

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 556.535.6

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК СТОКА ВЗВЕШЕННЫХ
НАНОСОВ РЕК КАМЧАТСКОГО КРАЯ

© 2019 г. Л. В. Куксина

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
Москва, Россия

e-mail: ludmilakuksina@gmail.com

Поступила в редакцию 02.12.2017 г.; после доработки 02.12.2017 г.; принята в печать 21.09.2018 г.

Исследованы закономерности пространственно-временной изменчивости характеристик стока взвешенных наносов. На основе анализа разностно-интегральных кривых стока установлено, что для большей части рек на территории Камчатского края характерно наличие двух относительно продолжительных периодов изменения стока взвешенных наносов – увеличения до конца 1970-х – начала 1980-х годов и его последующего уменьшения. Данная закономерность нарушается в реках, испытывающих воздействие вулканических извержений, где наибольшее возрастание стока наносов наблюдается после крупнейших извержений. Значительно уточнены существующие карты распределения средней многолетней мутности воды (выделено 18 зон вместо 4) и среднего многолетнего модуля стока взвешенных наносов (выделено 13 зон вместо 2). Построена карта распределения гранулометрического состава взвешенных наносов (на территории региона выделено 3 зоны). Показано, что максимальные значения среднего многолетнего модуля стока взвешенных наносов (свыше 500 т/км²-год) и мутности воды (более 1000 г/м³), а также крупности частиц наносов наблюдаются в водотоках вулканических территорий; минимальные величины мутности, модуля стока взвешенных наносов, а также крупности частиц характеризуют материковую часть края.

Ключевые слова: гранулометрический состав наносов рек, мутность воды, сток воды, вулканизм.

DOI: 10.31857/S2587-55662019152-61

Введение. Большое разнообразие природных условий и небольшая степень антропогенной нагрузки на речные водосборы в пределах Камчатского края создает предпосылки для значительного варьирования характеристик речного стока, в частности, пространственно-временной изменчивости характеристик стока взвешенных наносов. Основными факторами пространственно-временной изменчивости этих характеристик выступают подстилающая поверхность (рельеф, литология грунтов, почвенно-растительный покров), климатические условия территории (количество и интенсивность осадков), модуль водного стока. Временная изменчивость характеристик стока взвешенных наносов в многолетнем масштабе определяется, прежде всего, изменчивостью климатических факторов и водного стока. Особая роль в пространственно-временной изменчивости характеристик стока взвешенных наносов рек на территории Камчатского края принадлежит вулканической деятельности, поскольку действующие вулканы (их количество на Камчатке составляет 42 [10], а радиус распространения шлейфов во время пепловых выбросов наиболее мощных извержений может превышать 2000 км [12]) являются

источниками поступления огромного количества (до нескольких десятков тысяч т на 1 км² [14]) рыхлого вулканогенного материала на поверхность речных водосборов в период извержений, а в дальнейшем – со склонов вулканов со склоновым стоком за счет ветрового переноса наиболее мелких частиц, а также обвальнo-осыпных процессов на склонах речных долин. Все это создает особую специфику в изменчивости характеристик стока взвешенных наносов протекающих здесь водотоков, а также рек, испытывающих воздействие вулканизма вследствие впадения притоков, дренирующих территории вулканических районов Камчатки. Разнообразие природных условий оказывает влияние не только на такие характеристики стока взвешенных наносов, как мутность воды, модуль и расход взвешенных наносов, а также на пространственно-временную изменчивость гранулометрического состава взвешенных частиц. Тем не менее, последние работы, посвященные исследованию данных характеристик, относятся к концу 1970-х годов. Существенное увеличение информационной базы за истекший период позволяет выполнить новое, значительно уточненное обобщение сведений о пространственной изменчивости

мутности и модуля стока взвешенных наносов на территории Камчатского края, выполнить не проводившийся ранее анализ временной изменчивости характеристик, а также гранулометрического состава наносов рек исследуемой территории.

В связи с этим основной целью предлагаемой работы является исследование пространственно-временных закономерностей изменчивости среднесноголетних характеристик стока взвешенных наносов рек Камчатского края.

Материалы и методы. Данные гидрометрических наблюдений. Систематические наблюдения за стоком взвешенных наносов на реках Камчатского края начались в 1940 г., когда были организованы наблюдения на р. Камчатке (п. Ключи) и р. Аваче (г. Елизово). К 1960 г. на реках региона действовало 16 постов, к 1970 г. – 37, а в 1980 г. – 53 поста. Это соответствует средней плотности пунктов наблюдательной сети 1 пост на 8760 км² водосборной территории. Наибольшая плотность сети мониторинга характерна для бассейна р. Камчатки, где в 1940–2017 гг. она составляла в среднем 1 пост на 1530 км². Всего за период с 1941 по 2017 гг. наблюдения за стоком взвешенных наносов проводились на 69 постах. На 6 постах наблюдения выполнялись эпизодически, поэтому они были исключены из дальнейшего анализа. Продолжительность наблюдений на каждом из отобранных 63 постов изменяется от 6 до 78 лет. В настоящее время (по состоянию на 2017 г.) на рассматриваемой территории действует 20 постов, на которых производятся наблюдения за стоком взвешенных наносов (1 пост на 23000 км²). Продолжительность наблюдений на этих постах колеблется от 41 года до 78 лет.

Пространственные обобщения сведений о характеристиках стока взвешенных наносов. Первые обобщения данных о пространственной изменчивости характеристик стока наносов рек региона выполнены Г.И. Шамовым [19], который выделил зоны с величиной мутности 50–150 г/м³ (полуостровная часть) и менее 50 г/м³ (материковая часть территории). Позже Г.В. Лопатин [9] посчитал возможным определить границы лишь одной зоны в восточной части полуострова с мутностью речных вод 50–100 г/м³.

