

МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.4 : 553.411 (571.5)

А. В. ТРУШИН, Г. С. АНАНЬЕВ**ИЗУЧЕНИЕ АНОМАЛИЙ РАСЧЛЕНЕННОСТИ РЕЛЬЕФА
ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ПОИСКОВ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО ОРУДЕНЕНИЯ**

Обосновывается положение о том, что в условиях неунаследованного развития рельефа золоторудные месторождения, генетически связанные с кварцевыми жилами, в ходе неотектонических подвижек не были нарушены и, в силу этого они отличаются аномально низкой плотностью эрозионной сети. Участки аномально низкой расчлененности рельефа выделялись относительно факторов, систематически влияющих на распределение густоты эрозионной сети. Систематическая составляющая, или тренд расчлененности, определялся в зависимости от наиболее существенных геолого-геоморфологических факторов. Первоначальный выбор параметров, относительно которых рассчитывался тренд расчлененности, был априорным. Априорные решения проверялись статистическими методами.

Принципиальная возможность применения при поисках рудопроявлений анализа расчлененности рельефа основана на следующем. Известно, что заложение большинства долин предопределено тектоническим фактором. Иначе говоря, эрозионные формы осваивают наиболее ослабленные и неустойчивые к денудации участки тектонических нарушений. Последнее, в то же время, являются одним из факторов локализации гидротермальных месторождений. Таким образом, план гидросети и локализации месторождений в значительной мере находится в зависимости от одного и того же фактора — трещинной тектоники.

Трещинная тектоника может быть выражена в современном рельефе по-разному. Причинами этого, по Ю. Г. Симонову (1968), могут являться: 1) слабая трещиноватость пород, вследствие чего поверхность оказывается устойчивой к процессам денудации; 2) слабая обводненность трещин, что приводит в определенных условиях к их слабой разработке водными потоками; 3) заполнение трещин гидротермальными образованиями, например, минерализация кварцем. В данном случае особое внимание было обращено на выраженность в рельефе «залеченных» кварцем тектонических трещин. В силу своей значительной прокварцованности осадочные породы становятся более устойчивыми к процессам денудации, образуя слабо расчлененный рельеф поверхностей склонов и междуречий (Ананьев, Ананьева, 1968). Поскольку с кварцевыми жилами часто связаны золоторудные проявления, этот анализ фактически позволяет по геоморфологическим аномалиям расчлененности рельефа прогнозировать перспективность поисков рудопроявлений золота. Участки аномально низкой расчлененности выделяются на исследуемой площади относительно «систематической составляющей» расчлененности рельефа.

«Систематическая составляющая» расчлененности рельефа обусловлена факторами, которые вызывают некоторое упорядоченное изменение густоты эрозионной сети на изучаемой территории. На поверхностях с выходами пород более трещиноватых густота эрозионной сети всегда больше. Породы менее дислоцированные, напротив, обладают меньшей расчлененностью. Примером может служить, в частности, локальное изменение густоты эрозионной сети в пределах рудных полей. Поэтому при анализе карт расчлененности рельефа с целью поисков рудопроявлений золота требуется отделить систематические изменения, отражающие определенные тенденции в изменении густоты эрозионной сети, от случайных флуктуаций, с которыми могут быть связаны рудные поля.

Задачу отделения систематического изменения расчлененности от случайных ее колебаний можно попытаться решить с помощью анализа карт тренда. Тренд означает *«любые систематические изменения, которые замечены на карте изучаемого признака»* (Крамбейн, Грейбилл, 1969, стр. 253). Сравнивая карты реальной расчлененности (по Крамбейну и Грейбиллу «карты результатов наблюдений»), можно выделить участки с отклонениями реальной расчлененности от теоретической. Они являются аномальными относительно систематического изменения расчлененности рельефа.

Возможны два случая, когда: 1) реальная расчлененность больше, чем теоретическая, учитывающая только систематическое изменение; 2) реальная расчлененность меньше систематической. Очевидно, что в первом случае потенциальная возможность систематического изменения уже исчерпана, превышена благодаря наличию каких-либо благоприятных для эрозии факторов. Поэтому относительно теоретической расчлененности такое отклонение можно считать отрицательным. Во втором случае, наоборот, еще существует некоторая потенциальная возможность для проявления на данном участке систематического расчленения, поэтому аномалия определяется, как положительная.

