УДК 556.535.6

Л.В. Куксина¹

СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ РАСХОДА И МУТНОСТИ ВОДЫ НА РЕКАХ КАМЧАТСКОГО КРАЯ

Исследованы закономерности сезонной изменчивости взаимосвязи расхода и мутности воды рек на территории Камчатского края. Установлено, что на территории региона не наблюдается значительного разнообразия типов таких взаимосвязей. В большинстве случаев они описываются зависимостью, когда увеличению расхода воды обычно соответствует возрастание мутности воды, а на спаде происходит уменьшение содержания в воде взвешенных частиц (максимум стока взвешенных наносов опережает при этом дату максимального расхода воды). Показано, что существенным фактором, влияющим на нарушение зависимости между рассматриваемыми переменными, являются вулканические извержения. В результате анализа данных об измеренных расходах и мутностях воды показано, что для рек различных гидрологических районов Камчатского края характерны 4 типа взаимосвязи характеристик S-Q связей, отражающих специфический набор наиболее значимых факторов формирования сезонного стока взвешенных наносов. Установлено, что основную часть взвешенных частиц (до 90% и более) реки изучаемого региона переносят в период половодья и наиболее крупных паводков. При этом соотношение относительной мутности и расходов воды зависит от водности конкретного года.

 $Kлючевые\ c.noвa:\ S-Q\ cвязь,\ эффект\ гистерезиса,\ вулканическая\ деятельность,\ взаимосвязь\ расхода и мутности воды,\ сток\ взвешенных наносов.$

Введение. Формирование и изменение характеристик стока взвешенных наносов происходит под воздействием различных природных и антропогенных факторов в разных пространственно-временных масштабах. Эти факторы влияют на величину мутности речных вод, транспортирующую способность потока, соотношение стока взвешенных и влекомых наносов, что важно учитывать при решении многих научных и практических задач. Формы перемещения частиц, их состав, транспорт, переотложение, эрозия и аккумуляция продуктов эрозии – наиболее важные разделы теории транспорта минеральных частиц водными потоками. В частности, их изучение и использование актуально для организации эффективного и безопасного природопользования на территории Камчатского края. Интерес к исследованию стока взвешенных наносов рек рассматриваемой территории определяется также природными особенностями региона, для которого характерно сочетание традиционных и необычных факторов формирования стока взвешенных наносов рек, различающихся по характеристикам водного режима и источникам поступления минеральных частиц. Разнообразие факторов, определяющих специфику эрозионных процессов на водосборах и транспорта продуктов разрушения горных пород по русловой сети, дополняется отсутствием существенной техногенной нагрузки на режим мутности поверхностных вод (за исключением немногочисленных водотоков Камчатского края, находящихся в зонах производства горных работ). Специфика региона заключается в наличии на его территории многочисленных активных и потухших вулканов. Рыхлые вул-

каногенные отложения на их склонах создают особые условия для поступления минеральных частиц в поверхностные воды, ранее практически не изучавшиеся в России. Природные и антропогенные факторы изменения мутности определяют малоизученные для условий Камчатского края закономерности внутригодовых флуктуаций содержания в воде минеральных частиц. Их выявление важно для понимания механизмов русловых переформирований, способных ограничивать природопользование на освоенных участках рек, представлять опасность для социальных и производственных объектов в руслах рек и на их берегах. Одновременно они необходимы для определения экологических ограничений для некоторых видов хозяйственной деятельности. По данным Федерального агентства по рыболовству [Федеральное ..., 2017], рыбохозяйственный комплекс Камчатского края занимает первое место в Российской Федерации по использованию водных биологических ресурсов, выпуску рыбной продукции. Реки региона являются местами нереста многих видов ценных лососевидных промысловых рыб (чавычи, кижуча, кеты, нерки, горбуши и др.), развитие популяций которых во многом определено и даже лимитировано мутностью воды [Лешков, 1985; Опасные ..., 2014; Chalov, 2014].

Зависимость мутности от расхода воды в течение года может претерпевать существенные изменения в зависимости от сезона года [Syvitski et al., 2000; Walling, 1977], варьировать для отдельных фаз водного режима рек [Алексеевский, 1998; Тананаев, 2012; Diez et al., 1988; Slaymaker, 1991]. Данная взаимосвязь в редких случаях носит линейный ха-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, мл. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: ludmilakuksina@gmail.com

рактер [Williams, 1989], чаще она описывается более сложными зависимостями петлеобразной, экспоненциальной, логарифмической и других форм [Алексеевский, 1998; Williams, 1989].

Последние и наиболее полные обобщения данных по средним многолетним значениям мутности речных вод и модулю стока взвешенных наносов региона относятся к 1970-м годам. [Ресурсы ..., 1973; Сток наносов ..., 1977] и не учитывают современных гидрометеорологических условий поверхностного смыва и транспорта минеральных частиц в речной сети территории. Закономерности внутригодовой изменчивости характеристик стока взвешенных наносов рек Камчатского края ранее практически не изучались. В связи с этим основной целью статьи является исследование закономерностей сезонной изменчивости мутности и расхода воды в реках Камчатского края, выявление причин возникновения тех или иных типов связей, изучение зависимостей между различными их характеристи-

