

УДК 556.535.6(571.6)

## ОЦЕНКА ГОДОВОГО СТОКА ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ РЕК СЕВЕРА СИБИРИ И ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

© 2014 г. Н. И. Тананаев

*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Игарка**e-mail: nikita.tananaev@gmail.com*

Поступила в редакцию 27.12.2012 г.

В работе приведена оценка стока взвешенных наносов средних и крупных рек криолитозоны Сибири и Дальнего Востока за период инструментальных наблюдений. Рассмотрена методика расчета, учитывающая внутригодовую неравномерность речного стока, сделано ее гидрологическое обоснование. Выполнено сопоставление полученных оценок с результатами предыдущих исследований. Показана роль геологической истории и истории гляциации территории в современных значениях выноса материала реками. Высказано предположение о преобладании долинной (береговой, склоновой) генерации взвешенных наносов над бассейновой на территории криолитозоны России.

DOI: 10.7868/S0030157414040121

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Современные климатические изменения, наиболее заметные в приполярных областях мира, в настоящее время привлекают повышенное внимание к исследованиям арктических регионов [1, 19, 40]. Климатические и гидрологические условия современности оказывают воздействие на интенсивность процессов тепломассообмена в мерзлотных ландшафтах, в том числе эрозионных процессов [9, 20, 30]. Направленные изменения стока взвешенных наносов могут оцениваться путем сопоставления его базовых значений с прогнозными величинами, полученными на основе модельных расчетов, или с результатами наблюдений. Такие оценки в настоящее время затруднены слабой гидрологической изученностью региона, небольшой продолжительностью рядов наблюдений, методическими сложностями.

Начало географическим исследованиям стока взвешенных наносов рек Сибири в Советском Союзе положили работы Шамова [26] и Лопатина [12]. По Г.И. Шамову, реки бассейнов морей Лаптевых и Восточно-Сибирского относятся к районам, где средняя мутность речных вод не превышает  $50 \text{ г/м}^3$  (за исключением верховьев Колымы, где она варьирует в пределах  $50\text{--}150 \text{ г/м}^3$ ). Столь малые величины мутности связываются этими авторами с низкой активностью эрозионных процессов в условиях повсеместного распространения многолетнемерзлых пород. Однако в то время материалы сетевых наблюдений были недостаточны для оценки многолетних значений этой характеристики. В обобщающей монографии Чистякова [25] приведены фрагментарные сведения о значениях мутности и стока взвешенных нано-

сов рек ЯАССР на постах, удаленных от замыкающих створов. Мутность большинства рек, по этим данным, равномерно увеличивается с запада на восток от  $100 \text{ г/м}^3$  в Центральной Якутии до  $250\text{--}270 \text{ г/м}^3$  в бассейне Яны и Индигирки. Среднегодовой расход взвешенных наносов малых и средних рек региона колеблется от 2 до 10 кг/с, крупных – от 25 до 60 кг/с [18].

В работах последних десятилетий суммированы преимущественно оценки стока взвешенных наносов крупнейших рек бассейна Северного Ледовитого океана [5, 24, 31–33]. Основанные как на материалах наблюдений, так и на модельных расчетах, данные в замыкающих створах полизонных рек весьма обобщенно характеризуют огромные водосборные площади Сибири и Дальнего Востока. За рамками в большинстве работ остается описание исходных материалов и методов, а сами оценки выполнены преимущественно для замыкающих створов. Это затрудняет обоснование базовых величин стока взвешенных наносов на суб-бассейновом уровне, безусловно востребованных в исследованиях отклика природных систем на климатическую динамику и антропогенное воздействие [34, 42]. Перспективность этого подхода связана с потенциалом математического моделирования процессов формирования стока взвешенных наносов. Исходными данными для работы таких моделей может служить выход глобальных климатических моделей – подход, широко применяющийся в настоящее время в долгосрочных прогнозах водного стока и отдельных элементов водного баланса [5].

Определение среднегодового стока взвешенных наносов исследуемых рек с применением расчетной методики, учитывающей характери-

**Таблица 1.** Сток взвешенных наносов крупнейших рек Северной Евразии в замыкающих створах, млн. т (по [33] с дополнениями автора)

Авторы	р. Енисей—г. Игарка	р. Лена—с. Кюсюр	р. Колыма—с. Колымское
Шамов [26]	10.5	7.7	—
Лопатин [12]	11.0	11.7	4.7
Самойлов [17]	11.0	12.0	4.7
Доронина [7]	—	11.8	—
Лисицын [10]	13.2	15.4	6.0
Лисицына [11]	13.2	26.1	6.8
Milliman, Meade [38]	13.2	12.0	6.0
Telang et al. [43]	14.5	11.7	—
Milliman, Syvitski [39]	13.2	12.0	—
Alabyan et al. [27]	—	21.0	—
Водные пути... [4]	—	27.4	—
Ivanov, Piskun [35]	—	16.7 – 19.4	—
Gordeev et al. [31]	5.9	17.6	16.1
Rachold et al. [41]	—	21.0	—
Михайлов [15]	13.0/4.9*	20.4	—
Walker [44]	13.0	21.0	8.2
Ivanov, Piskun [36]	—	16.3	10.1
Чалов и др. [23]	13.0	22.7	—
Магрицкий [13]	—	19.8	6.3–12.0
Holmes et al. [33]	4.7	20.7	10.1
Hasholt et al. [32]	5.6	—	—
Гидроэкологическое... [5]	12.0/4.5*	21.2	9.94

\* Для р. Енисей в числителе показано значение годового стока взвешенных наносов незарегулированного периода (до 1966 г.), в знаменателе — после 1966 г.

