

Распределение обследованных оврагов по различным вариантам

| Номер<br>варианта | Количество<br>оврагов | Процент<br>от общего<br>количества | Номер<br>варианта | Количество<br>оврагов | Процент<br>от общего<br>количества |
|-------------------|-----------------------|------------------------------------|-------------------|-----------------------|------------------------------------|
| 1                 | 16                    | 29,1                               | 7                 | 1                     | 1,82                               |
| 2                 | 13                    | 23,6                               | 8                 | 1                     | 1,82                               |
| 3                 | 7                     | 12,7                               | 9                 | 1                     | 1,82                               |
| 4                 | 8                     | 14,52                              | 10                | —                     | —                                  |
| 5                 | 5                     | 9,1                                | 11                | —                     | —                                  |
| 6                 | 3                     | 5,52                               |                   |                       |                                    |
| Всего:            | 55                    | 100%                               |                   |                       |                                    |

ния по максимальному количеству объектов. Помимо решения основной задачи результаты исследований могут быть полезны при сравнительной характеристике устойчивости природно-территориальных комплексов различных районов.

### MORPHOMETRIC ASSESSMENT OF GULLIES BASED ON FIELD MEASUREMENTS

S. K. BILYALOV, I. M. MASALIN

#### Summary

Observations of 55 gullies in Northern Kazakhstan were used as a basis of a new method developed to evaluate the rate of various kinds of erosion (lateral erosion, downcutting, backward erosion). The procedure includes a series of one-time measurements of the gully's depth and width equally spaced from the head towards mouth of the gully. Coefficients and their combinations are introduced to calculate a contribution of each kind of erosion to the general process of gully formation.

УДК 551.4.012

**А. О. СЕЛИВАНОВ, Л. В. АНЗИМИРОВ**

### ВЛИЯНИЕ ПРОМЕЖУТКА ВРЕМЕНИ МЕЖДУ НАБЛЮДЕНИЯМИ НА ОЦЕНКУ СКОРОСТИ ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

При анализе различных природных процессов используются дискретные ряды наблюдений. Кроме уменьшения точности это может приводить к принципиальным искажениям характера процесса, особенностей распределения изменений какой-либо природной характеристики по частотам и даже оценок ее общей изменчивости. Это явление предложено называть элиасингом [1, 2].

В геологии и геоморфологии в редких случаях удается получить даже дискретные временные ряды, достаточные для их статистического анализа. О скоростях геолого-геоморфологических процессов чаще всего судят по единичным наблюдениям. При этом скорость  $S$  определяется как отношение перемещения  $\Delta X$  ко времени  $\Delta t$ , за которое это перемещение произошло:

$$S = \Delta X / \Delta t. \quad (1)$$

В большинстве случаев при геологических исследованиях знак  $\Delta X$  не учитывается, так что по сути дела формула (1) определяет абсолютную величину скорости  $|S|$  и идентична формуле (1а)

$$|S| = |\Delta X| / \Delta t. \quad (1a)$$

Получаемые при этом оценки скоростей отдельных процессов могут различаться на несколько порядков. Так, скорость повышения среднего уровня Мирового океана в XX в. составляет 1,5 [3] или даже 3 мм/год [4], а по косвенным данным, полученным путем анализа миоцен-плиоценовых донных отложений, — лишь 0,008 мм/год [5]. Интенсивность денудации Горного Крыма по инструментальным замерам за 7 лет оценивается в 10 мм/год, по археологическим данным за 1—100 тыс. лет — в 3,0—0,3, а по геолого-геоморфологическим за 37 млн. лет — в 0,01 мм/год [6].