Материалы и методы исследований. Стационарные и специальные наблюдения за стоком взвешенных наносов, охватывающие весь годовой цикл изменения гидрологических характеристик в реке, позволяют провести анализ сезонных закономерностей хода мутности. Основой для подобной работы являются измеренные значения расходов воды Q и соответствующие им значения мутности воды S. Многообразие кривых вида S = f(Q) и наложенных кривых S(t), Q(t) (t - время), выделенных в работах [Алексеевский, 1998; Лопатин, 1958; Тананаев, 2012; Williams, 1989], характеризует особенности формирования стока взвешенных наносов в различные фазы водного режима в зависимости от разнообразных сочетаний процессов эрозии и последующего транспорта материала. Оно исчерпывается выделением пяти классов кривых вида S = f(Q) [Алексеевский, 1998; Williams, 1989]. І класс объединяет однозначные зависимости прямолинейного, экспоненциального и логарифмического вида (рис. 1, A). Зависимости вида IA, a, δ , θ возникают в том случае, если мутность и расход воды имеют синхронные пики, идентичное распределение и коэффициент асимметрии, но при этом необязательно совпадающие величины относительных изменений мутности и расхода воды. Типы зависимостей ІБ, ІВ получаются тогда, когда оба временных графика имеют синхронные пики, идентичную форму распределения и высоту пиков, но при этом разное количественное распределение. По всей видимости, появление различных типов однозначных зависимостей происходит в том случае, когда в системе имеется неограниченное количество наносов, кроме того, изменение мутности должно происходить синхронно с колебаниями расходов воды [Williams, 1989].

Связи II, III, IV и V классов включают криволинейные зависимости — симметричные петли различной направленности (по часовой и против часовой стрелки), асимметричные петли, петли в виде восьмерки (рис. $1, \delta$). Тип II, a возникает в водото-

ке в том случае, если пик мутности проходит раньше пика расхода воды и оба графика имеют примерно одинаковый коэффициент асимметрии, величина мутности в возрастающей части кривой превышает аналогичную величину в убывающей части при одном и том же значении расхода воды. Тип II, δ проявляется в том случае, если пики мутности и расхода воды совпадают, временные графики имеют разные коэффициенты асимметрии, при этом величина мутности в возрастающей части кривой превышает аналогичную величину в убывающей части при одном и том же расходе воды. Формирование взаимосвязи расхода воды и мутности по часовой стрелке объясняется двумя причинами. Во-первых, истощением запасов взвешенных наносов в системе перед тем, как пройдет максимум расхода воды вследствие малого количества наносов в системе или по причине длительного и мощного половодья (паводка). Во-вторых, формированием армирующего слоя перед прохождением пика расхода воды [Williams, 1989]. Типы III, a, III, δ аналогичны типу II с той разницей, что максимум расхода воды опережает максимум мутности. Петли такого типа (против часовой стрелки), вероятно, формируются вследствие трех основных причин. Первая причина связана с относительным временем добегания волны паводка и расхода взвешенных наносов, причем разница между ними увеличивается при движении вниз по течению. Вторая причина может быть связана с высокой эродируемостью почв и одновременно растянутым половодьем [Kung, Chiang, 1977]. Третья причина заключается в сезонной изменчивости в распределении осадков и поступления взвешенных наносов в систему [Shi et al., 1985].

Увеличение разницы в относительном распределении приводит к тому, что петли становятся асимметричными, возникают зависимости вида IV. Тип V, а проявляется в том случае, если в начале развития гидрологического события величина расхода воды и мутности изменяются полностью синхронно, а затем ситуация развивается аналогично типу II, а. Пример такой взаимосвязи величин описан на примере р. Оук Крик в штате Орегон, США [Milhous, 1973]. Поскольку данный тип представляет собой комбинацию типа I с типом II или III, то и его возникновение объясняется теми же причинами, что и для названных выше взаимосвязей. В некоторых случаях, когда должен формироваться тип II, a или тип III, a, их формирование не происходит, то в этих же условиях формируется тип V, δ , описанный в работе [Bobrovitskaya, 1967], однако точного объяснения его возникновению не найдено.

Для рек Камчатского края характерны лишь некоторые типы таких связей из реально существующего их разнообразия. Они выявлены на основе анализа данных стационарных наблюдений за расходами и мутностью воды по 60 постам на реках Камчатского края за период с 1951 по 1977 гг. (рис. 2). Большая часть постов (73%) располагается в бассейнах рек с площадью водосбора менее 2000 км², примерно четверть используемых данных

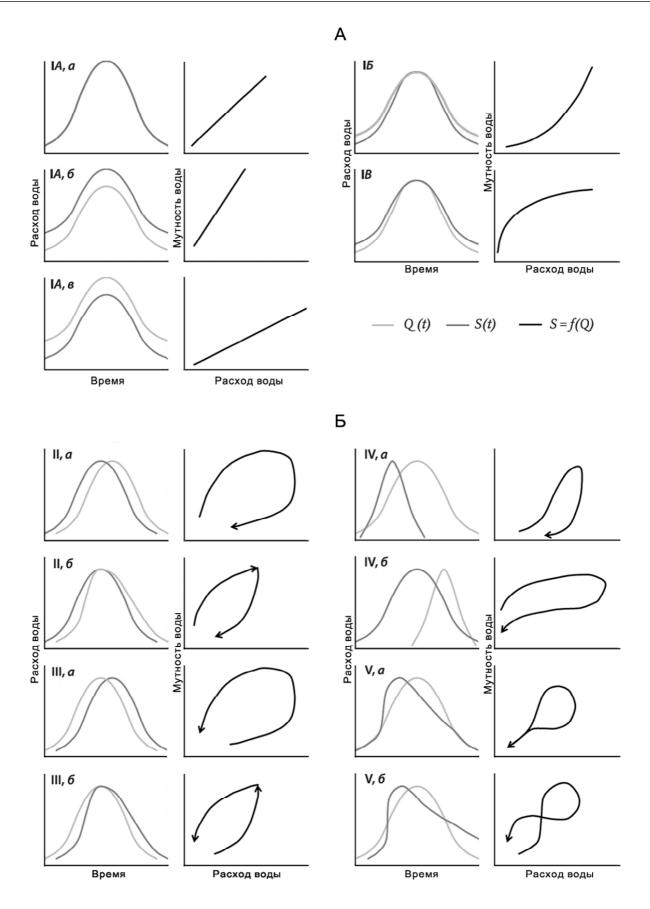


Рис. 1. Основные типы связей мутности и расходов воды: А – I класса, Б – II, III, IV, V классов (по [Williams, 1989])

