the specificity of areas where they undertook investigations.

УДК 551.4

А. М. БЕРЛЯНТ, В. Н. ПЕРМИНОВА

**РАЗЛОЖЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА СОСТАВЛЯЮЩИЕ
КАК МЕТОД СТРУКТУРНО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОГО
АНАЛИЗА**

Разложение поверхностей на составляющие имеет целью выделение основного фонового и второстепенного остаточного факторов в пространственном размещении явления. Рассматривается постановка задачи, техника разложения и интерпретация результатов, приводится классификация существующих приемов разложения поверхностей.

Постановка задачи

Типичной задачей структурной геоморфологии является разделение изучаемого явления на две или более компоненты, из которых одна отражает главные особенности объекта исследования, его основную структуру, а другая — второстепенные детали, наложенные черты, которые проявляются на фоне основной структуры. Такая задача возникает при анализе тектонических, неотектонических, структурно-геоморфологических, морфометрических и других карт. Примерами могут служить изучение локальных неотектонических движений на фоне общеколебательных; анализ регионального поведения поверхностей выравнивания и их локальных деформаций; выделение аномалий мегатрещиноватости на фоне общепланетарной системы тектонических трещин и т. д. Обычно стремятся разделить изучаемые компоненты и проанализировать их по возможности в чистом виде.

Данная геоморфологическая задача имеет картографическое решение. Если существует картографическое изображение изучаемого явления, то задача решается путем разложения этого явления на две составляющие, в результате чего получаются две новые карты.

Первая карта передает пространственное размещение основного ведущего фактора, главные, наиболее существенные черты этого размещения. Вторая карта показывает размещение наложенных черт, деталей, второстепенных или случайных факторов. Нами предложено (Берлянт, 1969, а) называть их соответственно картами фоновой и остаточной поверхностей (ФП и ОП). Карты ФП и ОП являются пространственными моделями изучаемых главных и второстепенных факторов.

Техника разложения и интерпретация фоновых и остаточных поверхностей

Опираясь на картографическую модель задачи, можно сформулировать ее математическое решение. Пусть на карте изображено явление z (например, поверхность выравнивания) таким образом, что каждой i -той точке карты с координатами u_i и v_i поставлено в соответствие лишь одно значение z_i (высота поверхности). В этом случае поверхность может быть определена как геометрическое место точек, удовлетворяющих уравнению

$$z = F(u, v). \quad (1)$$

Исходя из существа задачи, представим z как сумму двух факторов — фоновой и остаточной:

$$z = z_{\Phi} + z_0, \quad (2)$$

поставив при этом условие, чтобы фоновая составляющая описывалась какой-либо аппроксимирующей неслучайной функцией от плановых координат:

$$z_{\Phi} = f(u, v).$$

Тогда уравнение исходной поверхности можно переписать в виде:

$$z = f(u, v) + \varphi(u, v), \quad (3)$$

где $\varphi(u, v)$ — остаток, соответствующий остаточной поверхности. Фоновая составляющая может быть разложена в ряд, и тогда уравнение (3) предстанет в общем виде:

$$z = f_1(u, v) + f_2(u, v) + \dots + f_n(u, v) + \varphi(u, v). \quad (4)$$

Здесь $f_k(u, v)$ — компоненты, составляющие фоновую поверхность, которые неизвестны и должны быть определены. Отыскание их численных величин производится под условием минимизации по способу наименьших квадратов.

Первоначально задача разделения картируемой переменной была поставлена и решена в геофизике при анализе гравиметрических, магнитных и барических полей. С помощью аппроксимирующих функций наблюденное геофизическое поле раскладывается на так называемые «региональную» и «локальную» составляющие. В практике геофизической разведки издавна используются более простые графоаналитические приемы, при которых в качестве оператора разделения используются осредняющие палетки различных конструкций. Постепенно геофизические приемы проникли в геологические исследования, где получили название «тренд-анализа», т. е. анализа поверхности тенденции (Вистелиус, 1968; Романова, 1964; Математические методы... 1967; Лохматов, Алаев, 1967; Крамбейн, Грейбилл, 1969, и др.). Позднее построение фоновых и остаточных поверхностей вошло в географические и геоморфологические исследования (Берлянт, 1965, 1969, а, б; Бойчук и Марченко, 1968; Chorley, Haggett, 1965; Tobler, 1969, и др.).