На основе данных о величине стока взвешенных наносов по 28 гидрологическим постам с рядами наблюдений до 1966 г. на территории Камчатского края выделены 3 зоны изменения мутности [13]. Реки западного склона Срединного хребта, материковой части края, южной части полуострова, правобережные притоки р. Авачи, левобережные притоки верхнего течения р. Камчатки, бассейн Берингова моря вошли в зону с величиной средней многолетней мутно-

сти речных вод менее 50 г/м³. Бассейны левобережных притоков р. Камчатки (севернее устья р. Андрияновки) образовали зону с величиной мутности 50–100 г/м³. Реки вулканического района Камчатки, включая правобережные притоки р. Камчатки и левобережные притоки р. Авачи, находятся в зоне с мутностью 100–400 г/м³.

В дальнейшем уточнение числа и границ расположения зон с разной величиной средней многолетней мутности рек на территории Камчатского края произведено на основе использования рядов наблюдений за стоком наносов до 1970 г. [15]. Это позволило дифференцировать территорию региона на 4 зоны с характерными значениями мутности: 25–50 г/м³; 50–100 г/м³; 100–250 г/м³ и 250–500 г/м³. Одновременно была создана первая карта распределения модуля стока взвешенных наносов M_R . В пределах Камчатского края выделены две природные области. В северной (материковой) части территории величина M_R не превышала 5–20 т/(км²·год), а в полуостровной ее части – 20–100 т/(км²·год).

Постепенное накопление данных и в дальнейшем оставалось основанием для уточнения районирования региона по величине средней многолетней мутности камчатских рек. Последнее такое уточнение, по-видимому, выполнено Н.Н. Бобровицкой (ГГИ). В рамках нового районирования на территории Камчатского края выделено около 10 зон [20]. В их пределах мутность воды изменяется в диапазоне 10–500 г/м³.

В “Национальном атласе России” [11] карта мутности речных вод в пределах Камчатского края, тем не менее, включает лишь две зоны мутности (20–50 г/м³ и 50–100 г/м³). Границы изменения модуля стока взвешенных наносов практически повторяют границы зон мутности, что, вероятно, связано с использованием авторами устаревших картографических обобщений, например карты из [18].

Методы исследования характеристик стока взвешенных наносов. Для расчета характеристик среднесноголетнего стока взвешенных наносов анализировалась репрезентативность рассматриваемых рядов наблюдений. Оценка репрезентативности рядов наблюдений осуществлялась стандартными методами, применяемыми в гидрологических расчетах [5]. Она показала, что для постов на реках Камчатского края условие репрезентативности оказывается выполненным для всех рядов наблюдений, длина которых составляет более 20 лет, а также для тех случаев (всего 30% рядов), где продолжительность рядов наблюдений составляет менее 20 лет. Анализ рядов меньшей продолжительности позволил установить, что они являются репрезентативными даже на реках, продолжительность наблюдений за стоком взвешенных наносов на которых

составляет 6–10 лет. Вероятно, этот факт объясняется тем, что за непродолжительный период наблюдений не происходило случайных событий (крупные извержения вулканов, сход селей и т.п.), способных существенно повлиять на сток взвешенных наносов в течение рассматриваемого промежутка времени.

Статистические характеристики для репрезентативных рядов определяются методом моментов, причем

$$R_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n R_i, \quad (1)$$

где R_0 – средний многолетний расход взвешенных наносов, кг/с; R_i – расход взвешенных наносов в i -м году, кг/с; n – число лет наблюдений.

Зональность климатических факторов и почвенно-растительного покрова создает предпосылки для картирования характеристик стока взвешенных наносов и их определения для неизученных рек. При картировании параметров стока наносов использовался метод выделения районов с заданными пределами изменения рассматриваемой величины [15]. Наиболее удобными величинами для картирования являются средняя многолетняя мутность рек и модуль стока взвешенных наносов.

Построение карт распределения мутности воды и модуля стока взвешенных наносов по территории Камчатского края осуществлялось методом географо-гидрологических обобщений [5] на основе данных постов УГМС, а также карт факторов формирования стока взвешенных наносов. Проверка конфигурации и количества выделенных районов осуществлялась путем построения аналогичных карт с использованием половины точек, отобранных случайным образом из исходной совокупности [21, 22]. Она продемонстрировала обоснованность выделения однородных районов на территории Камчатского края.

Изучение гранулометрического состава взвешенных наносов рек Камчатского края осуществлялось на основании сведений, полученных на стационарных постах УГМС по Камчатскому краю. Средний диаметр частиц вычислялся по формуле

$$d_{cp} = \frac{\sum d_i P_i}{100}, \quad (2)$$

где d_i – средний диаметр фракции, мм; P_i – процентное содержание фракции в пробе.

Результаты и обсуждение. Временная изменчивость характеристик стока взвешенных наносов. На реках северной материковой части Камчатского края наиболее продолжительные наблюдения за стоком воды и наносов

имеются по бассейну р. Пенжины (59 лет). На других реках округа наблюдения за характеристиками стока наносов не превышают 18 лет, что не позволяет оценить наличие периодов увеличения и уменьшения стока. Наблюдения на р. Пенжине (с. Каменское, $F = 71600 \text{ км}^2$) обнаруживают три относительно продолжительных цикла изменения стока воды: 1957–1969 гг. (многоводный), 1970–1997 гг. (средний по водности), 1998–2010 гг. (маловодный) (рис. 1а, табл. 1). Их наличие хорошо согласуется с соответствующими изменениями годового количества атмосферных осадков. В меньшей степени их изменения отражаются в многолетней ритмике изменения стока взвешенных наносов, для которого характерно два четко выраженных цикла: 1957–1974 гг. (повышенный сток), 1975–2010 гг. (пониженный сток).

