

3-d CINEMATIC MODEL OF SLOPE EVOLUTION

V.VAD. BRONGULEYEV

Summary

3-d cinematic model demonstrates different landforms evolution under the action of slope processes. Different types of morphological control on slope degradation rate were analyzed. Including three morphological characteristics into model – gradient, vertical curvature, and horizontal one – enables to describe different types of relief development and elucidate some peculiarities of landforms morphology.

Horizontal curvature may effect notably the shape of developing landforms. Its influence consists in graduation of surface ribs, flattening of summits, pedimentation at the foot of salient hemianticline shaped parts of landforms. The role of horizontal curvature in graduation of planar ribs of relief is analogue to that of vertical curvature in destruction of profile steps.

Some features of pedimentation were simulated: joint of pediments having different base levels, “concave” relief formation, convergence of forms during slopes regression.

УДК 551.4.01→551.312.321(100.4)

© 2011 г. **В.И. МОЗЖЕРИН**, **В.В. МОЗЖЕРИН**

МИРОВОЙ СТОК ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ: ЕГО ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКАЯ И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Введение

Известно более 30 оригинальных оценок глобального стока взвешенных наносов, полученных разными методами и основанных на исходных данных разного объема. Неодинакова и принятая в расчетах площадь периферийных, имеющих сток в океан, участков суши (от 86 до 134 млн. км²). Даже если не учитывать первые оценки стока наносов конца XIX и начала XX вв. (А. Гейки, М. Рид, А. Пенк, Х. Твенховель и др.) из-за явной неполноты и во многом случайности исходных материалов, то все равно обращает внимание очень большой разброс величин глобального стока (табл. 1, рис. 1). Неоднократно предпринимались и попытки их сопоставления; одна из последних таких попыток, наиболее полная по объему, принадлежит А.В. Панину [1–3].

Оценки глобального стока взвешенных наносов согласно данным таблицы 1 варьируют в очень широких пределах – от 5.2 до 51.1 млрд. т/год, или от 39 до 456 т/км² × год. Средняя арифметическая величина мирового стока, рассчитанная по 32 значениям, составляет немногим более 19 млрд. т/год. Есть несколько причин различий в оценках: 1) неодинаковый объем исходных данных по постам и разное количество постов (нередко пространственное несовпадение в размещении постов); 2) различные периоды учета стока по одним и тем же рекам; 3) разные способы экстраполяции имеющихся данных на неизученные области; 4) неодинаковая учтенная площадь периферийной суши, не охваченной непосредственными наблюдениями.

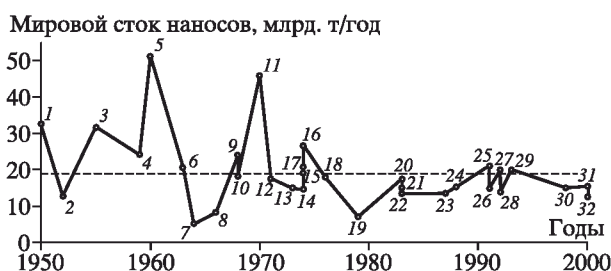


Рис. 1. Существующие оценки глобального стока взвешенных наносов (по А.В. Панину [32] с изменениями) Цифры соответствуют порядковым номерам в таблице 1. Пунктирная линия – положение средней арифметической величины приведенных оценок

Оценки стока взвешенных наносов в Мировой океан

№ п/п	Год публикации	Автор(ы) оценки	Площадь сноса, млн. км ²	Сток наносов, млрд. т/год
1	1950	P.H. Kuenen [4] ¹	101.6	32.5
2	1952	Г.В. Лопатин [5] ²	130.75	12.7
3	1955	J. Gilluly [6] ³	101.6	18.0
4	1959	Д. Печинков [7]	101.6	24.2
5	1960	F. Fournier [8]	134.48	51.1
6	1963	S.A. Schumm [9] ⁴		20.5
7	1964	J. Corbel [10]		5.2
8	1966	F.T. Mackenzie, R.M. Garrels [11]		8.3
9	1968	S. Judson [12]		24.0
10	1968	J.N. Holeman [13] ⁵	101.5	18.3
11	1970	J.F. Dewey, J.M. Bird [14] ⁶		45.8
12	1971, 1974	А.П. Лисицын [15]	102.7	18.5
13	1973	A. Sundborg [16]		15.0
14	1974	В.В. Алексеев, К.Н. Лисицына [17]	104.8	15.7
15	1974	S. Judson, D.F. Ritter [18]		20.2
16	1974	J.M.L. Jansen, R.B. Painter [19]		26.7
17	1974	М.И. Львович [20]		21.7
18	1976	E.D. Goldberg [16]		18.0
19	1979	Н.М. Страхов [21] ⁷	104.8	8.1
20	1983	В.В. Гордеев [22]		18.5
21	1983	D.E. Walling, B.W. Webb [23]		15.0
22	1983	J.D. Milliman, R.H. Meade [24]	86.4	13.5
23	1987	D.E. Walling [16]		13.5
24	1988	M. Meybeck [25]		16.3
25	1991	А.П. Лисицын [26]		22.1
26	1991	М.И. Львович и др. [27]		14.9
27	1992	J.D. Milliman, J.P.M. Sivitski [16]		20.0
28	1992	В.И. Мозжерин [28]	97.6	13.8
29	1993	S.M. McLennan [29]		21.0
30	1998	W. Ludwig, J.-L. Probst [30]		16.0
31	2000	А.П. Дедков, В.И. Мозжерин [31]	98.1	15.5
32	2000	C.G.A. Harrison [32]		13.5
		Среднее значение	105.5	19.3

¹ В оригинале – 12 км³ пород в год; сток наносов пересчитан для удельного веса пород, равного 2.65 г/см³.