При анализе структурно-геоморфологических поверхностей имеет смысл представлять уравнение (4) в виде алгебраического полинома

n -ой степени:

$$z = A_{00} + A_{10}u + A_{01}v + A_{11}uv + \dots + A_{mn}u_m v_n + \varphi(u, v), \quad (5)$$

где A_{rs} — коэффициенты членов разложения при координатах u в степени r и v в степени s . Показатели степени r и s могут принимать значения $1, 2, 3, \dots, m$ и $1, 2, 3, \dots, n$. Очевидно, что аппроксимируя какую-либо сложную поверхность многочленом первой степени, можно получить плоскость, т. е. довольно грубое, слишком общее приближение. Поверхность, описываемая многочленом второй степени, будет уже лучшим приближением, сумма квадратов отклонений ее от исходной уменьшится. Еще точнее исходная поверхность представится уравнением третьей степени и т. д. Таким образом, увеличивая степень многочлена, можно добиваться все более точной аппроксимации. При этом, однако, возрастает объем вычислений.

Более целесообразно представлять аппроксимирующую поверхность не в виде суммы степеней координат, а в виде систем линейно независимых ортогональных полиномов П. Л. Чебышева, что создает определенные удобства при вычислениях (Хейфец, 1964). В этом случае при увеличении степени аппроксимирующего выражения не следует каждый раз заново составлять и решать по методу наименьших квадратов новую систему уравнений, а достаточно лишь вычислить коэффициенты при старших членах разложения. Если исходные значения z_i снимаются с анализируемой карты по сетке равноотстоящих точек, то вычисления еще более упрощаются, поскольку значения полиномов П. Л. Чебышева сразу выбираются из таблиц.

Уравнение (4) записывается теперь в новой форме:

$$\begin{aligned} z &= A_{00}\tau_{00} + A_{01}\tau_{01} + A_{10}\tau_{10} + \dots + A_{mn}\tau_{mn} + \varphi(u, v) = \\ &= \sum_{r=0}^m \sum_{s=0}^n A_{rs}\tau_{rs} + \varphi(u, v) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\tau_{rs} = \varphi_r(u)\varphi_s(v).$$

Здесь $\varphi_r(u)$ и $\varphi_s(v)$ — ортогональные многочлены П. Л. Чебышева степени r и s , а A_{rs} — неизвестные коэффициенты разложения, которые находятся по формуле

$$A_{rs} = \frac{\sum z_i \tau_{rs}}{\sum \tau_{rs}^2}. \quad (7)$$

Рассмотрим методику разложения на составляющие на примере Бескудского р-на Северного Прикаспия. Формирование структурного плана территории происходило в позднепермско-мезозойско-палеогеновое время. Существенную роль при этом сыграло общее прогибание Прикаспийской впадины в течение всего новейшего этапа, блоковые подвижки фундамента и соляная тектоника. Начиная с акчагыльского времени территория неоднократно затапливалась водами Каспийского моря. Последний трансгрессией была раннехвалынская, оставившая плоскую, почти нерасчлененную морскую равнину, осложненную небольшими неровностями (0,5—1,0 м) тектонического происхождения. Малые углы наклона, засушливый климат, бедность поверхностными водами обусловили слабое развитие экзогенных процессов на данной территории.

В качестве исходной была взята карта деформации позднечетвертичных геоморфологических уровней (рисунок, а), составленная на базе тщательного анализа гипсометрии по крупномасштабной топографиче-

ской основе и детального дешифрирования аэрофотоматериалов, что позволило выявить точные границы геоморфологических уровней и исключить экзогенные формы рельефа. Методика построения исходной карты подробно изложена ранее (Перминова, 1968). С карты по квадратной сетке были сняты значения z_i в 40 точках и рассчитан аппроксимирующий многочлен, имеющий следующее числовое выражение:

$$z_{\phi} = 17,03 + 0,745 \tau_{10} + 0,45 \tau_{01} + 0,17 \tau_{20} + 0,11 \tau_{02} - 0,02 \tau_{11} - 0,04 \tau_{30} - \\ - 0,02 \tau_{21} + 0,075 \tau_{12} - 0,01 \tau_{03}.$$

Затем были построены фоновые и остаточные поверхности I, II и III порядков.