Реки западной части полуострова отличаются синхронность многолетних колебаний стока воды и наносов. Максимальная продолжительность рядов относится к бассейну рр. Хайрюзова, Тихая – с. Хайрюзово ($F = 6680 \text{ км}^2$) и составляет 57 лет. Для них характерна высокая изменчивость характеристик стока, затрудняющая выделение периодов с длительным увеличением или уменьшением речного стока (см. рис. 1б, табл. 1). В период 1976–1981 гг. сток воды и наносов был повышен, а в 1982–1996 гг. соответствовал средним значениям. Лишь начиная с 1997 г. наблюдается фаза пониженного стока наносов. Изменения годовых значений суммы осадков, стока воды и наносов носят синхронный характер (на фоне повышенной изменчивости количества годовых осадков).

Реки в юго-западной части Камчатки характеризуются меньшей синхронностью изменений стока воды и наносов. До конца 1970-х – начала 80-х годов в этом районе в целом наблюдалась фаза повышенного, а в последующем – пониженного речного стока (см. рис. 1в, табл. 1).

Многолетние колебания стока воды и наносов рек восточного района Камчатки в целом синхронны (при наличии смещения лет начала и завершения фаз с характерным изменением речного стока). Наибольшая длина рядов наблюдений имеется для бассейна р. Авачи (78 лет). Относительно синхронное увеличение стока воды и наносов наблюдалось с 1941 по 1977 г. Оно сменилось направленным уменьшением этих составляющих речного стока в последующие годы (см. рис. 1г, табл. 1). Эта закономерность в равной мере оказалась характерной для малых рек (р. Половинка, $F = 90.5 \text{ км}^2$) и даже ручьев (р. Крутая Падь, $F = 10.6 \text{ км}^2$) (см. табл. 1).

Наибольшее количество постов (21) с репрезентативными наблюдениями за стоком воды и наносов с продолжительностью рядов 37–78 лет относится к рекам Центрального района

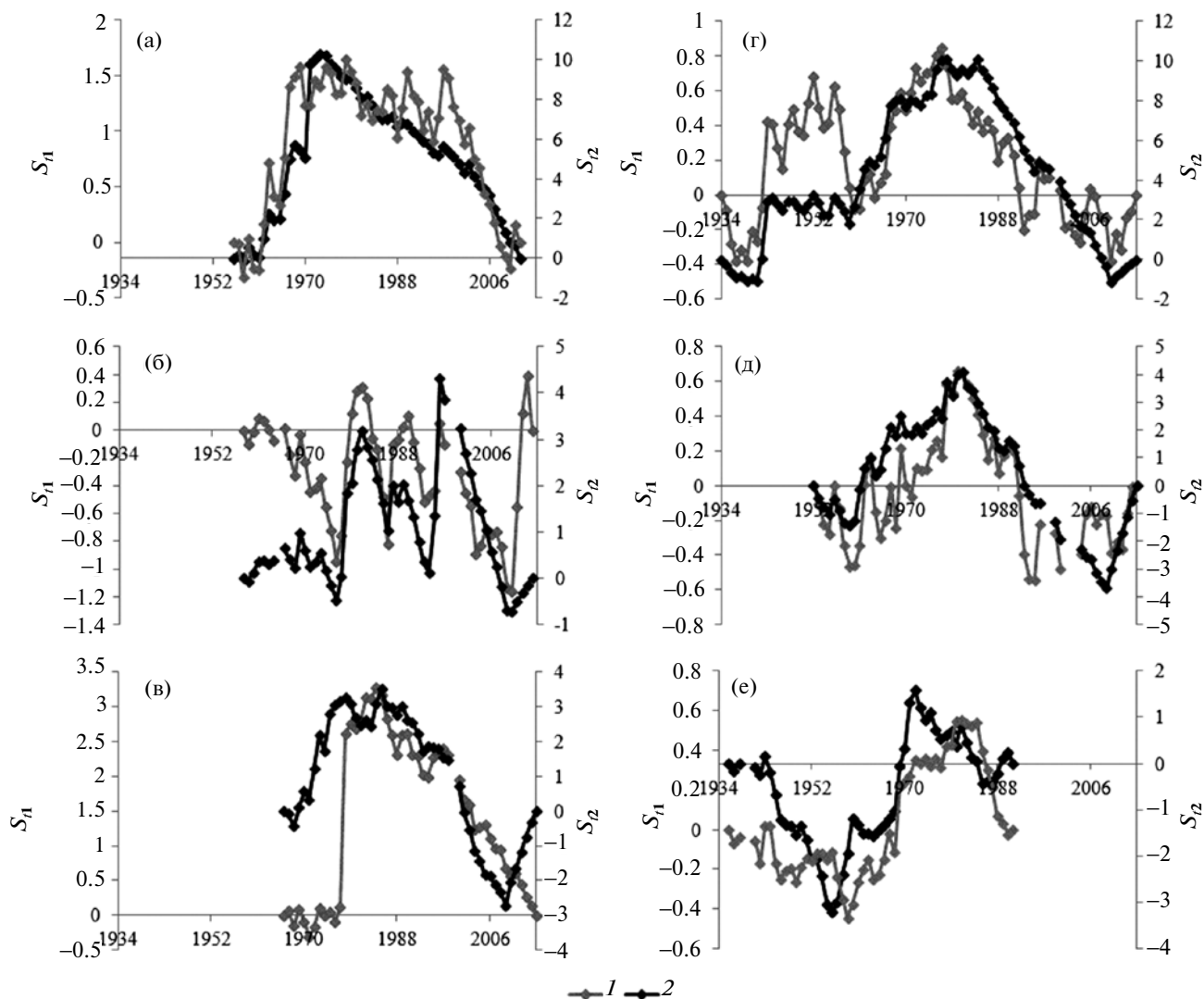


Рис. 1. Разностно-интегральные кривые стока воды (1, S_1) и взвешенных наносов (2, S_2) на рр. Пенжина (с. Каменское, (а)), Хайрюзова (с. Хайрюзово, (б)), Удова (с. Русь, (в)), Авача (г. Елизово, (г)), Кирганик (с. Кирганик, (д)), Камчатка (уроч. Большие Шеки, (е)).