Fig. 1. Main types of suspended sediment concentration and water discharge interactions: A - I class; B - II, B - II,

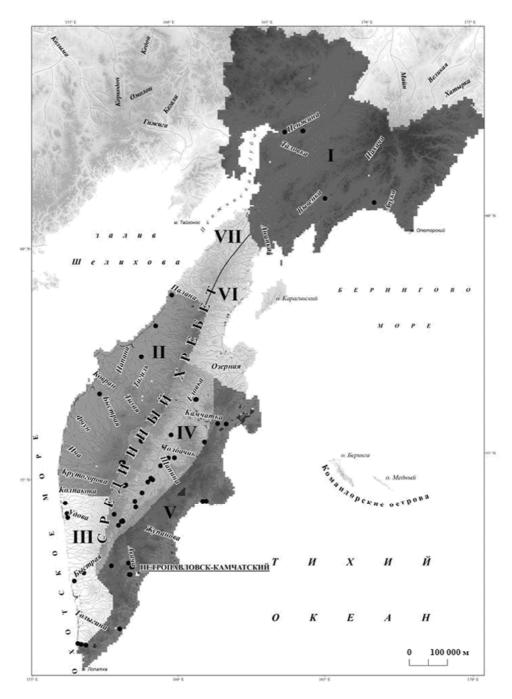


Рис. 2. Гидрологическое районирование Камчатского края (по [Куксина, Алексеевский, 2016; Ресурсы ..., 1973]) и распределение пунктов гидрологического мониторинга. Районы: I – Северный, II – Западный, III – Юго-Западный, IV – Центральный, V – Восточный, VI – Северо-Восточный, VII – неизученный район

Fig. 2. Hydrological regionalization of the Kamchatka Krai (according to [Kuksina, Alexeevsky, 2016; Resursy ..., 1973]) and distribution of hydrological monitoring stations. Regions: I – Northern, II – Western, III – South-western, IV – Central, V – Eastern, VII – Northeastern, VII – non-studied region

(24%) охватывает речные бассейны площадью 2000—50 000 км², остальные сведения (3%) приходятся на бассейны рек площадью более 50 000 км² (крупнейшие реки региона Камчатка и Пенжина).

Результаты исследований и их обсуждение. На территории Камчатского края не наблюдается большого разнообразия типов связей. Анализ подобных кривых показал, что наиболее распространенным типом для рек рассматриваемого региона является зависимость вида II, *a*, когда увеличению расхода

воды соответствует возрастание мутности воды, а на спаде наблюдается снижение содержания в воде взвешенных наносов, максимум стока взвешенных наносов при этом опережает максимальный расход воды (рис. 3, A). Она характерна практически для всех рек территории. Однако в отдельные годы на некоторых реках отмечаются другие типы связи между переменными: IA (рис. 3, Б, I), IE (рис. 3, Б, 2), IV, a (рис. 3, Б, 3). В этих случаях происходит изменение крутизны ветвей этой зависимости на

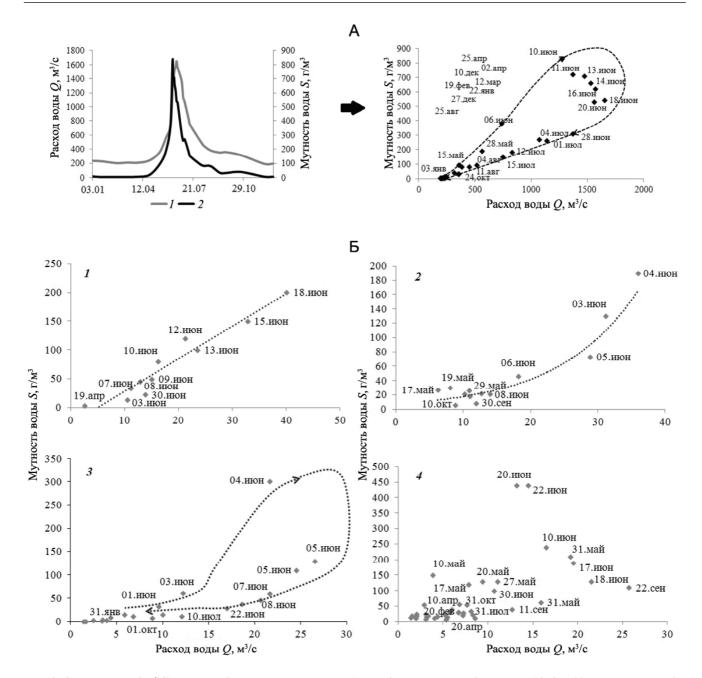


Рис. 3. Зависимости S=f(Q) для рек Камчатского края: — II, А – р. Камчатка — пгт. Козыревск, 1958 г. (I — расход воды, 2 — мутность воды); Б – I — IA, р. Уксичан — с. Эссо, 1976 г.; 2 — IБ, р. Уксичан — с. Эссо, 1977 г., 3 — IV, а — р. Уксичан — с. Эссо, 1972 г., 4 — отсутствие зависимости (р. Татьяна — с. Кроноки, 1975 г.)