Фоновая поверхность I порядка представляет собой плоскость, слабо наклоненную на юго-восток, что хорошо согласуется с представлением об общем региональном уклоне нижнехвалынской морской равнины в пределах рассматриваемого участка. На фоне этого уклона на карте ОП-1 выделяется линейно ориентированное понижение северо-западного простираения, совпадающее с зоной Чижинского прогиба, предположительно связываемого с унаследованным разломом подсолевого ложа. Локальные поднятия достигают на этой карте 1,5—2 м относительно фоновой поверхности.

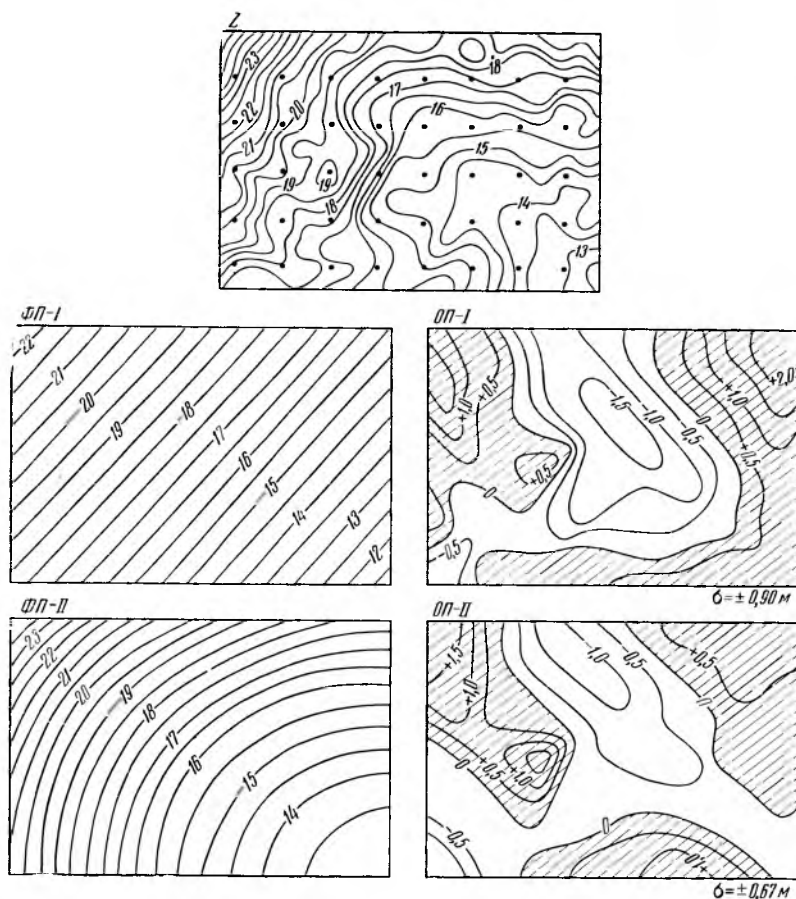
Фоновая поверхность II порядка отражает совокупное влияние регионального уклона и прогиба северо-западного простираения. Поверхность выполаживается в юго-восточном направлении. Остаточная поверхность II порядка показывает расположение локальных поднятий и опусканий с относительными превышениями 1—1,5 м.

В строении фоновой поверхности III порядка учтено влияние регионального уклона, прогиба северо-западного простираения и относительно поднятия территории к западу от прогиба. На карте ОП-III видны отдельные локальные поднятия и опускания с относительными амплитудами 0,5—1,0 м. Локальные структуры, изображенные на картах ОП-II и ОП-III, хорошо согласуются с позднечетвертичными поднятиями, выделенными при комплексных структурно-геоморфологических исследованиях и подтвержденными геолого-геофизическими данными (Перминова, 1968).

Почти все поднятия совпадают с соляными куполами (рисунок, с). Хорошо прослеживается дизъюнктивное нарушение, отделяющее Западно-Бескудское локальное поднятие от Карамышского опускания.

Важно остановиться еще на одной стороне интерпретации. Даже в том, что фоновая поверхность сама по себе есть поверхность абстрактная, отражающая действие генеральных закономерностей и тенденций. Известно, что в конкретных явлениях общие тенденции не проявляются в чистом виде, а находят выражение лишь в совокупностях особенных черт данного явления. Точно так же и особенные черты изучаемого явления, изображенные на карте остаточной поверхности, не существуют иначе, как в единстве с ведущим фактором и относительно него. Иначе говоря, фоновые и остаточные поверхности не могут рассматриваться сами по себе, изолированно друг от друга, а только совместно и одна относительно другой. Из этого следует важный в практическом отношении вывод об относительности фоновых и остаточных поверхностей. Относительность понятий сразу ставит вопрос об истинности фоновых поверхностей, об их достоверности, о масштабах пространства, в котором реально существуют фоновые и остаточные поверхности разного порядка, т. е. об их репрезентативности.