Скорости горизонтального перемещения береговой линии аккумулятивных берегов по данным инструментальных наблюдений отдельных районов Белого моря составляют 2—3 м/год и более, а по геолого-геоморфологическим данным за последние 4—5 тыс. лет — лишь 0,1 м/год [7]. Чаше всего скорости, полученные за сравнительно короткие промежутки времени, оказываются выше оценок скорости по геолого-геоморфологическим данным. Более того, чем больше промежуток геологического времени, за который вычисляется скорость, тем меньше оказывается ее величина [8, 9]. Обычно на основании этого делается вывод об ускорении природного процесса. Однако всегда ли этот вывод обоснован? Не связано ли наблюдаемое изменение скоростей с особенностями их оценки? Подобные мнения уже высказывались некоторыми геологами [8], а Т. Гарднер с соавторами [10] попытались обосновать на массовом материале довольно распространенное объяснение, заключающееся в том, что снижение оценок скорости при увеличении промежутка времени вызвано наличием периодов тектонической стабильности. Проанализировав 538 оценок скорости тектонических движений и денудации в широких временных (от 1 мин до 100 млн. лет) и пространственных (от 1 мм до сотен километров) пределах, они установили статистически значимое уменьшение оценок скорости при увеличении периода усреднения  $\Delta t$ . Был сделан вывод о необходимости введения в измеренные значения скорости нелинейно возрастающих со временем ( $\Delta t$ ) поправочных коэффициентов для приведения измеренных скоростей к «истинным». Поправочные коэффициенты авторов всегда больше 1.

Таким образом, согласно их представлениям, «истинное» значение скорости геолого-геоморфологического процесса всегда больше ее измеренных величин, причем разность «истинной» и измеренной скорости возрастает с увеличением  $\Delta t$ . Эта система рассуждений обладает, на наш взгляд, одним принципиальным недостатком. Если снижение скорости при увеличении  $\Delta t$  действительно происходит из-за наличия периодов низкой эрозионной и тектонической активности, то оно не нуждается в поправке, поскольку характеризует реальное снижение скорости процесса в отдельные периоды прошлого, не зависящие от способа измерения.

«Временной парадокс», на наш взгляд, возможно объяснить линейным усреднением сложных колебательно-поступательных процессов развития природных систем при определении скоростей по формулам (1) и (1а). Проиллюстрируем это следующими рассуждениями. Пусть некоторая характеристика природного объекта  $X$  изменяется во времени колебательно-поступательно (случайно или периодически) (рис. 1, б), причем существует средняя скорость  $S_{cp}$  процесса. Допустим также, что отклонения  $X$  от тренда с некоторой постоянной высокой вероятностью  $p$  заключены в пределах  $\pm C$ , т. е. средняя амплитуда колебаний характеристики  $X$  процесса неизменна во времени. Эти два требования не являются слишком строгими, так как большинство природных процессов в той или иной степени периодически, а требования линейности тренда и постоянства амплитуды вытекают из логики определения средней ско-