По-видимому, перспективными на оруденение будут участки положительных аномалий. Здесь заниженная реальная густота гидросети относительно теоретической может быть связана с большой прокварцованностью пород, сделавшей их более устойчивыми к процессам денудации. Это, в свою очередь, дает основание предполагать наличие рудопроявлений в пределах выделенной аномалии. Отрицательные аномалии, вероятно, будут указывать на слабую перспективность обнаружения рудопроявлений.

Карты тренда расчлененности строились нами на основании простой линейной модели. Это значит, что предполагалась линейная зависимость между двумя случайными величинами: $y = a + bx + e$, где y — случайная величина, являющаяся моделью результата наблюдения (величина расчлененности рельефа), x — случайная величина; аргумент рассматриваемой функции (фактор, относительно которого предполагается систематическое изменение расчлененности), а e — случайная компонента, которая свидетельствует о том, что зависимость y и x не строго линейная, а существуют помимо x некоторые неучтенные факторы, влияющие на значение y .

Первоначальный выбор параметров, относительно которых строились карты тренда, был априорным. Правильность рассчитанных моделей впоследствии проверялась статистическими методами.

Весь цифровой материал, необходимый для вычисления карт тренда и получения карт аномалий, оформлялся на карте наблюдений, которая строилась на топографической основе с сечением горизонталей через 20 м. На нее наносились контуры геологических объектов, относительно которых предполагалось наличие систематического изменения расчлененности.

Для того, чтобы «набранный» цифровой материал был репрезентативным, была определена необходимая наименьшая площадь, в пределах которой можно подсчитывать среднюю расчлененность и при этом быть уверенным, что выборочная средняя будет характеризовать генеральную среднюю с заданной степенью точности. Расчеты показали, что наименьшая площадь на карте, по которой можно оценивать среднюю густоту эрозионной сети, равна 4 см^2 . С вероятностью $P=0,95$ можно быть уверенным, что заданная степень неточности ($\Delta=0,4$) не будет превышена.

Затем был определен наименьший репрезентативный объем цифровых данных, на основании которого построенная карта наблюдений должна характеризовать расчлененность района с заданной степенью точности. Оказалось, что для построения репрезентативной карты нужно иметь не менее 69 значений величин средней расчлененности рельефа. Последняя определялась как частное от деления суммарной длины эрозионных форм на площадь. Результат записывался в центре квадрата. Для каждого из них определялось значение факторов, от которых зависит систематическое распределение плотности эрозионной сети. Для определения значений величин расчлененности рельефа был использован способ скользящих квадратов.

Используя данные карты наблюдений, были определены коэффициенты a и b для уравнения тренда: $My = a + bx$. Эта операция производится с помощью выравнивания эмпирических рядов. Так, для того, чтобы получить усредненное течение функции, соответствующее линейной модели: $y = a + bx + e$, была составлена система уравнений:

$$an + b \sum x = \sum y$$

$$a \sum x + b \sum x^2 = \sum yx,$$

где n — число пар в эмпирическом ряду. Для решения ее потребуется на основании эмпирического ряда регрессии высчитать четыре величины. Решив эту систему относительно a и b , получаем коэффициенты для оценочной линии тренда: $My = \hat{a} + \hat{b}x$, на основании которой будут строиться карты.

Поскольку в уравнении линейной модели: $y = a + bx + e$ и y и x суть случайные величины, то и a и b являются случайными параметрами. Поэтому для них строились доверительные интервалы. Кроме того, оценивалась величина дисперсии, которая является мерой уклонения отдельных наблюдений от теоретических значений, предсказываемых оценочной линией $My = a + bx$.

Достоверность построенных карт тренда, а соответственно и карт аномалий, проверялась двумя способами. Первый метод заключался в определении полноты описания картой тренда реального распределения густоты эрозионной сети. Для этого оценивалась в процентах доля общей изменчивости, учитываемой картой тренда относительно карты наблюдений (табл. 1).

Реальность линейного тренда проверялась также с помощью дисперсионного анализа. Для этого сравнивались дисперсии карт тренда и соответствующих карт аномалий. В качестве критерия использовалась статистика Фишера. Если значение F превышало практическое значение при выбранном уровне значимости и рассчитанных числах степеней свободы, то делался вывод о реальности линейного тренда (табл. 2).