Fig. 3. *S*=*f*(*Q*) relations for rivers of the Kamchatka Krai: A – II, a, the Kamchatka River – Kozyrevsk settl., 1958 (*I* – water discharge, 2 – suspended sediment concentration); Ε – *I* – IA, the Uksichan River – Esso settl., 1976; 2 – IB, the Uksichan River – Esso settl., 1977; 3 – IV, a, the Uksichan River – Esso settl., 1972; 4 – no interaction (the Tat'yana River – Kronoki settl., 1975)

подъеме и спаде уровней воды, формирование линейной или нелинейной связи, несовпадение изменения значений Q и S. Для ряда рек, расположенных в зоне активного вулканического воздействия [Муравьев с соавт., 2010] (р. Камчатка — уроч. Большие Щеки, р. Ольга, Татьяна, Кроноцкая, 1-ая Мутная и др.), выделение типа S-Q связи иногда бывает затруднительно (рис. 3, G, G), что связано с формированием поля точек без наличия выраженных тенденций. Вероятно, это обусловлено несинхронным изменением содержания взвешенных частиц в воде главной реки и ее притоков, дренирующих склоны и

подножия активных вулканов. В данном случае содержание в воде минеральных частиц обусловлено не водностью главной реки, а режимом поступления наносов из притоков.

Сложный характер зависимости между мутностью и расходом воды имеет р. Кроноцкая, вытекающая из оз. Кроноцкого и расположенная в непосредственной близости от действующих вулканов восточного вулканического пояса. Он обусловлен существенным влиянием вулканизма на режим сезонной изменчивости мутности. Это предположение доказывает анализ данных по реке, режим которой

также во многом обусловлен ее озерностью. Для р. Озерная, вытекающей из оз. Курильского и удаленной от зоны влияния вулканических выпадений, характерна хорошо выраженная петлеобразная зависимость между Q и S.

Анализ связи между мутностью и расходами воды позволяет выполнить обобщение по характеристикам этих связей для рек разных гидрологических районов Камчатского края [Ресурсы ..., 1973] (рис. 2, табл. 1). Он показал, что реки региона отличаются не только по синхронности изменения переменных, их большей или меньшей относительной трансформации. Реки также отличаются по датам начала возрастания и стабилизации мутности, формирования максимальной мутности, продолжительности и интенсивности нарастания и уменьшения мутности, ширине гистерезисных петель в зависимостях S = f(Q), интенсивности нарастания и уменьшения расхода воды, а также датам максимального расхода воды.

Возрастание мутности на реках Камчатского края в среднем начинается в первой декаде апреля — первой декаде мая. В отдельные годы начало интенсивного возрастания содержания взвешенных частиц в воде приурочено к прохождению крупных паводков. Поэтому даты этого события могут смещаться вплоть до второй декады октября.

Дата максимальной мутности на реках с ярко выраженным весенне-летним половодьем совпадает с максимумом водного стока или на несколько дней опережает его (приходится на последнюю декаду апреля – последнюю декаду июня). На реках, характеризующихся прохождением крупных паводков, дата максимальной мутности приурочена к пику паводка. Диапазон наступления даты максимальной мутности значительно шире – от первой декады мая до второй декады ноября.

Минимальная продолжительность и наибольшая интенсивность нарастания мутности характерна для рек Юго-Западного района. Максимальная интенсивность увеличения мутности характерна для рек Центрального района, что связано с особенностями их водного режима.

Наименьшая интенсивность возрастания мутности речных вод характерна для рек Северного гидрологического района, несмотря на то, что расходы воды здесь возрастают очень быстро.

Стабилизация мутности речных вод (мутность речных вод после наступления даты стабилизации не испытывает существенных колебаний) на территории Камчатского края наступает в период с первой декады июня до первой декады декабря. Начало процесса зависит от гидрологических особенностей конкретного года (наличие или отсутствие значительных паводков). Интенсивность уменьшения мутности значительно меньше интенсивности ее нарастания. Она изменяется в среднем в пределах от 2 до 5 г/м³ за сутки. Только для рек Восточного гидрологического района интенсивность достигает 11 г/м³ за сутки.

Средняя ширина петли, отвечающая разности значений мутности на подъеме и спаде половодья (паводка) для величины расхода воды, соответствующего норме стока воды, сильно изменяется по территории. Значения этой разности для гидрологических районов Камчатского края могут отличаться в 6 раз, достигая минимума в Северном, а максимума — в Западном районе.

Зависимости между характеристиками S-Q связей отражают наличие или отсутствие значимых факторов их формирования. Они существуют для большинства районов Камчатского края. Исключение составляют реки Северного и Юго-Западного гидрологических районов, для которых нет доста-

 $\ \, {\rm T\, a\, 6\, \pi\, u\, u\, a} \ 1 \\ \ \, {\rm \textbf{O}} {\rm \textbf{б}} {\rm \textbf{O}} {\rm \textbf{б}} {\rm \textbf{о}} {\rm \textbf{б}} {\rm \textbf{и}} {\rm \textbf{u}} {\rm \textbf{a}} \\ \ \, {\rm \textbf{O}} {\rm \textbf{F}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{u}} {\rm \textbf{v}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{u}} {\rm \textbf{v}} {\rm \textbf{e}} \\ \ \, {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{u}} {\rm \textbf{u}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{u}} {\rm \textbf{v}} {\rm \textbf{o}} \\ \ \, {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{u}} {\rm \textbf{u}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{u}} {\rm \textbf{u}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} \\ \ \, {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{u}} {\rm \textbf{u}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{u}} {\rm \textbf{u}} {\rm \textbf{o}} \\ \ \, {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{u}} {\rm \textbf{u}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{u}} {\rm \textbf{u}} {\rm \textbf{o}} \\ \ \, {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{u}} {\rm \textbf{u}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{u}} {\rm \textbf{u}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} \\ \ \, {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{u}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{u}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} {\rm \textbf{o}} \\ \ \, {\rm \textbf{o}} {\rm$