² Без Антарктиды, Гренландии и Канадского архипелага.

³ Уточнение данных П.Х. Кюнен [1] для удельного веса пород 1.5 г/см³.

⁴ В оригинале – 201 т/км² × год

⁵ В оригинале – площадь сноса 39.2 млн. миль².

⁶ В оригинале – исходные данные приведены в слое сноса; данные на Азию экстраполированы по юго-восточной Азии.

⁷ Площадь рассчитана, исходя из модуля сноса, равного 77.1 т/км² × год.

Однако следует отметить, что с середины 1970-х гг. полученные разными авторами величины сноса довольно близки между собой. Так, материалы таблицы 1 и очень наглядный график повременного изменения оценок стока наносов, составленный А.В. Паниным [32] и в дополненном виде представленный на рис. 1, свидетельствуют, что последние по времени определения величины стока взвешенных наносов лежат в интервале 13–16 млрд. т/год (120–180 т/км² × год), т.е. отличаются друг от друга максимум на 20–25%. Причина этого вполне очевидна – использование практически одних и тех же исходных материалов по рекам с наибольшим стоком наносов. Всего

лишь 20 крупных рек обеспечивают 50% мирового стока наносов (рис. 2), а с участков суши, изученных в отношении стока наносов (около 75% от периферийных областей сноса), взвешенного материала поступает более 11 млрд. т/год, что составляет 70–80% его общемировой величины. Поэтому во многом от точности расчетов стока с неизученных речных бассейнов зависит его общая оценка.

Нами в настоящей работе

принята величина 14.3 млрд. т/год, полученная в результате ряда уточнений собственных предшествующих оценок [25, 28]. Близость приводимой величины к рассчитанному среднему арифметическому значению и особенно к оценкам последних двух–трех десятилетий не оставляет серьезных сомнений в ее надежности. Влекомые наносы не включены в эту цифру для обеспечения ее сопоставимости с данными других авторов, где влекомые наносы также не учтены. Их включение повышает объем глобального стока наносов до 15.7 млрд. т/год.



Рис. 2. Кумулятивная кривая современного объема стока взвешенных наносов (% от общемирового) по рекам с наибольшим стоком наносов

Используемые методики определения стока взвешенных наносов

Идеальным случаем для определения стока является расположение поста наблюдений в устье реки. Однако таких постов сравнительно немного. Чаще всего посты на реках с изученным стоком расположены выше устья. Если учтенная постом площадь бассейна не более чем на 20% меньше общей площади бассейна (F), то для устья принималось значение модуля стока наносов по этому посту (M) и объем стока (W) рассчитывался по обычной формуле:

$$W = MF. \quad (1)$$

Значительно сложнее определить вынос материала для рек, не имеющих стационарной изученности. Используется несколько способов определения стока наносов с таких бассейнов. Самый простой из них заключается в переносе на эти бассейны тех средних модулей, которые установлены для остальной части суши [10, 13, 20 и др.].

Во втором способе такой перенос делается по мутности речных вод с учетом объема жидкого стока [17, 24]. Поскольку величина жидкого стока и мутность речных вод подчинены зональной (на равнинах) или высотной (в горах) поясности, то расчеты не вызывают большой трудности и широко использовались, например, в фундаментальных исследованиях при составлении для всей территории СССР серии трудов “Ресурсы поверхностных вод”. Близок к этому методу подбор бассейнов-аналогов [14 и др.].

И, наконец, подсчет стока наносов неизученных рек ведется по математико-статистическим зависимостям между различными показателями этого стока и контролирующими его факторами [16, 25 и др.]. Нами использован последний подход, как наиболее объективный и точный. Имеющийся в нашем распоряжении материал позволяет строить математико-статистические модели стока наносов, в которых учитывается закон Н.И. Маккавеева о нелинейности связей в эрозионно-аккумулятивном процессе. Подобные модели в форме показательных уравнений уже были применены Дж. Янсен и Р. Пейнтером [16].

Общее уравнение стока наносов (r) для рек одной ландшафтной и орографической принадлежности (равнины и горы) принято в виде:

$$r = aM^{\alpha}A^{\beta}F^{\gamma}H^{\delta}U^{\epsilon}, \quad (2)$$

где M – модуль жидкого стока ($\text{л/с} \times \text{км}^2$), A – балл сельскохозяйственной освоенности поверхности речного бассейна, F – площадь речного бассейна (км^2), H – средняя высота речного бассейна (м), U – балл средней устойчивости пород. Если расчет таких показателей, как M , F и H не требуют пояснений, то процедуры определения баллов сельскохозяйственной освоенности и устойчивости пород более субъективны и нуждаются в пояснениях.