Таблица 1

Процент изменчивости, учитываемый картой тренда относительно карты наблюдений

Тип изменчивости	SSY ²	Процент изменчивости
Карта наблюдений	22,95	100
Карта тренда	12,44	54,20
Карта аномалий	10,51	45,80

Дисперсионный анализ линейного тренда расчлененности

Тип изменчивости	SSY [*]	Число степеней свободы	Оценка дисперсии	F	Доверительный уровень, %
Карта наблюдений	22,95	69			
Карта тренда	12,44	2	6,22	39,62	+99,9
Карта аномалий	10,51	67	0,157		

На основании описанной выше методики был проведен анализ расчлененности рельефа двух золоторудных месторождений.

Геолого-геоморфологические позиции рассматриваемых рудных полей отличаются друг от друга. Первое месторождение расположено в пределах литологически однородной территории, сложенной песчано-глинистыми сланцами триаса. В тектоническом отношении район месторождения относится к крупному синклинию. Значительных интрузий в непосредственной близости от месторождения нет. Рудные тела в минералогическом отношении просты. Преобладает кварц, мусковит, хлорит. Золото выделяется как в самом кварце, так и по контактам кварца и сланцев. Рельеф района расчлененный. Средняя густота речной сети составляет 1,78 км/км². Преобладает среднегорный рельеф с абсолютной высотой хребтов от 800 до 1100 м. Относительное превышение водоразделов над днищами долин — 400—500 м. Месторождение находится на междуречье двух долин.

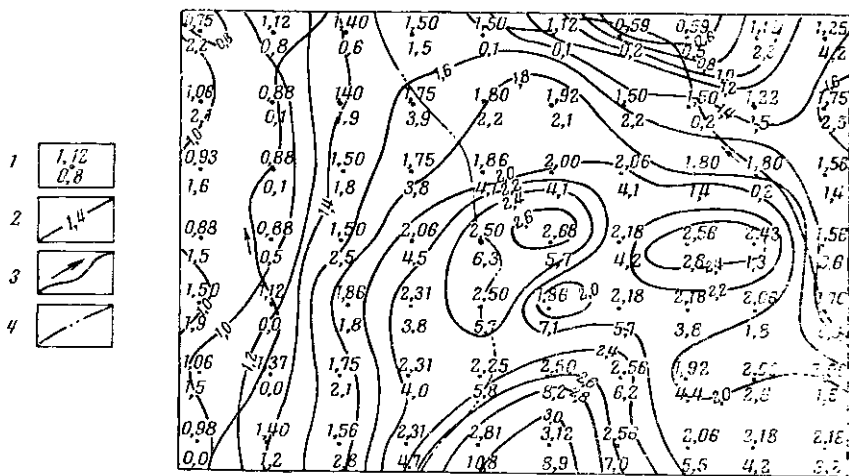
Район второго золоторудного месторождения сложен песчано-глинистыми, песчаными и туфогенными сланцами перми. Породы туфогенной свиты перми обладают повышенной, по сравнению с окружающими породами, прочностью и хрупкостью. В комплекс магматических пород, распространенных в районе входят верхнеюрские интрузии гранитов, гранит-порфиоров и плагиогранитов, имеющие форму небольших штоков. В тектоническом отношении район находится на оси антиклиналя, расположенной на юго-западе крупного антиклинория. Преобладающим простиранием крупных разрывных нарушений, которые фиксируются по геологическим данным, являются северо-восточное и северо-западное. Золотое оруденение приурочено к присводовой части антиклинория. Главными рудовмещающими телами являются кварцевые жилы. Возраст формирования оруденения предположительно определяется интервалом поздняя юра — поздний мел. Нижний предел соответствует времени образования интрузивных тел.

В геоморфологическом отношении район представляет собой расчлененное среднегорье с четко выраженными на водоразделах фрагментами поверхности выравнивания. Предполагается, что последняя сформировалась в течение палеогена-миоцена. Для гидросети района характерно наличие следов многочисленных перехватов и асимметричное строение бассейнов рек. Средняя густота эрозионной сети составляет 1,6 км/км². Различие в литологии слагающих пород проявляется в характере рельефа междуречий. Вершинные поверхности хребтов на площади распространения пород туфогенной свиты примерно на 50—60 м выше, чем в пределах площади распространения других свит. Крупных рек в пределах района нет.