Камчатки. На реках этого района (р. Камчатка) выделяются две относительно продолжительные фазы колебания стока воды и наносов. Фаза повышенного стока была характерна до конца 1970-х годов, в дальнейшем она сменилась фазой пониженного стока воды и наносов (до 2009 г.) (см. рис. 1д). Эта закономерность нарушается в реках, испытывающих воздействие вулканических извержений. Для таких рек до середины – конца 1950-х годов наблюдалась фаза пониженного стока, сменявшаяся в дальнейшем фазой повышенного стока воды и наносов (см. рис. 1е). По-видимому, такой вариант изменчивости характеристик стока для данных рек объясняется влиянием крупнейшего на Камчатке извержения в XX в. вулкана Безымянный в марте 1956 г. [3].

Для рек, дренирующих склоны и подножия активных вулканов, характерны совершенно

синхронные колебания стока воды и наносов. Ряды наблюдений за стоком взвешенных наносов таких рек нерепрезентативны ($k_{cp} > 1.05$) [5], что свидетельствует о недостаточной продолжительности рядов наблюдений. Поскольку $k_{cp} = -1.08$, наблюдения на р. Горно-Тополовой соответствуют многоводному периоду.

Особенности многолетней временной изменчивости гранулометрического состава взвешенных наносов рек Камчатского края проявляются в изменении средневзвешенного диаметра транспортируемых частиц (рис. 2). Колебания размера частиц в целом находятся в противофазе с изменением расходов воды и взвешенных наносов. При увеличении этих факторов, как правило, диаметр транспортируемых частиц уменьшается (см. рис. 2). Подобная закономерность характерна и для других рек края.

Таблица 1. Характеристика многолетней изменчивости стока воды и наносов на реках Камчатского края

Река – пост	F , км ²	Период наблюдений	k_{cp}	Цикл водности		
			Сток воды ----- Сток наносов	Многоводный $k_{cp} > 1.05$	Средний $0.95 < k_{cp} < 1.05$	Маловодный $k_{cp} < 0.95$
Северный гидрологический район						
Тылговаям – Хаилино	2180	1972–1989	0.99	1973–1975	1974–1985	1975–1981
			1.01	1973–1976	1974–1987	1976–1986
Пенжина – Каменское	71600	1957–2012	1.00	1957–1969	1969–1997	1997–2012
			1.00	1957–1974	1966–2005	1975–2012
Западный гидрологический район						
Тигиль – Тигиль	11300	1965–2015	1.00	1965–1980	1972–2000	1980–2015
			1.00			
Воямполка – Воямполка	5120	1967–2015	0.99	1967–1979	1973–1996	1981–2015
			1.01	1967–1995	1978–2008	1996–2015
Хайрюзова – Хайрюзово	10800	1959–2015	1.00	1976–1981	1982–1996	1997–2015
			1.00			
Юго-западный гидрологический район						
Удова – Русь	1370	1967–2015	1.00	1967–1984	1974–2015	1984–2015
			1.00	1967–1985	1974–1998	1985–2009
Озерная – Шумный	878	1949–2015	1.00	1959–1974	1962–1999	1974–2003
			1.00	1959–1982	1962–2008	1982–2015
Восточный гидрологический район						
Авача – Елизово	4750	1935–2015	1.00	1939–1977	1946–1988	1977–2010
			1.00	1939–1977	1959–2003	1977–2010
Крутая Падь – Коряки	10.6	1959–2015	1.00	1959–1976	1965–1994	1976–2010
			1.00	1959–1976	1966–1999	1976–2010
Половинка – Елизово	90.5	1959–2015	1.01	1970–1986	1972–2004	1986–2010
			1.01	1973–1981	1959–2010	1981–2010
Центральный гидрологический район						
Камчатка – Большие Шеки	51600	1937–1991	1.00	1959–1981	1969–1986	1943–1959
			1.01	1956–1972		1943–1956
Камчатка – Долиновка	12000	1937–1999	1.01	1954–1978	1941–1978	1937–1954
			1.01	1954–1978	1940–1993	1937–1954
Долиновка – Долиновка	52.9	1964–2015	1.00	1964–1986	1973–2002	1987–2015
			0.99	1964–1986	1969–2000	1987–2015
Кирганик – Кирганик	1430	1953–2015	1.00	1959–1980	1961–1993	1980–2009

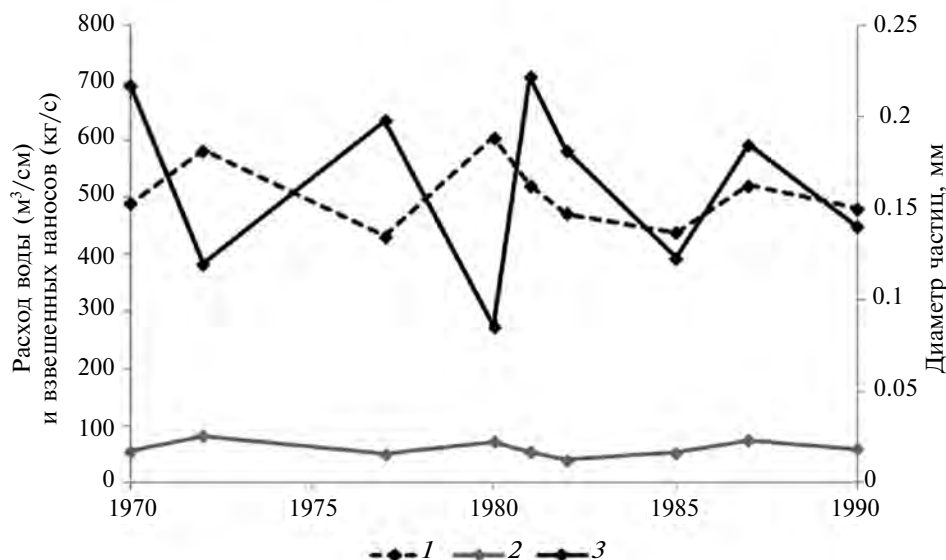


Рис. 2. Изменение расходов воды (1), взвешенных наносов (2) и средневзвешенного диаметра частиц (3), р. Камчатка — пгт. Козыревск.