Период	Дата начала возраста- ния мут- ности	Дата макси- мальной мутности	Средняя продол- житель- ность нараста- ния муг- ности, сутки	Средняя интенсивность нарастания мутности, г/м³ в сутки	Дата стабили- зации мутности	Средняя продол- житель- ность уменьше- ния мут- ности, сутки	Средняя интенсив- ность уменьше- ния мут- ности, г/м ³ в сутки	Сред- няя ширина петли	Средняя интен- сивность нараста- ния рас- хода воды, м³/см в сутки	Средняя интенсив- ность уменьше- ния рас- хода воды, м ³ /сут в сутки	Дата макси- мально- го рас- хода воды
Пенжина – Каменское, Северный гидрологический район											
1965–1973	26,4–14,6	3,6–18,6	19	13	18,7–2,12	75	2	16	143	49	9,6–21,6
Тигиль – Тигиль, Западный гидрологический район											
1957–1974	14,4–20,5	29,4–27,6	15	18	24,6–21,9	82	4	98	20	2	3,5–2,7
Брюмка – Брюмка, Юго-Западный гидрологический район											
1971–1977	5,5–13,10	8,5–14,10	6	62	6,6–30,11	104	2	18	31	1	6,5–14,10
Камчатка – Козыревск, Центральный гидрологический район											
1951–1977	7,4–4,6	22,5–12,7	38	23	29,7–10,12	107	5	72	27	11	4,6–12,7
Авача – Елизово, Восточный гидрологический район											
1952–1977	4,5–16,10	28,5–18,11	13	49	6,7–14,11	67	11	69	20	3	5,6–2,7

точных данных наблюдений. Для этих районов выделены тенденции, характеризующие взаимосвязь значимых факторов. Для рек Северного гидрологического района хорошо связаны (коэффициент корреляции изменяется в диапазоне 0,7-0,8) даты начала возрастания и достижения максимальной мутности, даты максимальной мутности и ширины петли S-Q связи, продолжительности нарастания и уменьшения мутности, даты формирования максимальной мутности и продолжительности уменьшения мутности (табл. 2). Наиболее тесные взаимосвязи (коэффициент корреляции больше 0,9) характерны для даты начала и продолжительности возрастания мутности, интенсивности нарастания мутности и расходов воды, интенсивности нарастания и уменьшения мутности. Он также существенен для дат стабилизации и продолжительности уменьшения мутности, дат стабилизации мутности и ширины петли S-Q связи, продолжительности уменьшения мутности и ширины этой петли, интенсивности уменьшения мутности и увеличения расхода воды.

Для рек Западного гидрологического района наилучшая связь (корреляция составляет порядка 0.9) характерна для дат стабилизации мутности и продолжительности ее уменьшения, продолжительности и интенсивности уменьшения мутности. Несколько меньше коэффициент корреляции (0.6-0.8) между интенсивностью нарастания мутности и шириной петли S-Q связи, датами начала возрастания мутности и ее максимального значения, датой стабилизации мутности и интенсивностью ее уменьшения, продолжительностью уменьшения мутности и интенсивностью спада расходов воды.

Реки Юго-Западного гидрологического района характеризуются наличием значимых связей меж-

ду датами начала возрастания мутности и ее максимума, датами стабилизации мутности и интенсивностью ее спада, датами начала возрастания мутности и интенсивностью ее спада, а также датой максимального значения мутности воды, продолжительностью и интенсивностью уменьшения мутности, датой начала возрастания мутности и шириной петли S-Q связи, датой начала и интенсивностью нарастания мутности, интенсивностью нарастания и уменьшения мутности, интенсивностью нарастания и уменьшения мутности и шириной петли S-Q связи.

На реках Центрального гидрологического района можно выделить большое разнообразие типов зависимостей между характеристиками S-Q связи (линейные, экспоненциальные, логарифмические). Наиболее тесная взаимосвязь наблюдается для даты стабилизации мутности и интенсивности ее уменьшения (коэффициент корреляции больше 0,9). Корреляцией порядка 0,7–0,8 характеризуются связи интенсивности и продолжительности нарастания мутности, интенсивности роста расхода воды и мутности, дат достижения максимального расхода воды и мутности. Отличительной особенностью Центрального района является наличие связи между продолжительностью уменьшения мутности и шириной петли. Это соотношение (рис. 4) может быть описано двумя линейными зависимостями. Прямой линейный тип связи характерен при небольшой продолжительности уменьшения мутности в случае, когда в потоке достаточно наносов для реализации транспортирующей способности. В случае, когда продолжительность уменьшения мутности превышает 80 суток, наносов в потоке оказывается недостаточно, и ширина петли сокращается (обратное линейное соотношение).

Таблица 2 Матрица значений коэффициентов корреляции между различными характеристиками петель $S\!-\!Q$ связи для рек Северного гидрологического района Камчатского края

Фактор	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		<u>0,80</u>	-0,98	0,63	0,54	0,58	0,62	0,49	0,67
2			0,68	0,18	0,65	-0,70	0,25	-0,76	0,16
3				0,09	0,47	<u>0,73</u>	0,12	0,37	0,09
4					0,41	0,18	<u>0,96</u>	0,22	<u>0,96</u>
5						<u>0,99</u>	0,59	<u>0,95</u>	0,42
6							0,26	<u>0,96</u>	0,20
7								0,41	<u>0,93</u>
8									0,36
9									
<u>0,80</u>			прямая зависимость						
		0,98	обратная зависимо						

 Π р и м е ч а н и е. Факторы: 1 — дата начала возрастания мутности, 2 — дата максимальной мутности, 3 — продолжительность нарастания мутности, 4 — интенсивность нарастания мутности, 5 — дата стабилизации мутности, 6 — продолжительность уменьшения мутности, 7 — интенсивность уменьшения мутности, 8 — ширина петли S-Q связи, 9 — интенсивность нарастания расходы воды.