При проведении анализа расчлененности рельефа для целей поисков рудопроявлений золота геолого-геоморфологическая ситуация месторождения рассматривалась под особым углом зрения. Прежде всего обращалось внимание на факторы, которые могли оказать систематический эффект на распределение плотности гидросети по изучаемой площади.

Так, для первого месторождения отмечалось, что район сложен сравнительно однородными глинистыми сланцами, обладающими примерно

одинаковой устойчивостью к процессам денудации. Поэтому предположение о систематическом влиянии литологии пород на расчлененность территории было неправомерно. Поскольку месторождение находится на междуречье двух крупных долин, можно говорить об изменении расчлененности, зависящем от положения участков относительно местных базисов эрозии.



1 — величина расчленения рельефа (км/км²), удаленность от местного базиса эрозии (км); 2 — изолинии расчленения рельефа; 3 — основные дренирующие реки; 4 — линия водораздела

Подсчитаны: 1) дисперсия $\delta^2=0,13$; 2) доверительный интервал для a : $P(1,07 < a < 1,33) = 0,95$; 3) доверительный интервал для b : $P(0,16 < b < 0,24) = 0,95$; 4) коэффициент корреляции: $r=0,78$; 5) доверительный интервал для r находится из таблицы, приведенной у У. Крамбейна и Ф. Грейбилла (1969): $P(0,66 < r < 0,84) = 0,95$.

Для определения достоверности полученных аномалий подсчитываем изменчивость, учитываемую картой тренда относительно карты аномалий (табл. 1). Используя формулу У. Крамбеяна и Ф. Грейбилла

получаем необходимые величины и записываем их в таблицу. В первой строке записана величина SSY^2 , рассчитанная по данным карты наблю-

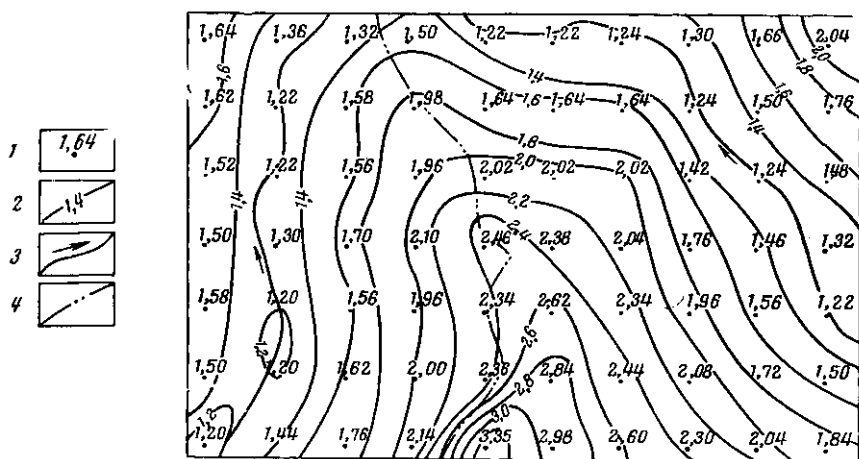


Рис. 2. Схема тренда расчленения рельефа, обусловленного разной удаленностью территории от основных базисов эрозии для Первого месторождения.

1 — величина тренда расчленения рельефа (км/км²); 2 — изолинии тренда расчленения рельефа; 3 — основные дренирующие реки; 4 — линия водораздела