Для оценки влияния антропогенного фактора A на сток взвешенных наносов все имеющиеся в нашем банке сведения по речным бассейнам суши Земли были разбиты по степени освоенности на три категории: I – неосвоенные или слабоосвоенные бассейны (распаханность не более 30% площади речного бассейна, остаточная лесистость (для лесных зон) не менее 70%); II – среднеосвоенные бассейны (распаханность и лесистость от 30 до 70%); III – сильноосвоенные бассейны (пашня и другие эрозионно-активные земли занимают более 70%, остаточная лесистость и природные ландшафты составляют менее 30%).

Устойчивость пород имеет большое значение для оценки внутриконтинентальной эрозии по сравнительно небольшим бассейнам. При расчетах выноса в океан, основанных главным образом на данных по крупным бассейнам, происходит естественное осреднение величин стока и роль литологических различий не столь существенна, хотя и требует учета.

Как уже указывалось нами ранее [33], характер влияния площади бассейна F зависит от категории освоенности A . Поэтому коэффициенты уравнения (1) необходимо определять для бассейнов одной категории освоенности. Так для гумидных равнин умеренного пояса получено три уравнения:

$$r = \frac{F^{0.0848} H^{0.1613} M^{0.4815}}{0.2487 U^{0.2552}} - \text{для слабоосвоенных бассейнов}; \quad (3)$$

$$r = \frac{H^{0.8968} M^{0.0420}}{0.2016 F^{0.2629} U^{0.5528}} - \text{для среднеосвоенных бассейнов}; \quad (4)$$

$$r = \frac{H^{0.8613} M^{0.7012}}{0.3187 F^{0.2464} U^{0.5425}} - \text{для сильноосвоенных бассейнов}; \quad (5)$$

Формулы найдены методом наименьших квадратов по 788 речным бассейнам, для которых были известны все используемые в формулах (3–5) характеристики. Коэффициент корреляции между расчетными и фактическими данными по этим бассейнам составляет 0.75, а среднеквадратические ошибки расчетных модулей стока наносов варьируют от 20 до 40%. Таким образом, полученные формулы вполне пригодны для практического применения при расчетах стока наносов неизученных рек.

В хорошем соответствии с известными закономерностями находится структура расчетных формул, знак и величина показателей степени, что особенно наглядно проявляется при сопоставлении формул для слабо- и сильноосвоенных бассейнов. Модули стока наносов r с жидким стоком M и высотой рельефа H во всех формулах связаны прямо пропорциональной зависимостью, а с устойчивостью пород U – обратно пропорциональной. Однако в естественных условиях сток наносов реагирует на изменение значений этих параметров более спокойно, чем в антропогенно измененных (показатели степени в формуле 3 значительно меньше, чем в формуле 5). Увеличение площади бассейна F при слабоизмененных ландшафтах водосборов приводит к слабому росту стока наносов, при сильноизмененных ландшафтах – к очень быстрому его снижению (примерно пропорционально корню четвертой степени от площади).

Зависимости, аналогичные формулам (3–5), устанавливались для отдельных регионов Земли, относительно однородных по природным и антропогенным условиям формирования стока наносов (всего было использовано более 50 территориальных

единиц). В основе выведенных зависимостей лежат фактические данные более чем по 4000 пунктов наблюдения за стоком взвешенных наносов.

Подобный подход ранее использован М.И. Львовичем и его соавторами, которые приняли графическую форму выражения зависимостей [24]. На наш взгляд, математическая форма, теряя в наглядности, более удобна для последующих расчетов.

Сток взвешенных наносов с континентов

Помимо общей оценки сноса многие исследователи дифференцировали сток наносов по материкам, частям света, отдельным странам, крупнейшим бассейнам и т.д. Пример такой дифференциации (заранее оговоримся, что далеко не полный) приведен в таблице 2, анализ которой свидетельствует, что и в целом по миру, и по отдельным континентам и частям света картина очень пестрая. Наиболее интенсивна эрозия в пределах Евразии. Можно указать на несколько причин, вызывающих здесь повышенную эрозию. Основная часть стока наносов с этого материка формируется на его юго-востоке и юге (Лёссовое плато Китая, Индокитай, Индостан, Средиземье, многочисленные острова у восточного побережья Азии), т.е. в тех районах, где очень давняя и сильная сельскохозяйственная освоенность сочетается с большим и крайне неравномерным в течение года жидким стоком, высоким и расчлененным рельефом, активной современной тектонической деятельностью, широким развитием малоустойчивых к эрозии горных пород, большой мощностью рыхлых продуктов выветривания.

Для островной части, как впервые обратил внимание Дж.Д. Миллиман, большое значение имеет малая площадь бассейнов горных водотоков, когда модули стока достигают 10–15 тыс. т/км² × год (Тайвань, Ява и другие острова) [34]. Однако максимум стока наносов (20–30 тыс. т/км² × год) все же наблюдается на равнинах Лёссового плато.