Можно предложить различные вероятностные или теоретико-информационные оценки достоверности, например среднюю квадратическую ошибку аппроксимации (σ). Значения σ приведены на рисунке, они по-



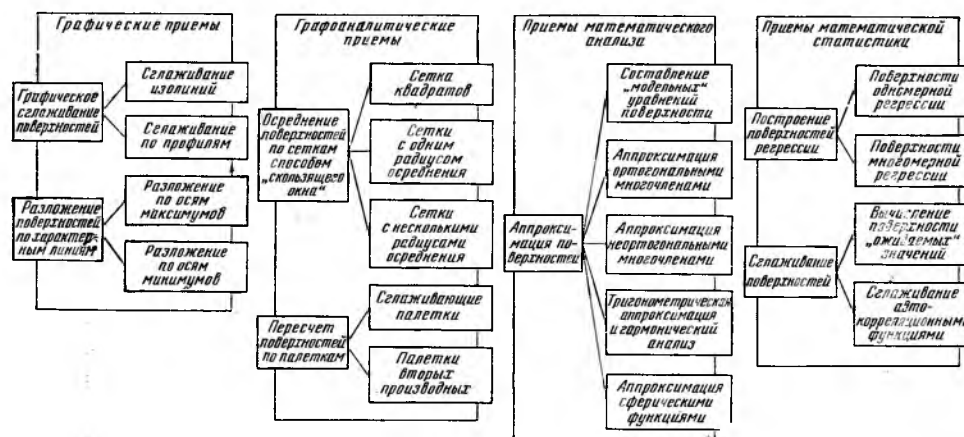
Анализ деформаций позднечетвертичных геоморфологических уровней Бескудского остаточную

z — деформации позднечетвертичных геоморфологических уровней (в метрах). Обозначена сетка картах ОП заштрихованы положительные отклонения; ФП- z и ОП- Δz — фоновая и остаточная поэлементы (по В. Н. Перминовой, 1968). a — локальные солянокупольные поднятия; b — локальное менном рельефе; d — соляные купола, подтвержденные картировочным бурением или сейсмическим. Бескудское; 4 — Карповское; 5 — Курманское; 6 — Евлашкинское. Локальное опускание; 7 — Карамыш-

казывают, что ошибка аппроксимации для ФП-III составляет всего 0,44 м, т. е. меньше величины сечения изолиний исходной поверхности выравнивания, что свидетельствует о достаточно высокой точности приближения. Существуют и другие способы оценки достоверности аппроксимации: вычисление доверительных интервалов поверхности, энтропии и т. д. Однако, будучи формально-математическими, эти критерии по-прежнему остаются относительными. Выход из данной ситуации состоит в том, чтобы, исходя из содержательных представлений, обозначить классы геоморфологических явлений, для которых та или иная модель фоновой поверхности является истинной. Создание такой классификации — дело будущего. Укажем лишь некоторые примеры.

Так, фоновая поверхность I порядка является моделью моноклиналей, региональных тектонических наклонов, поверхностей выравнивания, распределения мощностей отложений на плоской поверхности при одном источнике поступления материала.

Фоновая поверхность II порядка может служить моделью валообразного или куполообразного тектонического поднятия, ложбинообразно-



Классификация приемов построения фоновых и остаточных поверхностей

Рассмотренные приемы построения карт фоновых и остаточных поверхностей не являются единственно возможными. Как показывает предлагаемая таблица эти приемы разнообразны и число их велико. С точки зрения техники разложения поверхностей можно выделить четыре группы приемов: графические, графоаналитические, приемы математического анализа и математической статистики.

Графические построения состоят в так называемом сглаживании изолиний исходной карты, или в разложении поверхности по характерным линиям. Хорошо известны ставшие популярными в последние годы приемы разложения рельефа на базисные и вершинные поверхности разного порядка и остаточный рельеф. По сути своей базисные поверхности также являются фоновыми поверхностями, отражающими уклоны продольных профилей рек того или иного порядка. В данном случае разложение производится по характерным линиям, по тальвегам разного порядка либо по водоразделам разного порядка для вершинных поверхностей.