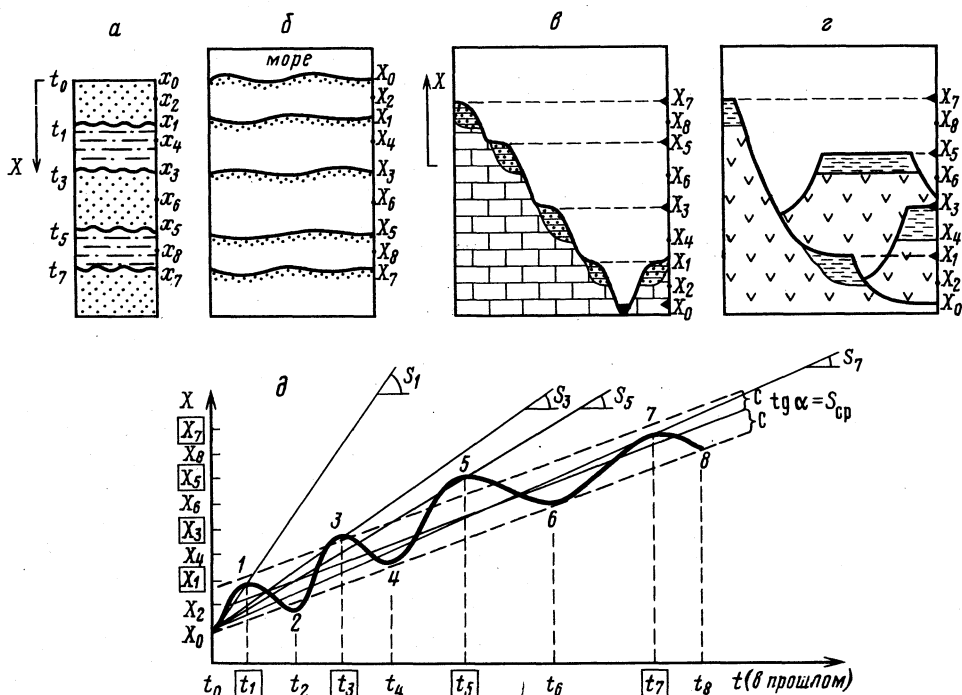


Рис. 1. Зависимость оценки скорости природных процессов сложного колебательно-поступательного характера с постоянной малой вероятностью превышения амплитуды колебаний  $\pm C$  и средней скоростью  $S_{cp}$  от времени усреднения

*a* — процесс осадконакопления; *б* — горизонтальное перемещение береговой линии; *в* — речная эрозия; *г* — денудация; *д* — изменения характеристики процесса.  $S_1, S_3, S_5, S_7$  — оценки скорости процесса, фиксируемые в геологической летописи, и соответствующие им значения характеристики процесса  $X_1, X_3, X_5, X_7$  и интервалы времени  $t_1, t_3, t_5, t_7$ ;  $X_2, X_4, X_6, X_8$  — значения характеристики процесса, не фиксируемые в геологической летописи, и соответствующие им интервалы времени  $t_2, t_4, t_6, t_8$ ;  $X_0$  — значение скорости при  $\Delta t = 0$

рости. Если тренд нелинеен или амплитуда меняется, то вычислять среднюю скорость по формулам (1) и (1а) не имеет смысла.

На рис. 1, *a* — *г* приведены примеры реализаций четырех геолого-геоморфологических процессов колебательно-поступательного характера: осадконакопления, перемещения береговой линии аккумулятивного берега, эрозии в речной долине и региональной денудации, а на рис. 1, *д* — график изменения величины  $X = X(t)$  во времени. Величина  $X$  в зависимости от процесса характеризует мощность слоя аккумуляции, величину горизонтального перемещения береговой линии, глубину эрозийного вреза и денудационного среза. В первых двух случаях общий аккумулятивный процесс прерывался эпизодами размыва, в ходе которых часть отложенного материала удалялась. Максимальные отметки высоты литологических горизонтов и величины смещения аккумулятивной береговой линии ( $X_8, X_6, X_4, X_2$ ) не зафиксированы ни в литологической колонке, ни в расположении древних береговых линий. Анализ доступны лишь отметки  $X_7, X_5, X_3, X_1$ , отвечающие условиям частичного размыва. На рис. 1, *д* они соответствуют максимумам гармоники. Аналогичным образом определение глубины вреза, производимое по отметкам бровок речных террас и верхним граням древних поверхностей выравнивания, позволяет получить значения, соответствующие максимумам гармоники на рис. 1, *д*.