В то же время в Евразии располагается наибольший по площади ареал очень слабой эрозии. Он приурочен к равнинам северной покатости материка. Реки бассейна

Таблица 2

Современный транзитный сток взвешенных наносов на Земле

Материк с островами	Океанический водосбор				В целом по матерiku
	Северный Ледовитый	Атлантический	Тихоокеанский	Индийский	
Евразия	$\frac{178}{13.1} (14)$	$\frac{640}{6.7} (96)$	$\frac{3026}{8.8} (344)$	$\frac{5010}{6.9} (726)$	$\frac{8854}{35.5} (249)$
Африка	–	$\frac{645}{15.0} (43)$	–	$\frac{476}{3.34} (142)$	$\frac{1121}{18.3} (61)$
Северная Америка	$\frac{89}{4.21} (21)$	$\frac{595}{12.6} (47)$	$\frac{619}{4.79} (129)$	–	$\frac{1303}{21.6} (60)$
Южная Америка	–	$\frac{988}{16.1} (61)$	$\frac{1243}{1.1} (1130)$	–	$\frac{2231}{17.2} (130)$
Австралия и Океания	–	–	$\frac{711}{3.34} (213)$	$\frac{109}{1.66} (66)$	$\frac{820}{5.0} (164)$
В целом по океаническому водосбору	$\frac{267}{17.3} (15)$	$\frac{2868}{50.4} (57)$	$\frac{5599}{18.0} (311)$	$\frac{5595}{11.9} (470)$	$\frac{14329}{97.6} (147)$

Примечание. В числителе – объем стока наносов (млн. т/год), в знаменателе – площадь сноса (млн. км²), в скобках – модуль стока наносов (т/км² × год).

Северного Ледовитого океана имеют средний модуль стока взвешенных наносов всего лишь около $14 \text{ т/км}^2 \times \text{год}$ при мутности 74 г/м^3 .

Второе место по интенсивности транзитной механической денудации занимает Австралия с Океанией (табл. 2). Однако основную долю при этом вносит не сам материк, а океанические острова. Так, например, на реках Новой Зеландии обычные модули стока $10\text{--}15 \text{ тыс. т/км}^2 \times \text{год}$ (модули жидкого стока при этом равны $100\text{--}150$ и более $\text{л/с} \times \text{км}^2$). Поскольку площади такого интенсивного сноса в целом здесь невелики, то вклад Австралийско-Океанического региона в общую величину стока наносов оказывается очень скромным. Вместе с тем необходимо отметить, что данные по Австралии и Океании у разных исследователей сильно расходятся, что объясняется неодинаковыми подходами к экстраполяции небольших величин стока австралийских рек на острова Океании с их экстремально высоким сносом (таких как на Тайване, в Новой Зеландии, на Гавайях и др.).

Южная Америка стоит на втором месте по объему стока наносов и на третьем месте – по модулю стока. Наблюдается резкое несоответствие в распределении жидкого стока и стока наносов. Водный сток в основном формируется восточнее Анд, в первую очередь в бассейне Амазонки. Но еще сохранившиеся экваториальные леса на Амазонской низменности, выходы прочных пород на Бразильском и Гвианском плоскогорьях не способствуют эрозии, и модуль стока наносов на Атлантическом водосборе равен только $61 \text{ т/км}^2 \times \text{год}$. На тихоокеанском склоне Анд короткие горные реки выносят большое количество материала, даже несмотря на резкое снижение водного стока.

Сходная ситуация наблюдается и в Северной Америке: модуль стока наносов на Тихоокеанском скате почти в 3 раза выше, чем на Атлантическом. Но минимальный сток наносов здесь формируется все же в северной части материка (таежная и тундровая зоны).

Вопреки представлениям Ф. Фурнье [5], согласно которым в Африке располагается едва ли не эрозионный полюс Земли, средняя интенсивность эрозии на этом континенте по нашим данным невелика (табл. 2). Лишь благодаря повышенному сносу в условиях средиземноморского климата на северо-западе и юге материка, а также сильной эрозии на Мадагаскаре средний модуль сноса составляет $61 \text{ т/км}^2 \times \text{год}$. Основная же часть Африки расположена в ареале модулей $20\text{--}40 \text{ т/км}^2 \times \text{год}$. Общая величина стока наносов также незначительна. Преобладание равнинного рельефа, широкое развитие прочных пород и общая засушливость климата – таковы здесь основные причины малой эрозии. Ее низкая интенсивность подтверждается и другими геоморфологическими данными.

Аккумуляция наносов в Мировом океане

В среднем модуль аккумуляции осадков только за счет приноса взвешенного материала составляет $40 \text{ т/км}^2 \times \text{год}$ (табл. 3). Реальная интенсивность аккумуляции значительно больше, так как включает в себя хемо- и биогенную составляющие, эоловый и ледниковый привнос и др.

Таблица 3

Питание океанов стоком наносов рек

Океан	Поступление наносов, млн. т/год	Площадь океана, млн. км ²	Средний модуль аккумуляции наносов, $\text{т/км}^2 \times \text{год}$
Северный Ледовитый	267	13.1	20
Атлантический	2 868	93.4	31
Тихий	5 599	179.7	31
Индийский	5 595	74.9	75
Мировой океан в целом	14 329	361.1	40

Из всех океанов наиболее “заносимым” является Индийский; наименее “заносимый” – Северный Ледовитый – уступает по этому показателю Индийскому океану почти вчетверо. Но по абсолютной величине привноса на первом месте стоит Тихий океан, и только из-за большой площади океана скорость накопления аллювиального материала оказывается меньшей, чем в Индийском океане.