Графоаналитические приемы связаны с использованием разнообразных сеток, осредняющих исходную поверхность по способу «скользящего окна». Известны сетки разной конструкции: квадратные, круговые с одним или с несколькими радиусами осреднения. Вычитание осредненной поверхности из исходной позволяет получить остаточную поверхность. Эти способы довольно просты и дают достаточно хорошие результаты, в чем можно убедиться, сравнивая карты, полученные в результате аппроксимации и с помощью осреднения (рисунок).

Наиболее сложным вопросом является выбор параметров осреднения, от которых в значительной мере зависит форма остаточной поверхности. Пока не существует достаточно надежных критериев для задания этих параметров. Обычно руководствуются соображениями о том, что принимаемый радиус осреднения должен быть примерно равен среднему радиусу ожидаемых аномалий остаточной поверхности. К графоаналитическим приемам относится также применение специальных палеток, например, палеток «вторых производных», заимствованных чаще всего из геофизики. Такое заимствование следует признать недостаточно оправданным, поскольку в геофизике эти приемы учитывают особые свойства потенциальных функций и применимы поэтому лишь к анализу полей силы тяжести.

Наиболее корректные и детальные результаты получаются при использовании приемов математического анализа, в частности рассмотрен-

ного выше аппроксимирования с помощью ортогональных или неортогональных многочленов. Для явлений, в которых предполагается выявить какую-либо периодическую фоновую составляющую, целесообразно использовать аппарат тригонометрической аппроксимации и гармонического анализа. Примером могут служить исследования И. А. Одесского (1969), удачно использовавшего гармонический анализ гипсометрических профилей для выявления систем волнообразных тектонических деформаций в рельефе Западно-Сибирской низменности. Развертывание рядов Фурье на плоскость связано с трудоемкими вычислениями и невозможно без применения ЭВМ. Так, например, по данным Тоблера (Tobler, 1969), для тригонометрической аппроксимации одного участка горного рельефа потребовалось отыскать свыше трехсот коэффициентов. Для изучения обширных территорий в масштабе планеты применяется аппроксимация сферическими функциями. Такая аппроксимация была блестяще применена К. Гудасом (1968) для изучения топографии Луны, ее физического состояния и движения масс под ее корой.

Наконец, разложение на составляющие можно осуществить с помощью приемов математической статистики, что связано прежде всего с построением поверхностей одномерной или многомерной регрессии. Использование метода наименьших квадратов сближает эти приемы с аппроксимацией. Вычисление регрессий позволяет рассчитать фоновые поверхности не только как функции плановых координат, но и как функции ряда других факторов, формирующих основные черты данной поверхности (например, факторов гравитационных, литологических, климатических и др.). Подробное изложение методики вычисления многомерных регрессий содержится в работе М. С. Арабаджи и др. (1967), посвященной анализу взаимосвязей между геологическими и геофизическими параметрами в районах Прикаспия, Устюрта и Предкавказья. Фоновая поверхность, построенная на основе уравнений регрессии, показывает, какой вид имела бы поверхность, если бы она зависела только от факторов, учтенных в уравнении. Остаточная поверхность отражает отклонения от этой зависимости.

При анализе структур морского дна для получения фоновых характеристик с батиметрических профилей широко применяются автокорреляционные и спектральные функции, позволяющие посредством сглаживания профилей отделить остаточные компоненты от фоновых (Белоусов и др., 1965). Однако эти приемы не нашли пока применения при анализе поверхностей.

Приемы математического анализа, математической статистики и даже графоаналитические допускают использование электронно-вычислительной техники и специализированных счетнорешающих устройств.

Оценивая в целом существующие методы разложения поверхностей на фоновую и остаточную составляющие, необходимо признать достаточно высокую эффективность сравнительно простых приемов анализа, таких, как осреднение с помощью палеток. В тех случаях, когда изученность района исследований позволяет сделать предположения о модели фоновой поверхности, целесообразно использовать аппроксимирование ортогональными многочленами или тригонометрическими функциями. Если же требуется отыскать фоновую поверхность в зависимости от ряда различных факторов, то следует применить аппарат многомерного регрессионного анализа.