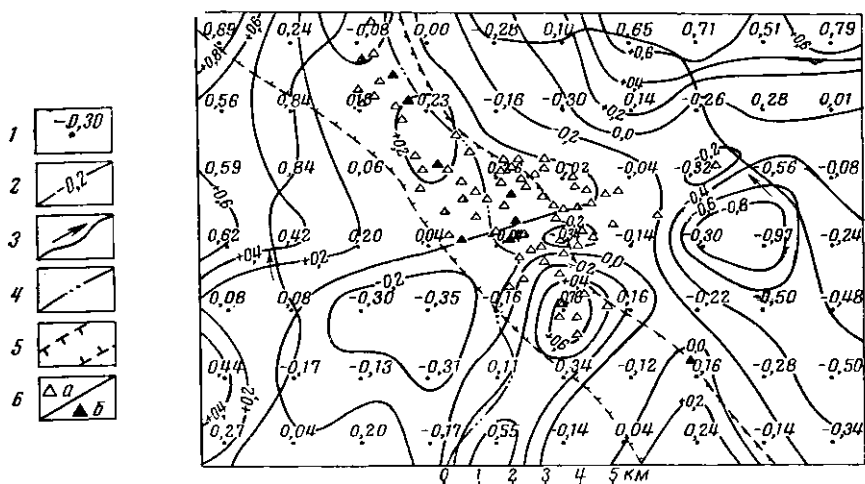


Рис. 3. Аномалии тренда расчленения рельефа, обусловленного разной удаленностью территории от базисов эрозии для Первого месторождения.

1 — величина аномалии расчленения рельефа (км/км²); 2 — изолинии аномалий расчленения рельефа; 3 — основные дренирующие реки; 4 — линия водораздела; 5 — контуры слабой отрицательной аномалии изодинам; 6 — рудопроявления золота, а — средние, б — крупные

дений; во второй — та же величина, но полученная по данным карты тренда. В третьей строке — величина изменчивости реального расчленения рельефа, приходящаяся на карту аномалий.

Таким образом, карта тренда, построенная по уравнению $y = 1,2 + 0,2$, охватывает 54,20% от общей изменчивости карты наблюдений.

Сравнивая оценки дисперсии карты тренда и карты аномалий, получаем значение статистики Фишера (F), равное 39,62, которое превышает критическое значение 10,078 при доверительном уровне +99,9% и 2 и 67 степенях свободы. Следовательно, полученные аномалии являются достоверными.

Количественный подсчет показал, что 75% из всех проанализированных рудопроявлений локализовано в зонах положительных аномалий. Интересно, что на карте магнитного поля (ΔTa) распределению рудопроявлений соответствует зона слабых отрицательных аномалий расчлененности рельефа, в пределах которых находится 75% рудопроявлений; они хорошо совпадают с зоной, выделенной на карте магнитного поля. Большая часть 25% рудопроявлений, не попавших в зоны положительных аномалий, локализована в пределах слабых отрицательных аномалий (0—0,2 км/км²).

При изучении расчлененности рельефа района второго месторождения были проанализированы три различных модели. Во-первых, проверялось предположение о существовании тренда расчлененности, обусловленного наличием туфогенных сланцев. Во-вторых, оценивалась возможность линейного тренда расчлененности, зависящего от положения участков относительно местного базиса эрозии — основной магистральной реки. Третья модель показывала совместное действие обоих вышеуказанных факторов на распределение густоты эрозионной сети.

Исходя из этого, карта наблюдений содержала исходные данные о трех переменных: расчлененности, наличии пород атканской свиты, удаленности участка от местного базиса эрозии. На нее были нанесены контуры распространения туфогенных пород. Определение площади последних вычислялось с помощью палетки для каждого квадрата сети в долях единицы от площади квадратов.

На основании цифровых значений карты наблюдений были рассчитаны три линейных модели.

Модель тренда расчлененности рельефа, зависящего от различного положения участков относительно местного базиса эрозии, выразилась уравнением: $y = 1,31 + 0,05x$. Для модели тренда расчлененности рельефа, обусловленного наличием пород туфогенной свиты, получилось уравнение: $y = 1,41 + 0,57z$.

Модель, учитывающая тренд расчлененности в зависимости от различного положения участков относительно местного базиса эрозии и распространение пород туфогенной свиты, имеет вид: $y = 1,15 + 0,05x + 0,52z$.

Для всех этих моделей рассчитывались доверительные интервалы параметров, дисперсия и коэффициенты корреляции. Были определены величины, характеризующие достоверность построенных карт тренда и карт аномалий (табл. 3).

Таблица 3

Достоверность карт тренда и аномалий

Показатели	$y = 1,31 + 0,05x$	$y = 1,41 + 0,57z$	$y = 1,15 + 0,05x + 0,52z$
Учитываемые картой тренда	13,72%	37,58%	30,10%
Статистика F	8,36	31,61	22,75

Исходя из этих данных, видно, что наиболее «представительной» из моделей, на основании которых получены карты тренда, является модель: $y = 1,41 + 0,57z$, несколько хуже $y = 1,15 + 0,05x + 0,52z$. Наименьшей же достоверностью обладает карта тренда, построенная на основании модели: $y = 1,31 + 0,05x$.