Приток наносов в океан сильно различается по широтным интервалам (рис. 3). В полном соответствии с асим-

метричностью распределения суши между северным и южным полушариями более 80% наносов поступает в океан к северу от экватора. Максимум приноса материала приходится на интервал от 20 до 40° с.ш., где выносятся 56% всего поступающего в океан материала. Умеренные широты дают лишь около 8% мирового транзитного стока наносов. Их значение существенно не возрастает даже при учете того материала, который формируется в умеренном поясе, но в океан поступает через реки, оканчивающиеся в других поясах (таковы, например, реки Миссисипи, Маккензи и др.).

Наиболее эродируемым океаническим водосбором является Индийский, но основная часть водосбора при этом эрозионно малопродуктивна (Восточная Африка, Австралия, Средний Восток). Южные склоны Гималайско-Индокитайской горной системы полностью компенсируют эту малую интенсивность эрозии, и в итоге весь водосбор как по модулям стока наносов, так и по мутности речных вод выходит на первое место. Очень велика также средняя скорость аккумуляции материала в океанической впадине (табл. 3).

Почти столь же значителен сток наносов с Тихоокеанского водосбора, причем более половины его поступает с территории Евразии. Из-за большой площади океана скорость накопления аллювиального материала оказывается в два раза меньшей, чем в Индийском океане (для сравнения площади Индийского и Тихого океанов соотносятся как 1÷2.4).

Атлантический и особенно Северный Ледовитый океаны, окруженные крупнейшими на Земле равнинами, получают суммарно не более 25% общемирового стока наносов (притом, что площадь их водосборов составляет 69% от периферийной части суши, и с нее в Мировой океан стекает 60% водного стока). Средние модули океанической аккумуляции наносов здесь оказываются небольшими.

Уменьшение контрастности рельефа

В среднем за год поверхность суши за счет речного стока наносов понижается на 0.054 мм, а дно океана повышается на 0.025 мм (табл. 4). В результате в глобальном масштабе за счет эрозионно-аккумулятивных процессов происходит уменьшение общей контрастности рельефа Земли. При современной интенсивности транзитной денудации примерно за 12.5 тыс. лет разница между средними высотами материков и средними глубинами океанов уменьшится на 1 м только за счет стока наносов. В этой величине 68% связано с денудацией суши и только 32% – с океанической аккумуляцией. В 2–3 раза быстрее подобный процесс происходит на водосборах Тихого и Индийского океанов.



Рис. 3. Распределение притока взвешенных наносов в береговую зону океана (% от общемирового объема стока; гистограмма) и средняя мутность речных вод (пунктирная линия) по широтным интервалам

Уменьшение контрастности рельефа за счет стока взвешенных наносов

Океан и океанический водосбор	Понижение поверхности водосбора		Повышение дна океана		Общее уменьшение контрастности рельефа	
	мм/год	на 1 м, тыс. лет	мм/год	на 1 м, тыс. лет	мм/год	на 1 м, тыс. лет
Северный Ледовитый	0.006	176.7	0.013	78.5	0.019	53.9
Атлантический	0.022	46.7	0.019	52.1	0.041	24.6
Тихий	0.117	8.5	0.019	51.4	0.136	7.3
Индийский	0.162	6.2	0.047	21.4	0.209	4.5
Земля в целом	0.054	19.4	0.025	40.3	0.079	12.5

Примечание. Плотность эродированных пород суши принята равной 2.65 г/см^3 , аккумулируемых в океанах пород – 1.60 г/см^3 .

В объемном выражении глобальный сток наносов составляет $5.23 \text{ км}^3/\text{год}$ (при средней плотности пород 2.65 т/м^3) и для уменьшения объема земной коры, лежащей выше уровня моря (около 120 млн. км^3), хотя бы на 10% потребуются без учета изостатического поднятия литосферы более 2.4 млн. лет. С объемом океанических впадин (1 340 млн. км^3) величина стока наносов тем более не сопоставима.

Приведенные цифры, конечно же, не следует понимать буквально. Подобно тому, как в пределах суши интенсивность денудации весьма сильно меняется в разных климато-ландшафтных и орографических условиях, и общепланетарная величина снижения суши есть понятие абстрактное, так и аккумуляция осадков во впадинах Мирового океана не происходит равномерным, постоянным по мощности слоем. Наиболее активно осадконакопление идет на шельфе и материковом подножье; по мере же удаления от континентов скорость накопления осадков монотонно снижается (геологические данные свидетельствуют, что во внутренних частях океанических впадин скорость осадконакопления составляет всего лишь 1–2 мм за 1 000 лет, при этом доля терригенного материала может быть незначительной).