Итак, находясь в точке  $t = 0$ , геолог в условиях ограниченной информации о ходе исследуемого процесса измеряет среднюю скорость, пользуясь формулой (1а). Используя данные о событии возраста  $t_1$ , он получает оценку скорости  $S_1$ ,

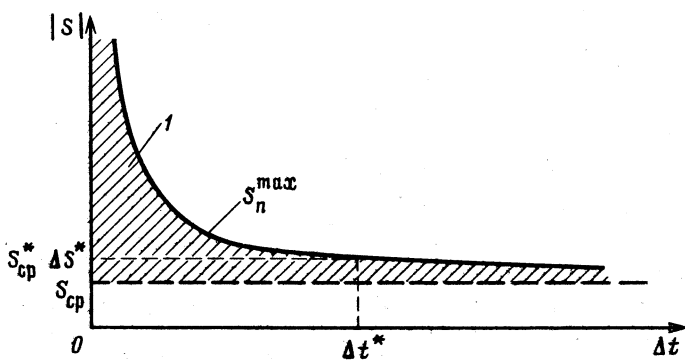


Рис. 2. Вид «области неопределенности» оценки средней скорости геолого-геоморфологического процесса с вероятностью  $p$  1 — «область неопределенности» оценки скорости с вероятностью  $p$ .  $\Delta t^*$  — фидуциальное время,  $\Delta S^*$  — допустимая ошибка оценки,  $S_{cp}$  — средняя скорость процесса,  $S_n^{max}$  — верхняя граница «области неопределенности»

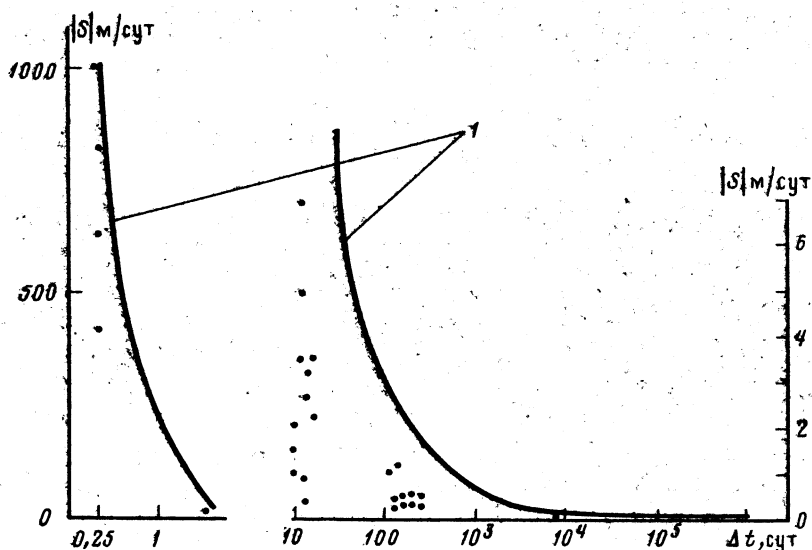


Рис. 3. Абс. величины оценок скоростей горизонтального перемещения береговой линии одного из приливных заливов Белого моря и верхняя граница «области неопределенности» этих оценок 1 — граница «области неопределенности» оценки скорости с вероятностью 95%

о событии  $t_3$  —  $S_3$  и т. д. (рис. 1, д). Оценка скорости  $S_n$  за интервал времени  $\Delta t_n$  с вероятностью  $p$  заключается в области, ограниченной снизу значением  $S_{cp}$ , а сверху

$$S_n^{max} = S_{cp} + \Delta S_n = S_{cp} + |C|/\Delta t_n, \quad (2)$$

где  $S_{cp}$  и  $\Delta S_n$  — величины положительные, как это принято в геологии. Числитель дроби в формуле (2) — постоянная величина, поэтому изменчивость границ «области неопределенности» оценки скорости (рис. 2) зависит в основном от знаменателя. Если  $\Delta t_n$  величина малая, то второе слагаемое формулы (2) может быть весьма большой величиной, а оценка скорости — неопределенной. С ростом  $\Delta t_n$  это слагаемое быстро уменьшается, и в пределе  $S_n^{max}$  стремится к  $S_{cp}$ . Вероятность получения завышенной оценки средней скорости геолого-геоморфологического процесса стремится к нулю.