стики их водного режима, стало основной целью настоящей работы. Для этого выполнено гидрологическое обоснование предлагаемой методики, собраны и проанализированы наиболее продолжительные ряды опубликованных данных о расходах воды и взвешенных наносов. Полученные результаты сопоставлены с ранее опубликованными для оценки адекватности использованной методики. В работе использованы материалы по 22 гидрологическим постам на 13 средних и крупных реках региона (бассейны Северного Ледовитого и Тихого океана). Геолого-географическая интерпретация полученных результатов приведена для отдельных бассейнов, однако она сделана лишь предварительной и в задачи данной работы не входила.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

По современным оценкам, лишь 56–63% суммарного объема стока в Северный Ледовитый океан является наблюдаемой величиной, остальные значения получены различного рода эмпирическими методами, в том числе с применением математических моделей [32]. Для рек российской ча-

сти водосбора Северного Ледовитого океана основными материалами для оценок являются данные о расходах и мутности воды, опубликованные в различных изданиях Государственного водного кадастра. Межгодовая изменчивость потока наносов и, чаще, недокументированные расхождения в расчетных методиках, приводят к несовпадению результатов расчетов, различающихся более чем в 2 раза (табл. 1). Обращают на себя внимание более низкие величины стока взвешенных наносов, полученные в самых ранних исследованиях (до середины 1970-х гг.). Климатической причиной пониженного стока наносов этого периода можно считать отрицательные аномалии индекса Северо-Атлантического колебания в период с конца 1950-х до начала 1970-х годов, с которыми на территории Восточной Сибири связаны холодные зимы с малым количеством атмосферных осадков.

В настоящей работе расчет стока взвешенных наносов выполнен с использованием предложенного Маккавеевым [14] соотношения:

$$R = AQ^m, \quad (1)$$

**Таблица 2.** Значения коэффициентов уравнения (1) для исследованных рек

№ п.п.	Река	Пост	$A$	$m$
Бассейн Карского моря				
1	Сев. Сосьва	Сосьва (Культбаза)	0.0007	1.456
2	Пур	Самбург	0.0011	1.379
Бассейн моря Лаптевых к западу от устья Лены				
3	Анабар	Саскылах	0.0008	1.470
4	Оленек	Сухана	0.00000004	2.567
5	Оленек	7.5 км выше устья р. Буур	0.0001	1.648
Бассейн р. Лены				
6	Лена	Табага	0.0000002	2.260
7	Лена	Кюсюр	0.0000007	2.051
8	Алдан	Охотский перевоз	0.00000005	2.405
9	Алдан	Верхоянский перевоз	0.0000003	2.201
Бассейн моря Лаптевых к востоку от устья Лены				
10	Яна	Верхоянск	0.00033	2.014
11	Яна	Джангкы	0.0000174	2.130
12	Адыча	Ойюн-Хомото	0.00000008	2.936
Бассейн Восточно-Сибирского моря				
13	Индиگیرка	Юрты	0.000003	2.459
14	Индиگیرка	Индиگیرский (Усть-Нера)	0.000000011	3.156
15	Индиگیرка	Воронцово	0.000057	1.970
16	Нера	Ала-Чубук	0.000018	2.379
17	Колыма	Дусканья	0.000054	2.094
18	Колыма	Усть-Среднекан	0.00000005	2.786
19	Колыма	Среднеколымск	0.000007	2.057
20	Аян-Юрях	Эмтегей	0.0000018	2.784
Бассейн Тихого океана				
21	Анадырь	Новый Еропол	0.000000002	3.102
22	Анадырь	совхоз "Снежное"	0.0000027	2.175

в котором  $R$  – расход взвешенных наносов, кг/с,  $Q$  – расход воды, м<sup>3</sup>/с;  $A$  и  $m$  – эмпирические коэффициенты. Связи среднемесячных и среднегодовых величин расхода воды и наносов, аналогичные уравнению (1), используются для расчетов в работах [5, 13]. Эмпирические коэффициенты имеют выраженный региональный характер, что позволяет использовать их в расчетах стока взвешенных наносов с водосборов, для которых доступны только гидрологические данные, а также, в первом приближении – для неизученных водосборов. Коэффициенты в этом случае определяются по данным о физико-географических характеристиках водосборов (средняя высота, количество осадков).

В данной работе для определения годового стока взвешенных наносов на выбранных постах

были использованы значения  $A$  и  $m$ , характеризующие связь вида (1) для многолетнего ряда измеренных (моментальных) расходов воды и взвешенных наносов (табл. 2). Источником информации послужили издания Государственного Водного кадастра, период наблюдений на постах ограничен временным промежутком с 1958 по 1981 гг. Количество точек, сформировавших  $R(Q)$ -связи, не менее 40, для 13 из 22 постов оно больше 100, для 6 – превышает 200, коэффициент аппроксимации связей  $R^2$  – не хуже  $0.80 \pm 0.05$ . Для повышения значимости связей из массива данных были исключены точки, соответствующие наблюдениям в период ледостава (с минимальными расходами воды и наносов).

Дискуссионным вопросом является использование в уравнении (1) величин расхода наносов  $R$ .

Для расчета  $R$  используются значения расхода и мутности воды, следовательно, расход воды в (1) не только является зависимой переменной, но и в неявном виде входит в независимую переменную, что может приводить к эффекту “ложной корреляции”. Здесь следует отметить, что регрессионные связи характеристик стока воды и наносов и без того страдают обычно малой статистической значимостью. Повышение последней, хотя бы и искусственное, смогло бы повысить точность расчетных методик, опирающихся на такие связи. Кроме того, анализ статистических параметров регрессий, построенных по величинам мутности и расхода наносов относительно расхода воды, показывает с достаточной точностью идентичные дисперсии таких регрессий [37], что исключает эффект “ложной корреляции” в таких расчетах.