Геоэкологическое значение стока взвешенных наносов и мутности речных вод

Трудно переоценить изучение стока взвешенных наносов и мутности речных вод при решении целого ряда геоэкологических задач. Наиболее просто геоэкологическая интерпретация может быть сведена к двум главным проблемам. Во-первых,



Рис. 4. Связь между мутностью речных вод и модулем стока взвешенных наносов (по данным табл. 5) Уравнение регрессии: r – модуль стока взвешенных наносов ($\text{т/км}^2 \times \text{год}$), M – мутность речных вод (г/м^3), R^2 – коэффициент достоверности аппроксимации

и сток наносов, и мутность речных вод отражают интенсивность денудации на поверхности водосбора (хотя для оценки денудации даже в ее транзитной части мутность менее надежна и труднее интерпретируется). Поскольку сток взвешенных наносов определяется на основе значений мутности, то вполне очевидно, что между этими двумя показателями существует довольно тесная корреляционная связь (рис. 4). Но так как объем стока наносов контролируется еще и жидким стоком, а его модуль – площадью водосбора, то коэффициент корреляции между

Мутность стока рек, питающих океанические впадины

Материк с островами	Океанический водосбор				В целом по материку
	Северный Ледовитый	Атлантический	Тихоокеанский	Индийский	
Евразия	$\frac{14}{6.0}$ (74)	$\frac{96}{13.5}$ (226)	$\frac{344}{28.1}$ (389)	$\frac{726}{15.4}$ (1497)	$\frac{249}{14.7}$ (538)
Африка	–	$\frac{43}{7.6}$ (180)	–	$\frac{142}{4.8}$ (939)	$\frac{61}{7.3}$ (265)
Северная Америка	$\frac{21}{7.2}$ (92)	$\frac{47}{10.3}$ (145)	$\frac{129}{18.6}$ (220)	–	$\frac{60}{11.5}$ (166)
Южная Америка	–	$\frac{61}{22.4}$ (86)	$\frac{1130}{12.8}$ (2803)	–	$\frac{130}{21.6}$ (191)
Австралия и Океания	–	–	$\frac{213}{20.1}$ (336)	$\frac{66}{5.0}$ (419)	$\frac{164}{15.0}$ (347)
В целом по океаническому водосбору	$\frac{15}{6.3}$ (76)	$\frac{57}{13.7}$ (132)	$\frac{311}{23.1}$ (427)	$\frac{470}{11.0}$ (1240)	$\frac{147}{13.8}$ (327)

Примечание. В числителе – модуль стока наносов ($\text{т/км}^2 \times \text{год}$), в знаменателе – модуль стока воды ($\text{л/с} \times \text{км}^2$), в скобках – мутность речных вод (г/м^3).

жидким стоком и стоком наносов (в их модульном выражении) редко бывает больше 0.8–0.9.

Во-вторых, величина мутности служит хорошим критерием оценки качества речных вод. В таблице 5 приведены средние величины мутности по тем же географическим подразделениям, которые были использованы при расчетах модулей стока наносов. Максимальная мутность фиксируется в речном стоке с Евразии, причем почти исключительно за счет индоокеанского водосбора (до 1.5 кг/м^3). Однако азиатский (и в целом мировой) максимум наблюдается на р. Хуанхэ. На Хуанхэ и, особенно на ее притоках, не является редкостью мутность в несколько десятков кг/м^3 . Не случайно еще недавно в Китае говорили, что вода Хуанхэ “слишком густая, чтобы ее пить, но недостаточно густая, чтобы ее пахать”. В целом же средняя мутность рек Земли невелика (около 0.3 кг/м^3).

Самую чистую воду со своего водосбора принимает Северный Ледовитый океан. Этот факт труднообъясним с позиций палеогеографических данных. В плейстоцене материковое окружение океана находилось в перигляциальных условиях, сходных с современными ландшафтами тундры и лесотундры. Оно испытывало очень большую денудационную переработку рельефа, что, в частности, отразилось в повсеместном формировании констративного аллювия, т.е. сток наносов превышал транспортирующую способность рек [35]. До сих пор остается непонятным – почему же современный сток наносов не повторяет этот сценарий?

Прогноз изменения мирового стока взвешенных наносов

Расчетные зависимости стока наносов от контролирующих его факторов можно использовать и для прогноза изменения величины стока наносов. Допуская, что природные условия стока (жидкий сток, состав пород, выводимых на поверхность за счет денудации, морфометрические показатели рельефа и т. п.) останутся такими же, как в настоящее время, а изменится только геоэкологическая обстановка, оцениваемая нами

Прогноз стока взвешенных наносов

Материк с островами	Площадь сноса в океан, млн. км ²	Современный сток	Прогноз стока наносов	
			“оптимистический”	“пессимистический”
Евразия	35.5	$\frac{249}{538}$ (8854)	$\frac{192}{415}$ (6800)	$\frac{797}{1721}$ (28 300)
Африка	18.5	$\frac{61}{265}$ (1121)	$\frac{41}{178}$ (758)	$\frac{171}{744}$ (3170)
Северная Америка	21.6	$\frac{60}{166}$ (1303)	$\frac{38}{105}$ (821)	$\frac{159}{439}$ (3430)
Южная Америка	17.2	$\frac{130}{191}$ (2231)	$\frac{94}{138}$ (1620)	$\frac{390}{573}$ (6710)
Австралия с Океанией	5.0	$\frac{164}{347}$ (820)	$\frac{137}{290}$ (685)	$\frac{568}{1202}$ (2840)
Земля в целом	97.6	$\frac{147}{327}$ (14 329)	$\frac{109}{251}$ (10 680)	$\frac{455}{1047}$ (44 450)

Примечание. В числителе – модуль стока наносов (т/км² × год), в знаменателе – мутность речных вод (г/м³), в скобках – объем стока наносов (млн. т/год).