Пространственная изменчивость характеристик стока взвешенных наносов.

Пространственные закономерности изменения стока взвешенных наносов находятся в зависимости от совокупности зональных и азональных ландшафтных факторов.

Зональность факторов формирования стока наносов создает предпосылки для картирования средней многолетней мутности воды и модуля стока взвешенных наносов для рек Камчатского края. Она искажается под влиянием азональных факторов — рельефа, особенностей литологического строения территории, хозяйственной деятельности. При картировании стока наносов используется районирование — выделение характерных зон с заданными пределами изменения величины параметров стока взвешенных наносов [15].

Для подготовки тематических карт мутности воды и модуля стока взвешенных наносов на территорию Камчатского края использованы данные по 63 постам УГМС с продолжительностью рядов от 8 до 78 лет. Ряды являются репрезентативными, что позволило отказаться от приведения рядов к одному (более длительному) периоду вследствие сложности подбора рек-аналогов.

Распределение постов по площади изученных водосборов следующее: примерно половина постов (46%) приходится на реки с площадью водосбора менее 500 км², остальная часть (54%) пунктов наблюдений находится на более крупных реках.

Увеличение числа пунктов и продолжительности наблюдений на них по сравнению

с 1970 г. позволяет уточнить карту средней мутности и модуля стока взвешенных наносов для территории Камчатского края [15]. На уточненной карте (см. рис. 3а) представлено 18 (вместо 4) зон. Они соответствуют изменению средней многолетней мутности в диапазоне значений от менее 10 г/м³ до 1000 г/м³ и больше. Возможность подобного уточнения связана с более детальным выделением районов, однородных по условиям формирования стока взвешенных наносов [6].

Карта изменения модуля стока взвешенных наносов (см. рис. 3б) содержит 13 районов (вместо 2). Число выделенных зон не совпадает по количеству с зонами мутности, что связано с генерализацией некоторых районов. В целом пространственная изменчивость величины модуля стока взвешенных наносов характеризует диапазон от 5–10 т/км² до 500 т/км² и больше.

Мутность рек западных районов Камчатки существенно меньше по сравнению с реками восточных регионов. Это объясняется тем, что на востоке региона находятся наиболее крупные массивы действующих вулканов, являющихся постоянным источником поступления минеральных частиц в реки. Наиболее интенсивные пеплопады, характерные для данной части Камчатки, влияют на формирование почвенного и растительного покрова, определяют интенсивность склоновой эрозии.

Районы с минимальной мутностью воды рек (10 г/м³ и меньше) расположены в юго-западной части полуострова, в центральной части Срединного хребта и на перешейке

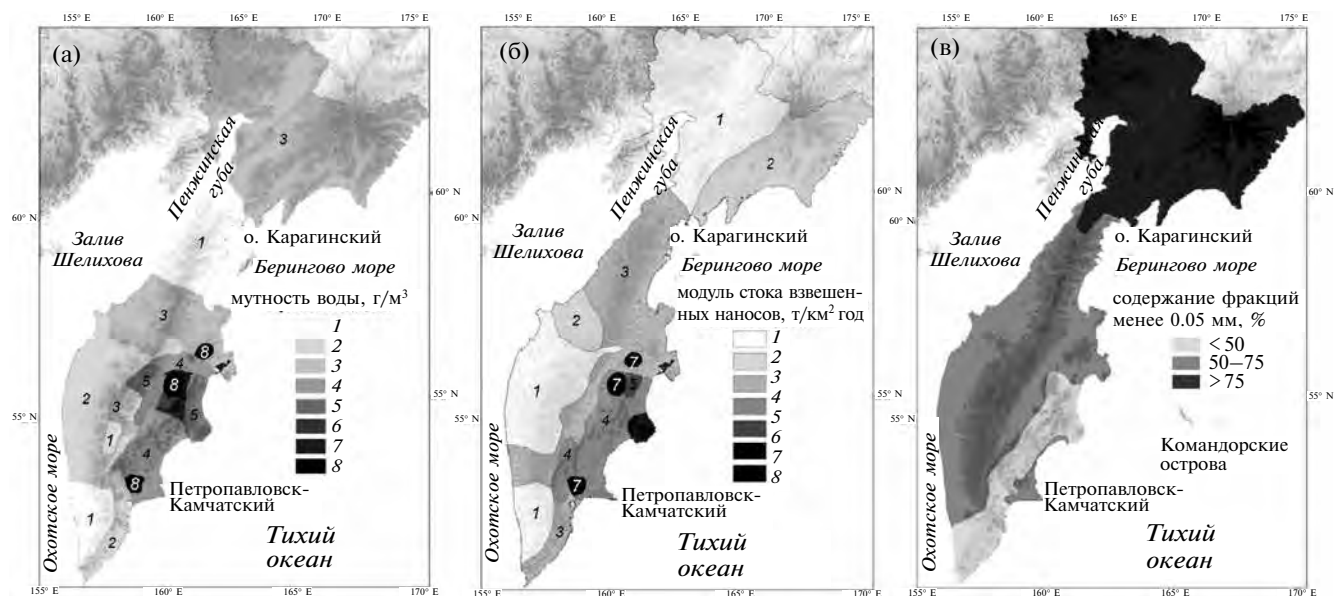


Рис. 3. Уточненные карты средней многолетней мутности воды (а), модуля стока взвешенных наносов (б) и содержания мелких фракций (< 0.05 мм) во взвешенных наносах (в) рек Камчатского края: (а) — 1 — < 10 г/м³, 2 — 11–25 г/м³, 3 — 26–50 г/м³, 4 — 51–100 г/м³, 5 — 101–250 г/м³, 6 — 251–500 г/м³, 7 — 501–1000 г/м³, 8 — > 1000 г/м³; (б) — 1 — < 10 т/км²-год, 2 — 11–25 т/км²-год, 3 — 26–50 т/км²-год, 4 — 51–100 т/км²-год, 5 — 101–250 т/км²-год, 6 — 251–500 т/км²-год, 7 — > 500 т/км²-год.