Применимость полученных коэффициентов  $A$  и  $m$  в целом ограничивается регрессионными расчетами для измеренных расходов воды. Вопрос о том, насколько полученные зависимости применимы для подстановки в них величин расходов, осредненных за иные промежутки времени, на теоретическом уровне остается нерешенным. В работах [28–29, 45] обсуждается возникновение погрешностей использования связей вида (1), связанных с недоучетом внутригодовой неравномерности стока воды. Детально рассмотрены ошибки, возникающие при использовании связей, построенных для средних за продолжительный период (месяц, год) величин  $R$  и  $Q$ .

Для учета внутригодовой неравномерности стока воды расчет был выполнен по уравнению (1) отдельно для средних расходов половодья, паводочного периода и летне-осенней межени с учетом их продолжительности (табл. 3). Используемый подход представляет собой некоторое упрощение, поскольку существует различие между значениями коэффициентов уравнения (1), определенными для разных фаз водного режима (подъемы и спады половодий и паводков), причем для разных паводков эти значения также могут быть различны. Однако не на всех постах освещенность данными всех стадий прохождения половодий и паводков одинакова, что вынуждает пользоваться менее дробным делением года. Тем не менее, даже в таком приближении учет внутригодовой изменчивости речного стока приводит к значительному повышению точности расчетов относительно методов, использующих годовые осреднения [14].

Характеристики отдельных фаз водного режима на гидрологических постах (г.п.) извлечены из изданий ГВК. Период осреднения – с начала наблюдений (в среднем 1950–1960 гг.) по 1985 г., т.е. соответствует периоду, для которого имеются данные о стоке взвешенных наносов. Средние расходы за половодье и паводки рассчитаны по

данным об их продолжительности и объеме стока (табл. 3). Средний расход летне-осенней межени определен как средний за многолетний период наименьший расход в период открытого русла. Такое допущение основано на приблизительном соответствии среднего наименьшего расхода величине среднемноголетнего расхода, с учетом относительно небольшой амплитуды изменения расходов в течение летней межени. Продолжительность летне-осенней межени определялась вычитанием из 365 дней года продолжительности половодья, паводков и зимней межени; последняя в свою очередь принималась равной продолжительности ледостава (без фаз ледохода).

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Крупные реки российской Арктики в целом характеризуются невысокими значениями мутности воды и стока взвешенных наносов, что иллюстрируется и результатами настоящего исследования (табл. 4). Для большей части региона это традиционно объясняется низкой эрозионной активностью при повсеместном распространении многолетнемерзлых грунтов [14]. Их же наличием, впрочем, зачастую объясняется и резкое увеличение количества переносимых потоком взвесей, связанное с активным развитием криогенных рельефообразующих процессов [22]. Мерзлотные факторы в целом являются довольно специфическими модификаторами эрозионной деятельности водных потоков криолитозоны. Роль их в формировании и пространственно-временной динамике стока наносов до настоящего времени остается практически неисследованной.

К западу от устья Лены пониженный сток наносов обусловлен характером рельефа и ландшафтными условиями. На территории севера Западной Сибири, с более мягкими мерзлотными условиями, ограничивающим фактором водной эрозии является значительная залесенность и заболоченность территории [5]. Горный характер водосборов запада Якутии (плато Путорана и Среднесибирское плоскогорье), связанное с ним широкое распространение полугорных и врезанных участков русел, также ограничивают количество материала бассейнового происхождения, поступающего в гидрографическую сеть региона. Это проявляется в заметном снижении модуля стока взвешенных наносов, особенно в верховьях Оленька (до 1–2 т/год км<sup>2</sup>). Средняя мутность половодья к западу от бассейна Лены не превышает 30 г/м<sup>3</sup>, паводочного периода – не выше 20 г/м<sup>3</sup>, летне-осенней межени – 10 г/м<sup>3</sup>.

Сток взвешенных наносов крупнейшей реки бассейна моря Лаптевых Лены в замыкающем створе (г.п. Кюсюр, 150 км выше вершины дельты) составляет 20.7 млн. т, что близко к оценкам,

Таблица 3. Характеристики отдельных фаз водного режима исследованных рек

Река	Пост	Половодье		Паводочный период		Летне-осенняя межень	
		W, км <sup>3</sup>	T, дни	W, км <sup>3</sup>	T, дни	W, км <sup>3</sup>	T, дни
Бассейн Карского моря							
Сев. Сосьва	Сосьва (Культбаза)	12.3	91	2.24	31	1.77	70
Пур	Самбург	16	81	—	—	3.14	50
Бассейн моря Лаптевых к западу от устья Лены							
Анабар	Саскылах	10.1	48	1.5	18	0.46	56
Оленек	Сухана	14.2	53	2.66	21	1.19	61
Оленек	7.5 км ниже устья р. Буур	23.6	53	2.97	21	1.73	51
Бассейн Лены							
Лена	Табага	112	74	27.8	20	37.2	72
Лена	Кюсюр	306	75	53.5	21	67.2	46
Алдан	Охотский Перевоз	65.4	59	16.05	20	20.5	84
Алдан	Верхоянский Перевоз	81.6	61	19.1	16	26.0	81
Бассейн моря Лаптевых к востоку от устья Лены							
Яна	Верхоянск	1.99	52	1.05	16	0.49	67
Яна	Джангкы	14.9	53	5.37	16	2.92	71
Адыча	Ойун-Хомото	4.85	50	1.6	13	0.94	67
Бассейн Восточно-Сибирского моря							
Индиگیرка	Юрты	2.15	47	1.33	14	1.30	81
Индиگیرка	Индиگیرский (Усть-Нера)	4.85	49	2.26	14	1.70	82
Индиگیرка	Воронцово	23.4	54	8.85	19	5.76	57
Нера	Ала-Чубук	1.54	45	0.56	13	0.35	87
Колыма	Дусканья	4.46	38	1.60	14	1.54	102
Колыма	Усть-Среднекан	9.94	39	3.38	16	3.29	91
Колыма	Среднеколымск	36.8	50	10.1	22	9.76	67
Аян-Юрях	Эмтегей	0.83	35	0.24	10	0.34	112
Бассейн Тихого океана							
Анадырь	Новый Еропол	9.46	42	1.23	12	1.83	92
Анадырь	совхоз "Снежное"	21.4	61	3.60	21	2.39	49