Оказалось, что процент «попадания» рудопроявлений в зоны положительных аномалий расчлененности рельефа прямо пропорционален достоверности соответствующих карт.

Поскольку карты тренда учитывают небольшой процент изменчивости относительно карты наблюдений, аномалии имеют большие размеры, плавные очертания, подчас не имеют ярких пиков. Однако чем больше статистическая достоверность полученных карт, тем план аномалий становится более четким, а пиковые значения — более конкретными по площади (табл. 4).

Таблица 4

Процент «попадания» рудопроявлений золота на участки положительных аномалий, полученных относительно различных линейных моделей

Рудопроявления	Карта аномалий, построенная относительно модели $y = 1,41 + 0,57z$	Карта аномалий, построенная относительно модели $y = 1,15 + 0,05x + 0,52z$	Карта аномалий, построенная относительно модели $y = 1,31 + 0,05x$
Общее количество	81—100%	81—100%	81—100%
В том числе попавшие в контуры положительных аномалий расчлененности рельефа	73—90%	65—80%	47—58%

Таким образом, в условиях второго месторождения наилучшая связь рудопроявлений с участками положительных аномалий (90%) оказалась на карте аномалий тренда, обусловленного наличием туфогенных пород.

В заключение надо отметить положительные и отрицательные стороны рассмотренной методики. К положительным можно отнести то, что, во-первых, каждая модель, на основании которой строились карты тренда, учитывала причинную зависимость расчлененности рельефа от какого-либо систематического фактора. Поэтому полученные относительно этого фактора аномалии имеют четкий геоморфологический смысл. Вторым положительным моментом является достаточно большой процент «попадания» (75—90%) рудопроявлений золота в контуры положительных аномалий. Причем, как это видно на примере второго месторождения, из нескольких вариантов можно подобрать заранее такой, на котором процент «попадания» рудопроявлений золота в контуры положительных аномалий будет наибольшим. Положительным является также и то, что применение математических методов дает возможность задать ся определенной допустимой погрешностью исследования.

Отрицательным следует считать то обстоятельство, что площадь аномалий оказывается все-таки довольно значительной. На примере рассмотренных месторождений видно, что максимум скопления точек с рудопроявлениями не совпадает с максимальными значениями положительных аномалий, а, как правило, приурочен к «седловинам» между аномалиями положительного знака.

Дальнейшая разработка анализа* должна, на наш взгляд, заключаться в следующем: во-первых, необходимо с помощью геоморфологического анализа, а также используя статистические методы, научиться определять самые важные факторы, влияющие на расчлененность рельефа в пределах месторождения; во-вторых, нужно использовать для построения карт тренда общую линейную модель. Она позволит более полно описать сложное распределение реальной плотности эрозионной сети по площади; в-третьих, для более быстрого и точного проведения анализа необходимо использовать быстродействующую вычислительную технику, для чего потребуется составление специализированных программ.

ЛИТЕРАТУРА

- Ананьев Г. С., Ананьева Э. Г. Проблема геоморфологических аномалий в связи с поисками россыпных и коренных месторождений полезных ископаемых. Сб. Геоморфологические методы поисков эндогенного оруденения. Чита, 1968.
Крамбейн У., Грейбилл Ф. Статистические модели в геологии. «Недра», 1969.
Симонов Ю. Г. Две основные геоморфологические задачи при поисках эндогенного оруденения. Сб. Геоморфологические методы поисков эндогенного оруденения. Чита, 1968.

Географический факультет
МГУ

Поступила в редакцию
23.II.1971

THE STUDY OF ANOMALIES IN RELIEF RUPTURING FOR DETECTING HYDROTHERMAL ORE FORMATIONS

A. V. TRUSHIN and G. S. ANANIEV

Summary

It is suggested that the golden ore deposits in the North-East of the USSR should be detected by analysing the degree of relief breaking. It seems that the golden ore deposits are confined to areas with an exceedingly low density of the erosion system. These areas are defined in relation to the systematic component of the degree of relief breaking, which is determined with the help of geological and geomorphological methods and which is calculated statistically.