через агрикультурную нагрузку на ландшафты, составлено два прогнозных варианта изменения стока наносов [25].

Первый из них, условно названный “оптимистическим”, составлен в предположении, что оптимизация ландшафтов на водосборах при хозяйственной деятельности будет приближаться по своей противозерозионной эффективности к естественным условиям. Расчеты для всех регионов проведены по уравнениям, установленным для слабоосвоенных бассейнов. Бассейновая эрозия при этом резко сократится, и общий сток наносов с суши не будет превышать 10–11 млрд. т/год при средней годовой мутности рек около 250 г/м³ (табл. 6). Средний модуль стока наносов по сравнению с современным уменьшится примерно на четверть и составит около 110 т/км² × год. Наиболее значительное уменьшение стока можно ожидать в Северной Америке и в Евразии.

Однако полученную минимальную величину стока видимо нельзя считать естественным уровнем транзитного выноса, т.к. построение математической модели велось по бассейнам, в той или иной степени уже подверженным антропогенному воздействию.

В “пессимистическом” варианте допускалось, что все пригодные для ведения сельского хозяйства земли будут освоены, а эффективность противозерозионных мероприятий останется такой же низкой, как сейчас. Расчеты для всех регионов проведены по формулам, выявленным для сильноосвоенных бассейнов.

Сток наносов возрастет до 44 млрд. т/год. Средняя мутность речных вод составит более 1 кг/м³, а модуль стока наносов – 455 т/км² × год, т. е. интенсивность сноса увеличится по сравнению с современным уровнем в 3.2 раза (табл. 6). Основной прирост придется на лесные экваториальные и тропические области Индокитая, Южной Америки, Африки. В умеренном поясе транзитный сток наносов увеличится примерно в 1.5 раза.

Полученную величину стока наносов можно рассматривать как близкую к максимально возможной, поскольку мало вероятно, что вся суша Земли будет сильно освоена и к тому же будет очень неэффективно использоваться.

Заключение

Установленные закономерности изменения величины стока взвешенных наносов рек земного шара в зависимости от контролирующих факторов позволили разработать математико-статистическую модель стока наносов. Сопоставление фактических и расчетных величин стока взвешенных наносов по речным бассейнам показало пригодность предложенных уравнений для их практического применения.

Современный вынос в океан взвешенных наносов со всей суши Земли составляет 14.3 млрд. т/год, или $147 \text{ т/км}^2 \times \text{год}$, при средней мутности речных вод 327 г/м^3 . Пространственное распределение сноса очень неравномерно – от $726 \text{ т/км}^2 \times \text{год}$ ($1\,497 \text{ г/м}^3$) на Азиатском водосборе Индийского океана до $14 \text{ т/км}^2 \times \text{год}$ (74 г/м^3) на Азиатском водосборе Северного Ледовитого океана. Максимум сноса в целом по миру приурочен к интервалу $20\text{--}40^\circ \text{ с.ш.}$ В естественных условиях этот вынос определен не более чем в 10.7 млрд. т/год (антропогенно обусловленное увеличение не менее чем в 1.3 раза). Максимально возможная величина выноса, рассчитанная в предположении полного и столь же нерационального как сейчас землепользования, но при существующих значениях других факторов денудации, не может превысить 44–45 млрд. т/год.

Интенсивность аккумуляции в Мировом океане равняется при этом $40 \text{ т/км}^2 \times \text{год}$ и уменьшение контрастности между средней высотой суши и средней глубиной океана составляет 0.079 мм/год.

Высказываемые иногда предположения о сокращении величины глобального стока наносов не находят подтверждения фактическим материалом. Исключить подобную тенденцию нельзя, и одной из причин возможного сокращения могут служить противоэрозионные мероприятия, проводимые в речных бассейнах. Наиболее существенное снижение может быть обеспечено рационализацией природопользования в бассейнах крупнейших рек мира, отличающихся значительной величиной стока наносов. Например, это достаточно надежно фиксируется по р. Хуанхэ. Другой причиной сокращения является сооружение систем водохранилищ на крупнейших реках, задерживающих сток взвешенных и влекомых наносов внутри континентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панин А.В. Флювиальные процессы и формы рельефа // География, общество, окружающая среда. Т. 1. М.: Городец, 2004. С. 74–107.
2. Панин А.В. Глобальный сток наносов в геологическом прошлом и его антропогенные изменения // Маккавеевские чтения – 2004. М.: Изд-во МГУ, 2005. С. 48–70.
3. Panin A.V. Land-ocean sediment transfer in palaeotimes, and implications for present day natural fluvial fluxes // Sediment Transfer through the Fluvial System. IAHS Publ. 2004. V. 288. P. 115–124.
4. Kuenen P.H. Marine geology. John Wiley & Sons, Chichester, 1950. 568 p.
5. Лопатин Г.В. Наносы рек СССР (образование и перенос). М.: Географгиз, 1952. 366 с.
6. Gilluly J. Geologic contrasts between continents and ocean basins // Geol. Soc. Am. Spec. Pap. 1955. № 62. P. 7–18.
7. Печинов Д. Водная эрозия и твердоток // Природа. 1959. Т. 8. Кн. 1. С. 15–25.
8. Fournier F. Climat et erosion. La relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques. Paris: Press Univ. de France, 1960. 201 p.
9. Schumm S.A. The disparity between present rates of denudation and orogeny // US Geol. Surv. Prof. Pap. 1963. № 454-H. 13 p.
10. Corbel J. L'érosion terrestre, étude quantitative (méthodes, techniques, résultats) // Ann. geogr. 1964. V. 73. № 398. P. 385–412.
11. Mackenzie F.T., Garrels R.M. Chemical mass balance between rivers and oceans // Am. J. Sci. 1966. V. 264. P. 236–251.
12. Judson S. Erosion on the land // Am. J. Sci. 1968. V. 56. P. 356–374.
13. Holean J.N. The sediment yield of major rivers on the World // Water Resour. Res. 1968. V. 4. P. 737–747.
14. Dewey J.F., Bird J.M. Mountain belts and the new global tectonics // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. № 14. P. 45–62.