между полуостровной и материковой частями Камчатского края. Они приурочены к областям, сложенным породами, имеющими довольно высокую устойчивость к размыву. Поэтому, несмотря на высокие значения эрозионного потенциала дождей, мутность речной воды в этом районе не достигает больших значений. Этому благоприятствуют низкая эродируемость почв и повышенная их защищенность растительным покровом от размыва [6].

Большая мутность (11–50 г/м³) характерна для западных и юго-восточных районов полуострова, а также для материковой части региона (см. рис. 3а). Почвенный покров материковой области характеризуются относительно высокими значениями коэффициента эродируемости, хотя подстилающие породы имеют высокую и среднюю устойчивость к размыву. Эрозионный потенциал дождей здесь достигает минимальных значений на территории Камчатского края. Высокие значения эрозионного индекса осадков в юго-восточных областях компенсируются достаточной устойчивостью горных пород и почвенного покрова к размыву и высокими противоэрозионными свойствами растительного покрова [6]. Мутность речных вод в западных районах региона формируется в условиях распространения горных пород средней и высокой устойчивости, почв средней эродируемости и среднего эрозионного потенциала осадков.

Существенное увеличение мутности рек характерно для восточных районов полуостро-

ва, зоны расположения вулканов (см. рис. 3а). Содержание взвешенных частиц в воде убывает по мере удаления речных бассейнов от наиболее активных вулканов. Поэтому зона максимальной мутности речных вод совпадает с территорией расположения вулканов Ключевской группы. В непосредственной близости от вулканов мутность речных вод многократно превышает значения 1–10 кг/м³, а для отдельных рек достигает значений более 200 кг/м³. Такое содержание в воде минеральных частиц обусловлено максимальным для региона показателем эродируемости почв, полным отсутствием растительности вблизи действующих вулканов и высокими индексами эрозионного потенциала дождей. Режим стока взвешенных наносов для местных рек находится в зависимости от режима извержений вулканов. Наибольший сток взвешенных наносов р. Камчатка (пункты пгт. Козыревск и уроч. Большие Шеки) формировался в годы после крупных извержений вулканов. Сравнение лет с максимальными значениями стока взвешенных наносов и извержениями вулканов Безымянного (1955–1956 гг.), Шивелуча (1964 г.), Толбачика (1975–1976 гг.), Ключевского (1994 г.) [1, 3, 12, 17] обнаруживает синхронность данных событий. На р. Толбачик максимальные значения мутности воды и расхода взвешенных наносов наблюдались после Большого трещинного Толбачинского извержения.

Распределение модуля стока взвешенных наносов по территории Камчатского края в целом

соответствует распределению средней многолетней мутности воды. Минимальные его значения характерны для материковой части региона и районов западного побережья полуострова Камчатка, что соответствует распространению на территории довольно устойчивых к размыву почвогрунтов. Диапазон изменения значений находится в пределах 1.5–9.5 т/км². Максимальные значения свойственны областям развития активного вулканизма (см. рис. 3б), где распространены наиболее легко эродируемые породы и почвы, эрозионный индекс осадков достигает высоких значений, а защитные свойства растительности минимальны [6]. Модули стока взвешенных наносов для этих областей составляют более 500 т/км², а на отдельных участках достигают значений в тысячи и десятки тысяч т с км². Согласно более ранним оценкам [4, 15], модуль стока взвешенных наносов с данных территорий не превышал 100 т/км².

Величина модуля стока взвешенных наносов определена совместным влиянием комплекса факторов, определяющих пространственное изменение стока наносов и условий их транспорта в речной сети. Это позволяет исследовать характеристики стока взвешенных наносов неизученных рек в зависимости от сочетания этих факторов [15]. Опыт проведения подобных исследований накоплен при изучении пространственной изменчивости стока наносов для рек Европейской территории СССР и Сибири, Средней Азии [7, 8, 16], а также для территории Украины [2].

Выполненное обобщение сведений о гранулометрическом составе взвешенных наносов, транспортируемых реками Камчатского края, позволило получить карту содержания мелких фракций для частиц, средний диаметр которых составляет менее 0.05 мм (рис. 3в). На территории края выделяется четыре зоны с характерным распределением частиц. Наиболее мелкие частицы (в отдельных случаях содержание частиц диаметром менее 0.05 мм превышает 90%) транспортируются во взвешенном состоянии реками северной материковой части, что связано как с особенностями подстилающей поверхности, так и с распространением на территории многолетнемерзлых пород. Частицы средней крупности (содержание частиц менее 0.05 мм варьирует от 50 до 75%) характерны для рек полуостровной части к западу от восточного вулканического пояса, а также для ряда рек на юго-востоке Камчатки (см. рис. 3в). Наиболее крупные частицы (содержание частиц диаметром менее 0.05 мм не превышает 50%, а для некоторых рек оказывается меньше 30% от общего содержания) представлены в гранулометрическом составе взвешенных наносов рек, протекающих в зоне активного вулканизма. Это связано с постоянным

поступлением в водотоки продуктов вулканических извержений, характеризующиеся преобладанием более крупных фракций. Исключение составляют некоторые водотоки, дренирующие склоны вулканов Безымянного и Шивелуча, поскольку частицы пепла, выбрасываемые этими вулканами при извержениях, имеют минимальный диаметр. Содержание фракций диаметром менее 0.05 мм во взвешенных наносах этих рек составляет 60–90%.