**Зависимость оценок скорости горизонтального перемещения береговой линии одного из заливов Белого моря от периода усреднения и размеры «области неопределенности» этих оценок**

| Период усреднения $\Delta t$ | Размер «области неопределенности» оценки скорости $\{S_{cp}; S_{cp} + \Delta S_n\}$ на уровне обеспеченности 95% м/сут | Наибольшая из наблюдаемых оценок скорости $S_n$ | Период усреднения $\Delta t$ | Размер «области неопределенности» оценки скорости $\{S_{cp}; S_{cp} + \Delta S_n\}$ на уровне обеспеченности 95% м/сут | Наибольшая из наблюдаемых оценок скорости $S_n$ |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 0,25                         | 1000                                                                                                                   | 1000                                            | $10^4$                       | 0,025                                                                                                                  | 0,025                                           |
| 10                           | 25                                                                                                                     | 7,1                                             | $10^5$                       | $2,5 \cdot 10^{-3}$                                                                                                    | $2,0 \cdot 10^{-3}$                             |
| 100                          | 2,5                                                                                                                    | 1,1                                             | $10^6$                       | $2,5 \cdot 10^{-4}$                                                                                                    | $2,0 \cdot 10^{-4}$                             |
| 365                          | 0,7                                                                                                                    | 0,4                                             |                              |                                                                                                                        |                                                 |

Таким образом, для объяснения парадокса уменьшения скорости геологических процессов колебательно-поступательного характера не требуется привлекать представления об изменении некой «истинной скорости», как это делают, например, Т. Гарднер и его коллеги [10]. «Временной парадокс» есть следствие принятого в геологии и геоморфологии метода измерения средней скорости и обусловлен недостатком информации о действительном ходе природного процесса.

В зависимости от конкретной задачи исследователь может довольствоваться той или иной ошибкой определения средней скорости (рис. 2). Тогда, используя формулу (2), можно оценить такой интервал усреднения  $\Delta t_n = \Delta t^*$ , для которого ошибка не превышает  $\Delta S^*$  с ранее заданной вероятностью  $p$ . Оно равно

$$\Delta t^* = |C| / \Delta S^*. \quad (3)$$

Для оценки средней скорости следует использовать только данные за промежуток времени, равный или превышающий  $\Delta t^*$ . При этом  $\Delta t \geq \Delta t^*$  мы предлагаем называть «фидуциальным временем» (от латинского *fidus* — верный, надежный). Таким образом, фидуциальное время — это период усреднения, в котором оценка скорости геолого-геоморфологического процесса с вероятностью не меньше заданной вероятности  $p$  соответствует значению его средней скорости в пределах принятой ошибки  $\Delta S^*$ . Из формулы (3) очевидно, что чем больше изменчивость процесса (чем больше  $C$ ), тем более длительные наблюдения необходимо провести для получения информации о средней скорости процесса.

При практическом использовании формул (2) и (3) наиболее существенным является определение  $C$  исследуемого процесса для принятого уровня обеспеченности  $p$ . В случае, когда периодичность процесса проявляется за срок от нескольких веков до тысячелетий или десятков тысяч лет, для определения  $C$  следует привлекать косвенную геолого-геоморфологическую информацию. Для короткопериодичных процессов это можно осуществить путем исследования их современной динамики за сравнительно непродолжительный промежуток времени (чаще всего от месяцев до нескольких лет). Если в результате статистического анализа временного ряда длиной  $\Delta t_k$  установлено, что оценки скорости с заданной вероятностью  $p$  попадают в интервал от  $S_{cp}$  до  $S_{cp} + \Delta S_k$ , то величина  $C$  исследуемого процесса находится по формуле

$$C = \Delta S_k \Delta t_k. \quad (4)$$

В рамках этих представлений рассмотрим ряд данных о скоростях горизонтального перемещения береговой линии одного из приливных заливов Белого моря, полученных нами [7] на основании инструментальных и геолого-геоморфологических материалов в интервале от 6 ч до 7—8 тыс. лет (рис. 3). В результате анализа динамики перемещений береговой линии за приливно-отливный полуцикл ( $\sim 6$  ч) установлено, что они с вероятностью 95% не превышают 250 м. Констатируется монотонное убывание скорости с ростом периода усред-

нения, причем все оценки скорости не выходят за пределы области неопределенности, рассчитанной по формуле (2) (таблица, рис. 3).