приведенным в [5, 27, 33, 41, 44] (табл. 1). Следует, следовательно, принять диапазон 20.4–21 млн. т в качестве наиболее достоверного интервала его базового значения. В среднем течении Лены (г.п. Табага, в 40 км выше Якутска) сток взвешенных наносов оценен в 9.93 млн. т, что совпадает с результатами [6] и несколько больше известных оценок 8.66 млн. т [4, 23–24] и 7.7 млн. т [32]. Из крупных притоков Лены сток взвешенных наносов рассчитан лишь для двух постов среднего и нижнего течения Алдана. На реках Витим и Олёкма мутность на регулярной сети Гидрометеослужбы не наблюдалась, а ряды измеренных расходов воды и взвешенных наносов р. Вилюй неоднородны в связи с введением в эксплуатацию Вилюйских ГЭС. Алдан, несмотря на сопоставимую со средней Леной водоносность, выносит в свое устье около

3.5 млн. т взвешенных наносов. Небольшие величины стока взвешенных наносов (в единицах слоя — не больше 5 т/год км<sup>2</sup>, тогда как у средней Лены свыше 8 т/год км<sup>2</sup>) связаны с особенностями геологического строения горной части его водосбора. Мутность крупнейших рек Центральной Якутии также уменьшается в течение года — с 50 до 30 г/м<sup>3</sup> на Лене и с 30 до 25 г/м<sup>3</sup> на Алдане.

Реки бассейна морей Лаптевых и Восточно-Сибирского к востоку от устья Лены отличаются от западных рек повышенным стоком взвешенных наносов при сопоставимых расходах воды, особенно в своих нижних течениях. Это отражается в значениях модулей стока, превышающих 15 т/год км<sup>2</sup> (Яна, Колыма), а в нижнем течении Индиگیرки — 25 т/год км<sup>2</sup>. Однако территория

Таблица 4. Сток взвешенных наносов средних и крупных рек севера Сибири и Северо-Востока России

Река	Пост	Половодье		Паводочный период		Летне-осенняя межень		$W_{R\text{СУММ}},$ МЛН. Т	$M_{R\text{СУММ}},$ Т · ГОД/КМ <sup>2</sup>
		$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$W_R, \text{ МЛН. Т}$	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$W_R, \text{ МЛН. Т}$	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$W_R, \text{ МЛН. Т}$		
Бассейн Карского моря									
Сев. Сосьва	Сосьва (Культбаза)	1560	0.245	836	0.034	293	0.017	0.30	4.60
Пур	Самбург	2290	0.331	—	—	728	0.042	0.37	3.89
Бассейн моря Лаптевых к западу от устья Лены									
Анабар	Саскылах	2440	0.317	965	0.030	94.2	0.003	0.35	4.44
Оленек	Сухана	3100	0.168	1470	0.010	226	0.000	0.18	1.42
Оленек	7.5 км ниже устья р. Буур	5150	0.600	1640	0.036	393	0.008	0.64	3.54
Бассейн Лены									
Лена	Табага	22100	8.39	16100	1.109	5980	0.426	9.93	11.06
Лена	Кюсюр	47200	17.53	29500	1.872	16900	1.308	20.71	8.52
Алдан	Охотский Перевоз	12800	1.92	9290	0.300	2820	0.072	2.29	4.45
Алдан	Верхоянский Перевоз	15500	2.64	13800	0.573	3710	0.151	3.37	4.84
Бассейн моря Лаптевых к востоку от устья Лены									
Яна	Верхоянск	443	0.317	760	0.290	84.7	0.015	0.62	13.73
Яна	Джангкы	3250	2.40	3880	1.057	476	0.054	3.51	16.25
Адыча	Ойун-Хомото	1120	0.309	1420	0.161	162	0.001	0.47	7.19
Бассейн Восточно-Сибирского моря									
Индиgirка	Юрты	529	0.061	1100	0.109	186	0.008	0.18	3.48
Индиgirка	Индиgirский (Усть-Нера)	1150	0.213	1870	0.282	240	0.003	0.50	5.96
Индиgirка	Воронцово	5020	5.454	5390	2.208	1170	0.327	7.99	26.19
Нера	Ала-Чубук	396	0.106	497	0.052	46.2	0.001	0.16	7.13
Колыма	Дусканья	1360	0.645	1420	0.260	175	0.024	0.93	18.54
Колыма	Усть-Среднекан	2950	0.781	2440	0.189	419	0.008	0.98	9.84
Колыма	Среднеколымск	8520	3.684	5300	0.610	1660	0.171	4.47	12.37
Аян-Юрях	Эмтегей	277	0.034	277	0.010	34.7	0.0003	0.04	4.63
Бассейн Тихого океана									
Анадырь	Новый Еропол	2610	0.288	1190	0.007	230	0.0003	0.30	6.24
Анадырь	совхоз "Снежное"	4060	1.010	1990	0.074	564	0.011	1.10	10.33

Верхояно-Колымской горной страны также неоднородна по своим геологическим и гидроклиматическим условиям, и, следовательно, величинам стока наносов. Так, при значительно меньшей водоносности верхней Яны сток взвешенных наносов здесь превышает таковой ее крупного притока Адычи. Это связано с широким распространением в бассейне Яны выше Верхоянска легкоразмываемых лагунно-морских отложений триас-юрского периода [21]. В целом для рек Восточной Якутии характерно увеличение мутности в течение года, связанное со значительной ролью криогенных рельефообразующих процессов в формировании стока наносов.