Выводы. Выполнен анализ гидрологической изученности характеристик стока взвешенных наносов рек Камчатского края на стационарных постах УГМС по Камчатскому краю. В настоящее время наблюдения ведутся на 20 постах, продолжительность наблюдений на них достигает 78 лет.

Установлено, что для большей части рек на территории Камчатского края характерно наличие двух относительно продолжительных циклов в изменении стока воды и взвешенных наносов – увеличения характеристик до конца 1970-х – начала 1980-х годов и последующего их уменьшения. Данная закономерность нарушается для рек, испытывающих активное воздействие вулканических извержений. Максимальное увеличение стока взвешенных наносов в них, как правило, наблюдается после наиболее мощных извержений.

Анализ современной гидрометеорологической информации и распределения факторов формирования стока взвешенных наносов рек позволил существенно уточнить карты распределения средней многолетней мутности воды рек и модуля стока взвешенных наносов, а также впервые построить карту распределения крупности взвешенных частиц. Таким образом, удалось выделить 18 зон мутности речных вод (вместо 4 выделенных ранее), 13 зон по модулю стока взвешенных наносов (вместо 2) и 3 зоны распределения крупности частиц наносов. Установлено, что максимальные значения мутности воды (более 1000 г/м³) и модуля стока взвешенных наносов (более 500 т/км²·год) наблюдаются в водотоках, дренирующих склоны и подножия наиболее активных вулканов на территории Камчатки.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ (проект МК 5835.2016.5) и гранта РНФ (проект № 17-77-10047) (раздел 3).

Благодарности. Огромную благодарность автор статьи выражает своему наставнику и учителю Н.И. Алексеевскому (1950–2015), с кем вместе мы разрабатывали разделы будущей статьи. Автор статьи признательна сотрудникам УГМС по Камчатскому краю за помощь в подготовке информационной базы исследования.

Funding. The study was funded by President RF grant (project no. МК 5835.2016.5) and the Russian Science Foundation, project no. 17-77-10047.

Acknowledgments. Author is grateful to her tutor N.I. Alekseevskiy (1950–2015) for discussions concerning the paper and to the specialists of the Kamchatsky Krai Regional Body of the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring for their help in preparation of informational base of the study.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большое трещинное Толбачинское извержение (1975–1976 гг., Камчатка). М.: Наука, 1984. 638 с.
2. Горецкая З.А. Закономерности распределения стока взвешенных наносов рек по территории Украины // Тр. УкрНИГМИ. 1974. Вып. 127. С. 122–132.
3. Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения 1955–1963 гг. М.: Наука, 1965. 171 с.
4. Дедков А.П., Мозжерин В.И. Эрозия и сток наносов на Земле. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1984. 264 с.
5. Евстигнеев В.М. Речной сток и гидрологические расчеты. М.: изд-во МГУ, 1990. 304 с.
6. Куksина Л.В., Алексеевский Н.И. Эрозионное районирование территории Камчатского края // География и природные ресурсы. 2016. № 2. С. 132–141.
7. Лисицына К.Н. Сток взвешенных наносов рек Сибири // Тр. ГГИ. 1974. Вып. 210. С. 48–72.
8. Лисицына К.Н., Александрова В.И. Сток наносов рек Европейской территории СССР // Тр. ГГИ. 1972. Вып. 191. С. 23–51.
9. Лопатин Г.В. Зоны мутности рек Сибири и Дальнего Востока // Изв. ВГО. 1955. Т. 87. Вып. 1. С. 23–31.
10. Муравьев Я.Д., Клименко Е.С., Дмитриева Ю.А. К созданию ГИС “Вулканоопасность” // Arcview. 2010. № 2. Вып. 53. С. 12–13.
11. Национальный атлас России. Т. 2. Природа. Экология. М.: Мин. транспорта РФ. Федеральное агентство геодезии и картографии, 2007. 496 с.
12. Озеров А.Ю., Карпов Г.А., Дроздин В.А., Дvigало В.Н., Демянчук Ю.В., Иванов В.В., Белоусов А.Б., Фирстов П.П., Гаврилов В.А., Яцук В.В., Округина А.М. Динамика извержения Ключевского вулкана 7 сентября–2 октября 1994 г. (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1996. № 5. С. 3–16.
13. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 20. Камчатка. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 366 с.
14. Соколов И.А. Вулканизм и почвообразование. М.: Наука, 1973. 224 с.
15. Сток наносов, его изучение и географическое распределение / под ред. А.В. Караушева. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 240 с.
16. Ткачева Л.Г. Сток взвешенных наносов рек Средней Азии // Тр. ГГИ. 1974. Вып. 210. С. 73–81.

17. Токарев П.И. Гигантское извержение вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г. и его предвестники // Изв. АН СССР. Сер. физика Земли. 1967. № 9. С. 11–22.
18. Физико-географический атлас мира. М.: Изд-во АН СССР и ГУГК, 1964. 298 с.
19. Шамов Г.И. Сток взвешенных наносов рек СССР // Тр. ГПИ ГУГМС. 1949. Вып. 20 (74). 119 с.
20. Bobrovitskaya N.N. Long-term variations in mean erosion and sediment yield from the rivers of the former Soviet Union // IAHS Publ. 1996. № 236. P. 32–39.
21. Statistical methods in the Atmospheric Sciences // Int. Geophysics Ser. / Dmowska R., Hartman D., Rossby H.T. (Eds.). 2011. № 100. 676 p.
22. Tukey J.W. Exploratory Data Analysis. Reading, Mass. Addison-Wesley, 1977. 688 p.