15. Лисицын А.П. Осадкообразование в океанах. М.: Наука, 1974. 438 с.
16. Walling D.E., Webb B.W. Erosion and sediment yield: a global overview // Erosion and sediment yield: Global and regional perspectives. IAHS Publ. 1996. 236. P. 5–23.
17. Алексеев В.В., Лисицына К.Н. Сток взвешенных наносов // Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. Л.: Гидрометеониздат, 1974. С. 510–516.
18. Сафьянов Г.А. Береговая зона океана в XX веке. М.: Мысль, 1978. 264 с.
19. Jansen J.M.L., Painter R.B. Predicting sediment yield from climate and topography // J. Hydrol. 1974. V. 21. № 4. P. 371–380.
20. Львович М.И. Мировые водные ресурсы и их будущее. М.: Мысль, 1974. 448 с.
21. Страхов Н.М. Основы теории литогенеза. 2-е изд. М.: Изд-во АН СССР, 1962. Т. 1. 212 с.
22. Гордеев В.В. Речной сток и его химические характеристики. М.: Наука, 1983. 124 с.
23. Walling D.E., Webb B.W. Patterns of sediment yield // Background to palaeohydrology. John Wiley & Sons, Chichester, 1983. P. 69–100.
24. Milliman J.D., Meade R.H. World-wide delivery of river sediments to the oceans // J. Geol. 1983. V. 91. P. 1–21.
25. Meybeck M. How to establish and use world budgets of riverine materials // Physical and Chemical Weathering in Geochemical Cycles. Kluwer, Dordrecht. 1988. 247–272 p.
26. Лисицын А.П. Процессы терригенной седиментации в морях и океанах. М.: Наука, 1991. 234 с.
27. Львович М.И., Карасик Г.Я., Братцева Н.Л. и др. Современная интенсивность внутриконтинентальной эрозии суши земного шара. М.: Междувед. геофиз. ком., 1991. 336 с.
28. Мозжерин В.И. Современный глобальный сток взвешенных наносов и прогноз его изменения // Пробл. эрозионных, русловых и устьевых процессов. Ижевск: 1992. С. 63–65.
29. McLennan S.M. Weathering and global denudation // J. Geol. 1993. № 101. P. 295–303.
30. Ludwig W., Probst J.-L. River sediment discharge to the oceans: present-day controls and global budgets // Am. J. Sci. 1998. V. 298. P. 265–295.
31. Дедков А.П., Мозжерин В.И. Глобальный сток наносов в океан: природная и антропогенная составляющая // Эрозионные и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 2000. Вып. 3. С. 15–23.
32. Harrison C.G.A. What factors control mechanical erosion rates? // Int. J. Earth Sci. 2000. V. 88. P. 752–763.
33. Дедков А.П., Мозжерин В.И., Мартыанова М.В. Сток наносов как функция площади бассейнов и стока воды // Тр. Акад. водохозяйств. наук. Русловедение и гидроэкология. 2001. Вып. 7. С. 79–89.
34. Миллиман Дж.Д. Речные наносы в прибрежных акваториях: поступление, дальнейшее перемещение и распределение // Природа и ресурсы. 1991. Т. 27. № 1–2. С. 12–22.
35. Дедков А.П., Гусаров А.В., Мозжерин В.В. Две системы эрозии в речных бассейнах равнин Земли и их взаимная трансформация (часть II) // Геоморфология. 2008. № 4. С. 17–28.

Казанский госуниверситет

Поступила в редакцию
06.03.2010

GLOBAL SUSPENDED SEDIMENT YIELD: ITS GEOMORPHOLOGICAL AND GEOECOLOGICAL INTERPRETATION

V.I. MOSZHERIN, V.V. MOSZHERIN

Summary

The present-day suspended sediment yield into the Ocean is estimated at $14.3 \cdot 10^9$ t/year or 147 t/km² · year, which consists 1.3 times of its natural value. Average river water turbidity amounts to 327 g/m³. The maximum of suspended sediment yield sites in the Southeast of Asia; the minimum – in the plains of Eurasia and North America adjoining the Arctic Ocean. Oceanic sediment accumulation equals to 40 t/km² · year. Decrease of land height averages 1 m in $19\,400$ years and rise of oceanic bottom – 1 m in $40\,300$ years. The greatest possible value of suspended sediment yield may reach $44\text{--}45 \cdot 10^9$ t/year under the condition of complete agricultural land conversion.