Обращает на себя внимание быстрое сокращение области неопределенности, связанное с высокой частотой процесса переформирования берега приливного моря. Удовлетворительная точность оценки средней скорости процесса достигается при наблюдениях продолжительностью порядка сезона или года. Если принять ошибку  $\Delta S^*$  определения средней скорости равной 0,1 м/сут, то  $\Delta t^* = 2500$  сут, или около 7 лет. Таким образом, для оценки средней многолетней скорости горизонтального перемещения береговой линии приливного моря, ошибка которой с вероятностью не менее 95% не превышает 0,1 м/сут, достаточно иметь статистически надежную оценку скорости этого процесса за 7—10 лет.

Анализ подобных зависимостей может оказаться полезным при сравнении скоростей геолого-геоморфологических процессов в различных пунктах, имеющих разный период усреднения. Сравнение скоростей допустимо лишь тогда, когда они рассчитаны на фидуциальное время.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Симонов Ю. Г. Пространственно-временной анализ в физической географии // Вестн. МГУ. Сер. геогр. 1977. № 4. С. 22—29.
2. Проблемы регионального географического прогноза / Отв. ред. А. П. Капица, Ю. Г. Симонов. М.: Наука, 1982. 264 с.
3. Клиге Р. К. Изменения глобального водообмена. М.: Наука, 1985. 234 с.
4. Emery K. O. Relative sea levels from tide-gauge records // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 1980. V. 12. P. 6968—6973.
5. Каплин П. А. Типы изменений уровня моря // Геоморфология. 1986. № 3. С. 16—22.
6. Грачев А. Ф., Данг Ван Бат. Методика определения интенсивности экзогенных процессов (на примере Горного Крыма) // Климат, рельеф и деятельность человека. М.: Наука, 1981. С. 40—46.
7. Селиванов А. О. Особенности развития береговой зоны приливных морских заливов в связи с созданием в них пресноводных водохранилищ (на примере Онежского залива Белого моря): Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1984. 27 с.
8. Кукал З. Скорость геологических процессов. М.: Мир, 1987. 248 с.
9. Селиванов А. О. К оценке величин изменчивости береговых процессов за различные промежутки времени // Геоморфология. 1989. № 3. С. 90—95.
10. Gardner Th. W., Jorgensen D. W., Shuman C. R. Effects of measured time interval. // Geology. 1987. V. 15. № 3. P. 259—261.

Институт водных проблем АН СССР  
Московский горный институт

Поступила в редакцию  
7.II.1989

#### EFFECT OF TIME INTERVAL BETWEEN MEASUREMENTS ON ESTIMATED RATE OF GEOLOGIC-GEOMORPHIC PROCESSES

A. O. SELIVANOV, L. V. ANZIMIROV

#### Summary

Examples of measured and calculated rates of geologic-geomorphic processes demonstrate that estimated rates usually decrease while the time intervals between measurements increase. It is shown that such a relation is inevitable in conditions of inadequate information and complicated oscillative-progressive character of the natural process. Rate estimates approximate mean value when time interval increases. The term «fiducial time» is proposed for the time period long enough to make an estimated rate equal to the mean rate with high probability born in mind in advance. The ideas proposed are exemplified by data on rates of horizontal migration of shoreline in one of the White Sea tidal bays. It is proved that in order to calculate the mean multi-year rate of this process one should have a statistically significant series of shoreline position estimate for 7 to 10 years.