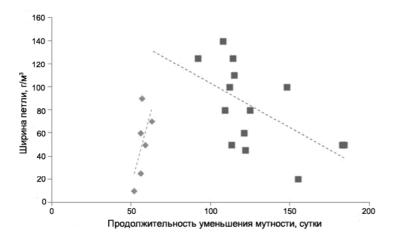


Рис. 4. Зависимость ширины петли от продолжительности уменьшения мугности на реках Центрального гидрологического района

Fig. 4. Dependence of loop width on the duration of suspended sediment concentration decreasing for rivers in the Central hydrological region

Наибольшая теснота взаимосвязи на реках Восточного гидрологического района характерна для дат начала возрастания мутности и ее максимального значения (как и на реках Северного, Западного и Юго-Западного районов), дат стабилизации мутности и ее уменьшения (характерно для всех районов территории за исключением Юго-Западного) (коэффициент корреляции больше 0,9). Коэффициент корреляции порядка 0,7 характеризует связь интенсивности нарастания расхода воды и ширины петли S-Q связи, выявленную только для рек данного района. Все обозначенные для данного района связи соответствуют линейным уравнениям. Увеличение

ширины петли с возрастанием расходов воды объясняется тем, что при интенсивном увеличении расходов воды происходит соответственно более интенсивный вынос наносов. Это приводит к меньшему их поступлению на спаде, таким образом, ширина петли оказывается больше при более стремительном нарастании водного стока.

Согласованность изменений параметров S-Q функции в основном обусловлена особенностями увеличения или уменьшения стока воды, соотношения между мутностью воды и предельной нагрузки потока минеральными частицами, массообмена между транзитным потоком и русловыми отложениями. Роль синоптических условий (осадков, температуры воздуха) менее значима (коэффициенты корреляции не превышали 0,3) и является косвенной. Тем не менее, весной на залесенных водосборах Камчатского края изменение мутности определяется процессами снеготаяния.

Внутригодовые закономерности изменения мутности речных вод определяются особенностями водного режима рек, характеризующегося на территории изучаемого региона тремя зональными и пятью азональными типами [Куксина, Алексеевский, 2016]. На реках, характеризующихся наличием ярко выраженного весеннего или весеннелетнего половодья, в этот период переносится основная масса взвешенных частиц. Для рек Камчатского края она в среднем составляет 80–95% суммарного годового стока наносов (табл. 3). В отдельные годы и на реках, которые характеризуются прохождением крупных летних паводков, пре-

Таблица 3 Внутригодовое распределение стока воды (верхняя строка) и взвешенных наносов (нижняя строка) для рек с различным водным режимом, % от суммарного годового стока

D	Месяц												
Река	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Реки с ярко выраженным половодьем													
Тылговаям	0,77	0,55	0,58	0,91	13,6	38,4	16,1	9,48	8,98	6,47	2,81	1,35	
Тылговаям	0,044	0,027	0,039	4,07	16,0	58,2	11,0	3,22	3,56	1,97	1,76	0,11	
Реки с паводками													
П	1,31	1,19	1,05	1,14	12,7	7,73	4,96	4,42	9,14	41,2	11,2	3,96	
Половинка	1,31 0,26	0,19	0,16	0,20	5,70	41,7	3,17	0,69	0,71	45,1	1,52	0,60	
Реки в зоне активного вулканизма													
	4,80	4,58	5,44	9,85	15,5	9,85	8,45	8,37	8,61	10,5	8,25	5,80	
1-я Мутная	1,78	1,73	2,27	9,15	28,2	10,4	8,30	9,52	6,59	12,4	6,20	3,46	
Реки, дренирующие склоны и подножия активных вулканов													
Большая	3,93	3,69	3,59	4,34	7,64	20,1	19,0	11,8	8,20	6,91	6,02	4,73	
Хапица	1,91	1,21	0,81	1,94	21,9	38,4	10,2	18,1	2,25	0,71	1,50	1,07	

вышающих по объему стока весеннее половодье, доля взвешенных наносов за период половодья уменьшается до 50%. Для рек с притоками, дренирующими территории активного вулканизма, характерно примерно равное распределение стока взвешенных наносов между периодом половодья и летне-осенних паводков.

Реки вулканических территорий основную часть стока взвешенных наносов переносят в период половодья и крупных паводков [Виноградов, Купцов, 1980], то есть в летне-осенний период (при отсутствии экстремальных паводков при извержениях в зимне-весенний период). Сочетание максимальных снегозапасов, значительных осадков в теплый период на склонах вулканов и слабой противоэрозионной устойчивости рыхлых вулканических отложений [Куксина, Алексеевский, 2016] приводит к тому, что в этот период водные потоки совершают наибольшую эрозионную работу. Мутность воды нередко достигает 1,0—6,0 кг/м³ (для рек с площадью водосбора F порядка 1000 км^2), а при F< 100 км^2 — до 600 кг/м^3).