REFERENCES

1. *Bol'shoe treshchinnoe Tolbachinskoe izverzhenie (1975–1976, Kamchatka)* [The Great Tolbachik Fissure Eruption (1975–1976, Kamchatka)]. Moscow: Nauka Publ., 1984. 638 p.
2. Goretzkaya Z.A. Patterns of suspended sediment yield distribution in Ukrainian rivers. *Tr. Ukr. NIGMI*, 1974, no. 127, pp. 122–132. (In Russ.).
3. Gorshkov G.S., Bogoyavlenskaya G.E. *Vulkan Bezymyannyy i osobennosti ego poslednego izverzheniya 1955–1963 gg.* [Bezymyanny Volcano and the Features of its Last Eruption in 1955–1963]. Moscow: Nauka Publ., 1965. 171 p.
4. Dedkov A.P., Mozzherin V.I. *Eroziya i stok nanosov na Zemle* [Erosion and Sediment Yield on the Earth]. Kazan': Kazanskii Univ., 1984. 264 p.
5. Evstigneev V.M. *Rechnoi stok i gidrologicheskie raschety* [River Runoff and Hydrological Computations]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1990. 304 p.
6. Kuskina L.V., Alekseevskiy V.I. Erosion zoning of the Kamchatka territory. *Geografiya i Prirodnye Resursy*, 2016, no. 2, pp. 132–141. (In Russ.).
7. Lisitsyna K.N. Suspended sediment yield in Siberia. *Tr. Gos. Hidrol. Inst.*, 1974, no. 210, pp. 48–72. (In Russ.).
8. Lisitsyna K.N., Aleksandrova V.I. Sediment yield of rivers in European part of the USSR. *Tr. Gos. Hidrol. Inst.*, 1972, no. 191, pp. 23–51. (In Russ.).
9. Lopatin G.V. Zones of suspended sediment concentration in Siberian and the Far East rivers. *Izv. VGO*, 1955, vol. 87, no. 1, pp. 23–31. (In Russ.).
10. Muravyev Ya.D., Klimenko E.S., Dmitrieva Ju.A. On GIS “Volcanic danger” creation. *Arcview*, 2010, no. 2(53), pp. 12–13. (In Russ.).
11. *Natsional'nyi atlas Rossii* [National Atlas of Russia], vol. 2: *Priroda. Ekologiya* [Nature. Ecology]. Moscow: Min. Transporta. Roskartografiya, 2007. 496 p.
12. Ozerov A.Yu., Karpov G.A., Droznin V.A., Dvigalo V.N., Demyanchuk Yu.V., Ivanov V.V., Belousov A.B., Firstov P.P., Gavrilov V.A., Yashuk V.V., Okrugina A.M. The September 7–October 2, 1994 eruption of Klyuchevskoi Volcano, Kamchatka. *Volcanol. Seismol.*, 1996, no. 18(5), pp. 3–16.

13. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR* [Resources of the Surface Water in the USSR], vol. 20: *Kamchatka* [Kamchatka]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1973. 366 p.
14. Sokolov I.A. *Vulkanizm I pochvoobrazovanie* [Volcanism and Soil Formation]. Moscow: Nauka Publ., 1973. 224 p.
15. *Stok nanosov, ego izuchenie i geograficheskoe raspredelenie* [Sediment Yield, its Study and Geographical Distribution], Karashev A.V., Ed. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1977. 240 p.
16. Tkacheva L.G. Suspended sediment yield of rivers in the Central Asia. *Tr. GGI*, 1974, no. 210, pp. 73–81. (In Russ.).
17. Tokarev P.I. Giant eruption of Shiveluch volcano November 12th, 1964, an ditsprognostics. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Fizika Zemli*, 1967, no. 9, pp. 11–22. (In Russ.).
18. *Fiziko-geograficheskii atlas mira* [Physical-geographical Atlas of the World]. Moscow: Akad. Nauk SSSR, GUGK, 1964. 298 p.
19. Shamov G.I. Suspended sediment yield of the USSR rivers. *Tr. GPI GUGMS*, 1949, no. 20(74). 119 p. (In Russ.).
20. Bobrovitskaya N.N. Long-term variation in mean erosion and sediment yield from the rivers of the former Soviet Union. *IAHS Publ.*, 1996, no. 236, pp. 32–39.
21. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Dmowska R., Hartman D., Rossby H.T., Eds. 2011. 676 p.
22. Tukey J.W. *Exploratory Data Analysis*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1977. 688 p.

Suspended Sediment Yield Characteristics Variability in Rivers of Kamchatka Krai

L. V. Kuksina

Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

e-mail: ludmilakuksina@gmail.com

Received December 02, 2017; revised December 02, 2017; accepted September 21, 2018

The regularities of spatiotemporal variability of suspended sediment yield characteristics were studied. Based on the analysis of difference-integral yield curves, it was found that most of the rivers in Kamchatka krai are characterized by the presence of two relatively long trends in the suspended sediment yield variability: an increase until the end of the 1970s–early 1980s, and its subsequent decrease. This regularity disturbs in rivers under the influence of volcanic eruptions, where the most significant increasing of sediment yield is observed after major eruptions. Existing maps of mean annual suspended sediment concentration and mean annual specific suspended sediment yield were significantly specified (18 instead 4 and 13 instead two zones were marked respectively). The map of grain-size distribution of suspended sediment was compiled (three zones was marked in region under study). Maximum values of mean annual specific suspended sediment yield (more than 500 t km⁻² yr⁻¹), suspended sediment concentration (more than 1000 g m⁻³) and grain-size of sediments are observed in water runoff of volcanic areas. Minimum values of suspended sediment concentration, specific suspended sediment yield, as well as grain-size of sediments characterized the mainland part of the krai.

Keywords: grain-size distribution of suspended sediment, suspended sediment concentration, water runoff, volcanism.