В среднем течении (г.п. Джангкы) Яна переносит в год более 3.5 млн. т наносов, что совпадает с оценкой, приведенной в [16]. Сток наносов Индиgirки в замыкающем створе (г.п. Воронцово) оценивается около 8 млн. т, что заметно меньше некоторых оценок (11.1 млн. т [33], 11.7 млн. т [5], 12.0 млн. т [32], 12.9 млн. т [31]), но больше, чем в [16] – 6.2 млн. т. Резкое увеличение модуля стока взвешенных наносов реки при выходе на обширную Приморскую низменность (с 6 до 26 т/год км<sup>2</sup>) связано с активными русловыми переформированиями и размывом берегов [22]. В русло при этом начинают поступать легкоразмываемые отложения прибрежно-морского, озерно-болотного и ал-

лювиального генезиса (средне- и верхнечетвертичного возраста), имеющие преимущественно массивную криогенную текстуру и подверженные криогенной деструкции [8]. Отмечено влияние горнодобывающих работ на увеличение стока взвешенных наносов региона [2]. Современные (после ликвидации горной промышленности) объемы стока наносов оценить затруднительно в связи с отсутствием материалов наблюдений.

Для проверки качества расчетных величин выполнен статистический анализ регрессионной модели, использованной в расчете по замыкающему створу р. Индигирки. В целом регрессия имеет высокую степень достоверности: коэффициент корреляции статистически значим на уровне 1% ( $t$ -статистика Стьюдента при  $n = 179$ ), его значение  $r = 0.93 \pm 0.04$ , коэффициент детерминации также статистически значим ( $F$ -статистика), остаточная дисперсия регрессии равна 0.14, т.е. является малой величиной. Анализ графиков  $R(Q)$ -связи для отдельных лет наблюдений и единичных событий показывает, что в целом для периода наблюдений значения коэффициентов  $A$  и  $m$  в (1) определены адекватно. Расчетные значения среднесуточных величин расхода взвешенных наносов (в пределах 1100–1500 кг/с) для половодья и паводочного периода хорошо согласуются с фактически наблюдаемыми. Оценка годового стока взвешенных наносов р. Индигирки в створе г.п. Воронцово в 7.99 млн. т, полученная в данной работе, имеет, следовательно, высокую степень статистической достоверности.

Бассейн р. Колымы характеризуется заметной промышленной освоенностью, развитой гидроэнергетикой. Модуль стока взвешенных наносов выше створа Колымской ГЭС в период наблюдений был велик в связи с развитой золотодобычей; в настоящее время район г.п. Дусканья находится в зоне переменного подпора водохранилища. Слабая освоенность территории и ее возвышенный характер, впадение большого количества горных притоков с малой мутностью, обуславливают двукратное снижение модуля стока взвешенных наносов на участке Дусканья–Усть-Среднекан (до строительства Колымской ГЭС). В настоящее время, в связи с состоявшимся перекрытием р. Колымы в створе строящейся Усть-Среднеканской ГЭС возрастает протяженность участка реки с антропогенно измененным гидрологическим режимом. Перекрытие створа ГЭС окажет влияние на сток наносов Колымы в среднем течении (г.п. Среднеколымск), где до начала гидростроительства в бассейне реки сток взвешенных наносов составлял около 4.5 млн. т.

Реки бассейна Тихого океана, представленные в выборке Анадырем, по характеристикам стока взвешенных наносов схожи с реками западной части рассматриваемой территории [3]. Для климата

бассейна реки характерны черты влияния морских воздушных масс, сглаживающих его континентальность. Основной сток наносов Анадыря формируется в нижнем течении, где река выходит в пределы Анадырской низменности (табл. 4).

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Сток взвешенных наносов, имеющий преимущественно бассейновое происхождение, традиционно принято соотносить с интенсивностью эрозионных процессов в пределах речных водосборов. При этом подразумевается, что количественно современный сток наносов соответствует активности современных же природных факторов, обуславливающих его формирование. Анализ полученных результатов показывает, что на Северо-Востоке Евразии современный сток взвешенных наносов в значительной степени определяется геологической историей территории, т.е. является по сути азональной величиной. Различия в процессах рельефообразования, характерных для западного и восточного субрегионов исследуемой территории, в наибольшей степени обуславливают современные темпы формирования и выноса взвешенного материала. Последние, выраженные модулем стока взвешенных наносов  $M_R$  (т/год км<sup>2</sup>), минимальны в западной части исследованного региона (к западу от водораздела Верхоянского хребта). К востоку от водораздела значения  $M_R$  увеличиваются, достигая максимальных в районе Приморской низменности (рисунок).