Относительное внутригодовое распределение мутности воды (отношение мутности воды в *i*-й месяц года к среднему годовому значению) зависит от водности года. В многоводные годы на реках Северного гидрологического района относительное изменение расходов воды (отношение расхода воды в *i*-й месяц года к среднему годовому расходу воды) больше (примерно в два раза) относительных значений мутности. В средние по водности годы в период половодья характерно условие, когда относительная мутность превышает относительные изменения расхода воды. В период межени, наоборот, соотношение меняется на противоположное. В маловодные годы наблюдается синхронность относительных изменений расходов воды и мутности.

Колебания водного стока и мутности Западного и Юго-Западного районов не зависят от водности года. Относительные значения мутности больше значений стока воды в многоводный сезон года. В меженный период их соотношение имеет противоположный характер. Эта закономерность характерна и для рек Центрального и Восточного гидрологических районов. Она может нарушаться в отдельные маловодные годы.

Реки, испытывающие влияние активного вулканизма, отличаются большими значениями относительной мутности воды (по сравнению с относительной величиной расходов воды) в половодье многоводных и средних по водности лет. В годы пониженной водности основные различия сезонной изменчивости относительных расходов воды и мутности характерны для периода половодья.

Выволы:

- на территории Камчатского края не наблюдается большого разнообразия типов взаимосвязей расходов и мутности воды. Как правило, они описываются зависимостью вида II, а [Williams, 1989]. Сезонные закономерности изменения содержания взвешенных частиц в потоке для рек изучаемого региона соответствуют вариации мутности при колебаниях расходов воды. Увеличению расхода воды обычно соответствует возрастание мутности воды, а на спаде происходит снижение содержания в воде взвешенных частиц (максимум стока взвешенных наносов опережает при этом дату максимального расхода воды). Вулканические извержения являются фактором нарушения зависимости между переменными;
- для рек различных гидрологических районов Камчатского края характерны 4 типа взаимосвязи характеристик S-Q связей, отражающих специфический набор наиболее значимых факторов формирования сезонного стока взвешенных наносов;
- основную часть взвешенных частиц (до 90% и более) реки изучаемого региона переносят в периоды половодья и наиболее крупных паводков. При этом соотношение относительной мутности и расходов воды зависит от водности конкретного гола

Благодарности. Исследование выполнено за счет средств гранта № РНФ 17-77-10047. Автор статьи выражает огромную благодарность своему наставнику и учителю Н.И. Алексеевскому, с кем вместе мы разрабатывали разделы будущей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов. М.: Геогр. ф-т МГУ, 1998. 202 с.

Куксина Л.В., Алексеевский Н.И. Особенности пространственно-временной изменчивости водного стока рек Камчатского края // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 3. С. 1–11.

 $\bar{\it Лешков}$ В.Г. Разработка россыпных месторождений. М.: Наука, 1985. 568 с.

Лопатин Г.В. Опыт анализа зависимости средней мутности речных вод от главнейших природных факторов водной эрозии // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1958. № 4. С. 91–98.

Муравьев Я.Д., Клименко Е.С., Дмитриева Ю.А. К созданию ГИС «Вулканоопасность» // Arcview. 2010. № 2. Вып. 53. С. 12–13.

Опасные русловые процессы и среда обитания лососевых рыб на Камчатке. М.: Изд-во ВНИРО, 2014. 240 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. Т. 20. Камчатка. 366 с.

Сток наносов, его изучение и географическое распределение / Под ред. А.В. Караушева. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 240 с.

Тананаев Н.И. Эффект гистерезиса в сезонной изменчивости соотношения расхода и мутности воды рек криолитозоны Сибири и Дальнего Востока // Водные ресурсы. 2012. № 6. Т. 39. С. 598–607.

Федеральное агентство по рыболовству [Электронный ресурс]. http://www.fish.gov.ru (дата обращения 16.10.2017).

Bobrovitskaya N.N. Discharge of suspended sediments as a function of hydrologic characteristics // Soviet Hydrology: Selected papers. 1967. N 2. P. 173–183.

Chalov S.R. Effects of placer mining on suspended sediment budget: case study of north of Russia's Kamchatka Peninsula // Hydrological Sciences J. 2014. V. 59. № 5. P. 1081–1094

Diez J.C., Alvera B., Puigdefabregas J., Gallard F. Assessing sediment sources in a small drainage basin above the timberline in the Pyrenees // Sediment budgets. Proc. Porto Allegre Symposium. 1988. IAHS Publication № 174. P. 197–205.

Kung S.Y., Chiang T.C. Soil erosion and its control in small gully watersheds in the rolling loess area on the middle reaches of the Yellow River. Pering, 1977. 21 p.

Milkous R.T. Sediment transport in a gravel-bottomed stream. PhD thesis, 1973. 232 p.

Shi Y.L., Yang W., Ren M.E. Hydrological characteristics of the Changjiang and its relation to sediment transport to the sea // Continental Shelf Res. 1985. V. 4(1/2). P. 5–15.

Slaymaker O. Mountain geomorphology: a theoretical framework for measurement programmes // Catena. 1991. V. 18. P. 427–437.

Syvitski J.P.M., Morehead M.D., Bahr D.B., Mulder T. Estimating fluvial sediment transport: the rating parameters // Water Resources Research. 2000. V. 36. № 9. P. 2747–2760.

Walling D.E. Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin // Water Resources Research. 1977. V. 13. \mathbb{N}_2 3. P. 531–538.