В заключение заметим, что дальнейший анализ самих фоновых и остаточных поверхностей может дать много дополнительных сведений. Имея уравнения поверхностей, можно путем интегрирования подсчитать объем ограничиваемых ими тел, что необходимо при балансовых расчетах. Можно суммировать поверхности или вычитать их одну из другой путем алгебраического сложения коэффициентов аппроксимирующих уравнений, например при анализе суммарных мощностей. Ин-

тересные результаты дает морфометрический анализ фоновых и остаточных поверхностей, изучение их уклонов, расчленения и т. д. Используя дисперсионный анализ, возможно, кроме того, количественно оценить влияние главных и второстепенных факторов на формирование изучаемого явления.

ЛИТЕРАТУРА

- Арабаджи М. С., Васильев Ю. М., Мильничук В. С., Чарыгин М. М. Простейшие математические приемы решения геологических задач. «Недра», 1967.
- Белоусов И. М., Козлов Н. М., Ямпольский А. А. О новой методике статистической обработки материалов промера морского дна.— Океанология, 1965, т. 5, № 1.
- Берлянт А. М. Опыт количественного изучения неотектоники путем морфометрической реконструкции первичного рельефа.— Изв. АН СССР. Сер. географ., 1965, № 1.
- Берлянт А. М. Карты фоновых и остаточных поверхностей и их применение в географических исследованиях.— Вестн. МГУ. География, 1969, № 4, а.
- Берлянт А. М. Принципы построения и интерпретации карт фоновых и остаточных поверхностей при геолого-геоморфологических исследованиях.— В кн.: Структурно-геоморфологические исследования при нефтегазопойсковых работах, Л., 1969, б.
- Бойчук В. В., Марченко А. С. Фон и вариация элементов физико-географической среды. М., «Наука», 1968.
- Вистелиус А. Б. Теоретические предпосылки стохастических моделей и их проверка в конкретных геологических условиях.— Матем. методы в геологии. Докл. сов. геологов. М., «Наука», 1968.
- Гудас К. Разложение рельефа Луны по сферическим функциям.— В сб.: Фигура Луны и проблемы лунной топографии. М., «Наука», 1968.
- Крамбейн У., Грейбилл Ф. Статистические модели в геологии. М., «Мир», 1969.
- Лохматов Г. И., Албаев Г. Т. Метод разделения структурных и изопахических карт на составляющие.— Геол. нефти и газа, 1967, № 4.
- Математические методы при построении карт в практике геологических работ.— Сер. Нефтегазовая геол. и геофиз. М., 1967.
- Одесский И. А. Роль волнообразных тектонических деформаций в процессе рельефообразования.— В сб.: Структурно-геоморфологические исследования при нефтегазопойсковых работах. Л., 1969.
- Перминова В. Н. Комплексный анализ морфометрических построений и дешифрирования аэрофотоматериалов при структурно-геоморфологических исследованиях на территории Северного Прикаспия.— В сб.: Геоморфологический анализ при геологических исследованиях в Прикаспийской впадине. Изд-во Моск. ун-та, 1968.
- Романова М. А. Современные отложения центральных Каракумов и проблема поисков погребенных структур.— Сов. геология, 1964, № 12.
- Хейфец Б. С. Аппроксимирование топографической поверхности ортогональными многочленами Чебышева.— Изв. ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка, 1964, вып. 2.
- Chorley R. J., Haggett P. Trend-Surface mapping in geographical research. Trans. Inst. Brit. Geogr., 1965, No. 37.
- Tobler W. R. Geographical filters and their inverses. Geogr. Analysis, 1969, 1, No. 3.

Географический факультет
МГУ
НИЛЗарубежгеология

Поступила в редакцию
12.III.1970

THE SEPARATION OF SURFACES INTO COMPONENTS AS A METHOD OF STRUCTURAL GEOMORPHOLOGICAL ANALYSIS

A. M. BERLYANT and V. N. PERMINOVA

Summary

The separation of surfaces into components is used while carrying out structural geomorphological, paleogeographical, morphometrical, and other investigations. The purpose of separation is the defining of the principal (background) factor in a spatial spreading of the phenomenon and a secondary (residual) factor and their study, if possible, in a pure state. The authors formulate tasks of the separation, suggest analytical and graphoanalytical technique, present a classification of the existing methods of separation of surfaces into components. As an example, considered is the separation into components of deformations of the upper Quaternary geomorphological levels for one of the areas of the North Caspian Region.