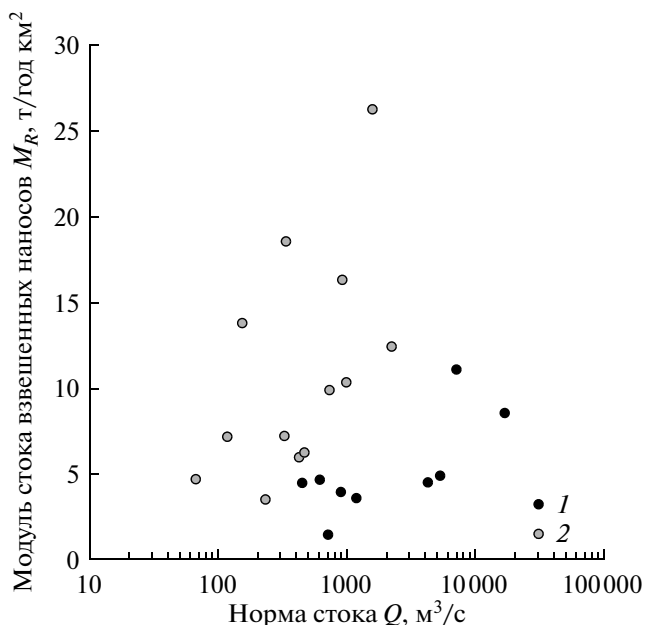
В геологическом отношении западный субрегион относится к относительно стабильным участкам. К возвышенным областям его относится выход на поверхность архей-протерозойского кристаллического фундамента (Анабарский щит); равнинные области к западу от бассейна Енисея сложены отложениями палеогена и несут следы позднейших трансгрессионно-регрессионных перемещений уровня моря. К Верхоянскому хребту прилегает Вилуйская синеклиза, в геологическом строении которой основную роль играют меловые песчаники. В целом регион характеризуется малыми градиентами высот, в крайне западной части — сильной заболоченностью, в восточной части — недостаточным увлажнением.

В отличие от западного, восточный субрегион весьма тектонически динамичен и характеризуется богатой геологической историей. Формирование современных черт его рельефа в целом завершилось только в позднечетвертичное время. Активный орогенез продолжался до конца казанцевского межледникового (МИС 5), в дальнейшем поверхность Верхояно-Колымской горной страны и Охотско-Колымского водораздела подвергалась гляциальной переработке вплоть до конца сартанского криохрона (МИС 2). Об-

ширные аккумулятивные поверхности Приморских низменностей также завершили свое формирование только к началу голоцена [3].

Следует констатировать, что в пределах исследованного региона современная интенсивность выноса взвешенного материала приурочена к наиболее динамичным областям Северо-Востока России (рисунок). При этом роль эрозионных процессов на водосборах не может считаться ведущей в формировании стока наносов по причине их малой интенсивности. Горный характер местности, исключительно низкие температуры воздуха на протяжении большей части года, ограниченные темпы почвообразования и малая мощность почвенного покрова — все это не позволяет рассматривать традиционные составляющие стока взвешенных наносов, склоновую и овражную эрозию, в качестве ведущих процессов его формирования к востоку от водораздела Верхоянского хребта. В этих условиях оно должно быть связано с областями наиболее интенсивного флювиального морфогенеза, в которых водные потоки имеют наибольшую энергию, т.е. с речными долинами. Ведущими эрозионными процессами, формирующими современный сток взвешенных наносов рек восточного субрегиона, являются процессы, поставляющие эродированный материал непосредственно в речные потоки, в первую очередь, береговые и осыпные процессы.

Береговые процессы в наибольшей степени важны для рек, пересекающих аккумулятивные Приморские низменности. Поступление взвешенного материала с водосборов ограничено здесь их сильной заозеренностью и отсутствием заметных перепадов высот. Берега рек, сложенные высокольдистыми тонкодисперсными отложениями спокойных обстановок осадконакопления, активно разрушаются под воздействием термоэрозии. Повсеместное распространение полигональных ландшафтов приводит к преимущественному обрушению береговых блоков при деградации полигонально-жильных льдов. Интенсивное разрушение берегов характерно и для рек, текущих в узких долинах горной части территории. Однако вследствие частого контакта речных потоков с коренными берегами существенную роль здесь начинают играть осыпные процессы, поставляющие материал непосредственно в русла рек, причем коллювий часто представлен моренным материалом, образованным горными оледенениями позднечетвертичного периода. Разрушение коллювиального материала происходит как истиранием при движении, так и под воздействием морозного выветривания (поскольку большинство рек региона полностью перемерзает в зимний период), а также химического разрушения. Велика также роль гидрологического режима; многочисленные дождевые паводки, по пиковым расходам воды нередко превышающие полово-



Связь современных темпов выноса взвешенного материала с гидрологическими условиями в различных геолого-геоморфологических обстановках: 1 — к западу и 2 — к востоку от водораздела Верхоянского хребта (по материалам табл. 4).

дье, существенно активизируют размыв берегов. Рассмотренные механизмы образования взвешенного материала оказываются достаточно эффективными, чтобы обеспечить относительно высокие значения стока взвешенных наносов.

Продолжая региональный анализ с позиции, изложенной выше, можно прийти к выводу, что роль процессов, происходящих в пределах речных долин, значительна и в формировании стока взвешенных наносов рек к западу от водораздела Верхоянского хребта. Высокие значения модуля стока взвешенных наносов характерны только для рек с широкопойменными руслами, интенсивно размывающих свои берега (Северная Сосьва, Пур, нижнее течение Анабара и Оленька, средняя Лена). Однако при малых уклонах и скоростях течения, характерных для крупных равнинных рек, интенсивность этого процесса также ограничена; ее еще больше ограничивают оторфованность берегов, а также особенности водного режима. На реках с восточно-сибирским типом водного режима размыв берегов происходит только в период половодья, а также одного-двух крупных паводков; на реках севера Западно-Сибирской равнины (Пур, Таз) дождевые паводки формируются редко, поскольку большинство выпадающих осадков может задерживаться в понижениях болотистой тундры. Высокое значение стока взвешенных наносов средней Лены можно связать как с масштабным эффектом (площадь водосбора реки выше г.п. Табага составляет почти 900 тыс. км<sup>2</sup>), так и с активным размы-

вом пойменных берегов при выходе реки на Центрально-Якутскую низменность.