Williams G.P. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers // J. Hydrology. 1989. № 111. P. 89–106

Поступила в редакцию 11.09.2017 Принята к публикации 12.03.2018

L.V. Kuksina¹

SEASONAL VARIABILITY OF WATER DISCHARGE AND SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION FOR RIVERS OF THE KAMCHATKA KRAI

Regularities of seasonal variability of water discharge and suspended sediment concentration interactions were studied for rivers in the Kamchatka Krai territory. The limited number of types of such interactions was established for the region. In most cases the increase of suspended sediment concentration usually coincides with increasing water discharge, and during the decrease of water discharge the reduction of suspended sediment concentration is observed. However, the maximum of suspended sediment concentration is in advance of the maximum water discharge. The volcanic activity appeared to be a significant factor impacting the disturbance of interaction between the variables. The analysis of data on measured water discharges and suspended sediment concentrations demonstrated that there are four types of *S-Q* relations for rivers in various hydrological regions of the Kamchatka Krai. They represent the most important factors influencing the formation of the seasonal suspended sediment yield. The largest part of suspended sediments (90% and more) is transported during the high water periods in rivers of the studied region. The ratio between relative suspended sediment concentration and water discharge depends on water amount in particular year.

Key words: S-Q relation, hysteresis effect, volcanic activity, interaction between water discharge and suspended sediment concentration, suspended sediment yield.

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project N_2 17-77-10047). The author is particularly grateful to her teacher and advisor N.I. Alekseevsky with whom we worked on structuring the paper.

REFERENCES

Alekseevskij N.I. Formirovanie i dvizhenie rechnyh nanosov. [Formation and transportation of river sediments]. Moscow: Faculty of Geography, MSU, 1998. 202 p. (in Russian).

Bobrovitskaya N.N. Discharge of suspended sediments as a function of hydrologic characteristics // Soviet Hydrology: Selected papers. 1967. $\[Mathebox{N}\]$ 2. P. 173 - 183.

Chalov S.R. Effects of placer mining on suspended sediment budget: case study of north of Russia's Kamchatka Peninsula // Hydrological Sciences J. 2014. V. 59. № 5. P. 1081–1094.

Diez J.C., Alvera B., Puigdefabregas J., Gallard F. Assessing sediment sources in a small drainage basin above the timberline in the Pyrenees // Sediment budgets. Proc. Porto Allegre Symposium. 1988. IAHS Publication. № 174. P. 197–205.

Federal'noe agentstvo po rybolovstvu [Federal agency on fishing] [electronic resource]. http://www.fish.gov.ru (assess date 16.10.2017).

Kuksina L.V., Alekseevskij N.I. Osobennosti prostranstvennovremennoj izmenchivosti vodnogo stoka rek Kamchatskogo kraja

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Junior Scientific Researcher, PhD in Geography; *e-mail*: ludmilakuksina@gmail.com

[Space and time variations of river runoff in the Kamchatka Krai] // Vodnye resursy. 2016. V. 43. № 3. P. 1–11 (in Russian).

Kung S.Y., Chiang T.C. Soil erosion and its control in small gully watersheds in the rolling loess area on the middle reaches of the Yellow River. Pering, 1977. 21 p.

Leshkov V.G. Razrabotka rossypnyh mestorozhdenij [Placer mining]. Moscow: Nauka, 1985. 568 p. (in Russian).

Lopatin G.V. Opyt analiza zavisimosti srednej mutnosti rechnyh vod ot glavnejshih prirodnyh faktorov vodnoj jerozii [Experience of the analysis of dependence of mean suspended sediment concentration in rivers on the main natural factors of water erosion] // Izv. AN SSSR. 1958. Ser geogr. № 4. P. 91–98 (in Russian).

Milkous R.T. Sediment transport in a gravel-bottomed stream. PhD thesis. 1973. 232 p.

Murav'ev Ja.D., Klimenko E.S., Dmitrieva Ju.A. K sozdaniju GIS «Vulkanoopasnost'» [On the creation of a «Volcanic danger» GIS] // Arcview. 2010. № 2. V. 53. P. 12–13 (in Russian).

Opasnye ruslovye processy i sreda obitanija lososevyh ryb na Kamchatke. [Hazardous channel processes and salmon habitats at the Kamchatka Peninsula]. Moscow: Izd-vo VNIRO, 2014. 240 p. (in Russian).

Resursy poverhnostnyh vod SSSR. T. 20. Kamchatka [Resources of surface water in the USSR. V. 20. Kamchatka]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973. 366 p. (in Russian).

Shi Y.L., Yang W., Ren M.E. Hydrological characteristics of the Changjiang and its relation to sediment transport to the sea // Continental Shelf Res. 1985. V. 4(1/2). P. 5–15.

Slaymaker O. Mountain geomorphology: a theoretical framework for measurement programmes // Catena. 1991. V. 18. P. 427–437.

Stok nanosov, ego izuchenie i geograficheskoe raspredelenie [Sediment yield, its study and geographical distribution] / Pod red. A.V. Karausheva. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977. 240 p. (in Russian).

Syvitski J.P.M., Morehead M.D., Bahr D.B., Mulder T. Estimating fluvial sediment transport: the rating parameters // Water Resources Research. 2000. V. 36. № 9. P. 2747–2760.

Tananaev N.I. Jeffekt gisterezisa v sezonnoj izmenchivosti sootnoshenija rashoda i mutnosti vody rek kriolitozony Sibiri i Dal'nego Vostoka [Hysteresis effect in the seasonal variations of the relationship between water discharge and suspended load in rivers of the permafrost zone in Siberia and Far East] // Vodnye resursy. 2012. № 6. V. 39. P. 598–607 (in Russian).

Walling D.E. Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin // Water Resources Research. 1977. V. 13. \mathbb{N}_2 3. P. 531–538.

Williams G.P. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers // J. Hydrology. 1989. № 111. P. 89–106.

Received 11.09.2017 Accepted 12.03.2018