Полученные результаты подчеркивают также роль антропогенного воздействия именно на участки речных долин. Так, высокие значения модуля стока взвешенных наносов характерны для рек, в пределах которых развита дражная добыча золота и редких металлов (верхняя Колыма, Аян-Юрях, Нера). Работа драг связана с поставкой непосредственно в речной поток тонкодисперсного транзитного материала, перемещаемого рекой на значительные расстояния без его аккумуляции [2]. В качестве примера из другого региона можно привести шлейф мутности, формирующийся драгами в бассейне р. Сыстыг–Хем, правого притока р. Бий-Хем (Республика Тыва), который наблюдается в 300 км ниже по течению, после слияния Бий-Хема и Каа-Хема в районе г. Кызыл.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенные в статье результаты расчета годового стока взвешенных наносов рек севера Сибири и Северо-Востока России дополняют обширный ряд полученных ранее оценок. Для отдельных постов, особенно расположенных в верхних и средних течениях исследованных рек, такой расчет выполнен впервые. Сопоставление показывает достаточную сходимость полученных оценок с данными предыдущих исследований, что говорит о применимости использованного в работе подхода к определению стока взвешенных наносов. На общем фоне интересен более чем двукратный разброс оценок стока взвешенных наносов р. Индигирки (г.п. Воронцово), в ряду которых полученный нами результат выглядит весьма умеренно.

Анализ географической изменчивости стока взвешенных наносов позволяет сделать вывод о существенной роли процессов, происходящих в речных долинах, в формировании нисходящей ветви современного литодинамического потока в исследованном регионе. Основными процессами, количественно определяющими величины выноса взвешенного материала, являются процессы размыва берегов (в том числе под воздействием термоэрозии), а также осыпные процессы на склонах, непосредственно примыкающих к речным потокам. Прямое влияние специфически мерзлотных факторов на сток взвешенных наносов ограничено областью распространения криогенно-преобразованных четвертичных отложений Приморской и Анадырской низменностей. О совместном влиянии гидрологических и гео-криологических условий на процессы формирования стока наносов говорит также различие во временной динамике мутности. В западных районах исследованной территории мутность рек снижается от половодий к паводкам, в то время как

на реках Восточной Якутии, напротив, наблюдается ее увеличение в течение года.

Исследование показало, что чрезвычайно важна унификация эмпирических расчетных методик, достоверная и детальная оценка погрешностей расчета при использовании различных подходов к оценке стока взвешенных наносов. В будущем это позволит упростить разработку региональных моделей расчета стока взвешенных наносов для неизученных водосборов, а также его прогноза для меняющегося климата и условий хозяйственного освоения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Александров Е.И. и др.* Климатические изменения в Арктике и северной полярной области // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. №1 (84). С. 67–80.
2. *Алексеевский Н.И., Власов Б.Н., Доронин Ю.П. и др.* Влияние горных работ на сток наносов в бассейнах рек Омоля и Яны и на шельфе моря Лаптевых // Рациональное природопользование в криолитозоне. М.: Наука, 1992. С. 183–187.
3. *Баранова Ю.П., Бискэ С.Ф.* Позднеплиоценовый – четвертичный этап рельефообразования на Северо-Востоке СССР // Геология и геофизика. 1967. № 3. С. 3–11.
4. *Водные пути бассейна Лены.* М.: МИКИС, 1995. 600 с.
5. *Гидроэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования (под ред. Алексеевского Н.И.).* М.: ГЕОС, 2007. 780 с.
6. *Дегтярев В.В., Долженко Ю.А., Шлычков В.А.* Гидротехническое строительство водных путей Якутского транспортного узла. Новосибирск: ПТФ “Агрос”, 2007. 358 с.
7. *Доронина Н.А.* Реки // Северная Якутия. Л.: Изд-во Морской транспорт, 1962. С. 193–222.
8. *Кайялайнен В.И., Кулаков Ю.Н.* Основные черты истории геологического развития Яно-Индигирской (Приморской) низменности в неоген-четвертичное время // Антропогенный период в Арктике и Субарктике. Тр. НИИГА. Т. 143. М.: Недра, 1965. С. 56–64.
9. *Конищев В.Н.* Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 2009. № 4. С. 10–20.
10. *Лисицин А.П.* Осадкообразование в океане. М.: Наука, 1974. 438 с.
11. *Лисицына К.Н.* Сток взвешенных наносов рек Сибири // Тр. ГГИ. 1974. Вып. 210. С. 48–72.
12. *Лопатин Г.В.* Наносы рек СССР. М.: Географгиз, 1952. 366 с.
13. *Магрицкий Д.В.* Естественные и антропогенные изменения гидрологического режима низовьев и устьев крупнейших рек Восточной Сибири: Автореф. дисс...канд. геогр. наук: 25.00.27. М., 2001. 24 с.
14. *Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: АН СССР, 1955. 346 с.
15. *Михайлов В.Н.* Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.

16. Русловой режим рек Северной Евразии. М.: МГУ, 1994. 336 с.
17. *Самойлов И.В.* Устья рек. М.: Географгиз, 1952. 526 с.
18. Сток наносов, его изучение и географическое распределение / Под ред. Караушева А.Н. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 240 с.
19. Стратегический прогноз изменений климата Российской Федерации на период до 2010–2015 гг. и их влияния на отрасли экономики России. М.: Росгидромет, 2005. 28 с.
20. Тепловодообмен в мерзлотных ландшафтах Восточной Сибири и его факторы. Москва–Тверь: ООО “Издательство Триада”, 2007. 576 с.
21. *Фанерозой Сибири*. Новосибирск: Наука, 1984. Т. 2. 151 с.
22. *Хмызников П.К.* Гидрология бассейна реки Яны. Л., 1934. 251 с.
23. *Чалов Р.С., Алексеевский Н.И., Лю Шугуан.* Сток наносов и русловые процессы на больших реках России и Китая. М.: МГУ, 2000. 216 с.
24. *Чалов Р.С., Лю Шугуан.* Сток наносов и его составляющие как фактор русловых процессов (на примере рек России и Китая) // Эрозия почв и русловые процессы. 2005. Вып. 15. С. 253–282.
25. *Чистяков Г.Е.* Водные ресурсы рек Якутии. М.: Наука, 1964. 162 с.
26. *Шамов Г.И.* Сток взвешенных наносов рек СССР // Тр. ГГИ. 1949. Т. 20 (74). 120 с.
27. *Alabyan A.M., Chalov R.S., Korotaev V.N. et al.* Natural and technogenic water and sediment supply to the Laptev Sea // Rep. Polar Res. 1995. V. 176. P. 265–271.
28. *Balamurugan G.* The use of suspended sediment rating curves in Malaysia: some preliminary considerations // Pertanika. 1989. V. 12. № 3. P. 367–376.
29. *Ferguson R.I.* River loads underestimated by rating curves // Water Resources Research. 1986. V. 22. № 1. P. 74–76.
30. *Frey K.E., McClelland J.W.* Impacts of permafrost degradation on arctic river biogeochemistry // Hydrological Processes. 2009. V. 23. P. 169–182.
31. *Gordeev V.V., Martin J.M., Sidorov I.S., Sidorova M.V.* A reassessment of the Eurasian river input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic ocean // American Journal of Science. 1996. V. 296. P. 664–691.
32. *Hasholt B., Bobrovitskaya N.N., Bogen J. et al.* Sediment transport to the Arctic Ocean and adjoining cold oceans // 15<sup>th</sup> International Northern Research Basins Symposium and Workshop. Luleå to Kvikkjokk, Sweden, 2005. P. 41–67.
33. *Holmes R.M., McClelland J.W., Peterson B.J. et al.* A circumpolar perspective on fluvial sediment flux to the Arctic Ocean // Global Biogeochemical Cycles. 2002. V. 16. № 4. 1098, doi:10.1029/2001GB001849. 14 p.
34. *Holmes R.M., Peterson B.J., Gordeev V.V. et al.* Flux of nutrients from Russian rivers to the Arctic Ocean: Can we establish a baseline against which to judge future changes? // Water Resources Research. 2000. V. 36. № 8. P. 2309–2320.
35. *Ivanov V.V., Piskun A.A.* Distribution of river water and suspended sediments in the river deltas of the Laptev Sea // Rep. Polar Res. 1995. V. 176. P. 142–153.
36. *Ivanov V.V., Piskun A.A.* Distribution of river water and suspended sediment loads in the deltas of rivers in the basins of the Laptev and East-Siberian Seas // Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic: Dynamics and History. New York: Springer-Verlag, 1999. P. 239–250.
37. *Jansson M.B.* Comparison of sediment rating curves developed on load and on concentration // Arctic Hydrology. 1997. V. 28. № 3. P. 189–200.
38. *Milliman J.D., Meade R.H.* World-wide delivery of river sediment to the oceans // J. Geology. 1983. V. 91. P. 1–21.
39. *Milliman J.D., Syvitski J.P.M.* Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: The importance of small mountainous rivers // J. Geology. 1992. V. 100. P. 524–544.
40. NOAA Arctic Vision & Strategy. 2011. 32 p. (электронная публикация).
41. *Rachold V., Alabyan A.M., Hubberten H.W. et al.* Sediment transport to the Laptev Sea – hydrology and geochemistry of the Lena River // Polar Research. 1996. V. 15. P. 183–196.
42. *Syvitski J.P.M., Peckham S.D., Hilberman R., Mulder T.* Predicting the terrestrial flux of sediment to the global ocean: a planetary perspective // Sedimentary Geology. 2003. V. 162. P. 5–24.
43. *Telang S.A., Pocklington R., Naidu A.S. et al.* Carbon and mineral transport in major North American, Russian arctic, and Siberian rivers: The St. Lawrence, the Mackenzie, the Yukon, the arctic Alaskan rivers, the arctic basin rivers in the Soviet Union, and the Yenisei // Biogeochemistry of Major World Rivers. New York: Wiley, 1991. P. 75–104.
44. *Walker H.J.* Arctic deltas // J. Coastal Res. 1998. V. 14. P. 718–738.
45. *Walling D.E.* Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin // Water Resources Research. 1977. V. 13. № 3. P. 531–538.

## Annual Discharge of Suspended Matter by the Rivers of Northern Siberia and Far East

N. I. Tananaev

New estimates of suspended sediment fluxes ranging from the medium size to largest rivers of Siberia and Far-Eastern Russia are presented on the basis of calculations over the period of instrumental surveys. The method of calculations is considered, which takes into account the intra-annual discharge variability. Its hydrological basis is presented. Comparison of new estimates with the results of previous studies is done. The effect of geological history, particularly glaciation history, on contemporary suspended sediment fluxes is shown. We put forward a hypothesis about the prevalence of the valley (coastal and slopes) suspended flux generation over watershed generation within the Russian Arctic drainage basin.