

Н.И. Алексеевский

РЕЧНОЙ СТОК: ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ РОЛЬ И ИНДИКАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА¹

Рассмотрены географические функции речного стока, связанные с перемещением разнообразных видов веществ, тепла, с формированием и трансформацией энергии водных потоков. Установлено, что величина и изменчивость составляющих речного стока отражают специфику функционирования природного комплекса бассейнов рек (большого или меньшего размера) в конкретных ландшафтных условиях и при характерном уровне природопользования. Выполнена характеристика масштабных эффектов изменения стока воды, наносов, химических веществ и биологических субстанций по длине рек. Показано, что использование информации о пространственной и временной изменчивости составляющих речного стока – реальный путь к организации эффективной системы наблюдений над природными и антропогенными изменениями окружающей среды, к выявлению реакции компонентов природных и техногенных ландшафтов на климатические изменения и хозяйственные нагрузки.

В пределах практически любой территории формируются, изменяются и перемещаются потоки вещества и энергии. В конечном итоге они поступают в океаны и моря, озера и водохранилища. Величина указанных потоков находится в зависимости от специфики природных условий, а также вида и интенсивности антропогенных нагрузок на водосборы и водные объекты. Общий процесс перемещения рассматриваемых потоков называется речным стоком (Муравейский, 1960 и др.). Одновременно этот термин характеризует объем или массу разнообразных веществ, количество тепла, которые переносит водный поток за единицу времени (Чеботарев, 1978). В этом смысле водные потоки за некоторый момент времени t (с, сутки, месяц, сезон, год, век и т.п.) транспортируют некоторый объем воды WR , наносов SY , растворенных химических веществ CY . Поэтому вещественная часть речного стока

$$MY = WR + SY + CY + BY. \quad (1)$$

¹ Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект 09-05-00339), программы поддержки ведущих научных школ (НШ – 4964.2008.5), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (государственный контракт № 02.740.11.0336 и проект № П164).

Она включает и биологический сток BY – составляющую речного стока, которая введена в структуру уравнения (1) в последние десятилетия и дает представление о результирующем переносе в основном планктонных организмов через поперечное сечение русла реки (Алексеевский, 1993, 2000, 2004). Традиционно в состав речного стока включают и тепловой сток HY , имеющий другую (Дж) размерность. Для преодоления проблем объединения составляющих с различной размерностью можно сохранить за термином «речной сток» исключительно вещественные составляющие стока, а для качественной характеристики суммарного процесса переноса водными потоками вещества, тепла и энергии – использовать термин «геосток» или «географический сток» (Алексеевский, 2000).

Составляющие уравнения (1) отличаются между собой по абсолютной величине транспортируемого вещества. Наиболее значимый поток вещества формирует сток воды WR . Все другие составляющие речного стока меньше по величине и являются производными от стока воды, поскольку водные потоки, обладая необходимой энергией, осуществляют работу по перемещению содержащихся в воде веществ. Гидравлическая энергия водного потока $\mathcal{E} = f(WR, 1/N)$ возрастает при увеличении стока воды WR и (или) уклона водотока I . Изменение WR и величины I – соответственно возрастающая и убывающая функции размера (порядка N) рек. Изменение гидравлической энергии по длине русловых систем обуславливает специфику перемещения речных наносов, их накопление на участках рек или увеличение их стока в результате размыва речных отложений. Водоносность рек определяет величину и изменчивость других видов речного стока (i), поскольку

$$RR_i = k_i \overline{Q}_{i,i} \cdot T, \quad (2)$$

где k_i – характеристика, отражающая специфику транспортируемой субстанции. Для стока воды величина k соответствует ее плотности ($\rho \approx 1000 \text{ кг/м}^3$), для стока взвешенных наносов – средней за период времени T мутности воды s (кг/м^3), причем $s = s(\varphi, \lambda)$, где φ, λ – географические координаты. Соответствующие характеристики k_i для CY и BY равны минерализации $C = C(\varphi, \lambda)$ (кг/м^3) и биомассе $b = b(\varphi, \lambda)$ (кг/м^3). Чем больше средний расход воды $\overline{Q}_i = f(\varphi, \lambda, N)$ за время T и k_i , тем больше RR_i , даже если порядок реки $N = \text{const}$. Величина MY отражает конкретные условия трансформации атмосферных осадков в

сток воды WR вследствие специфического сочетания форм рельефа и литологического типа горных пород, зонального почвенно-ботанического покрова в пределах речного бассейна, других природных и техногенных факторов.

В произвольном створе реки перенос тепла

$$HY = c_p \cdot \rho \cdot \overline{Q}_{t,i} \cdot T \theta = c_p \cdot \rho \cdot \theta \cdot WR. \quad (3)$$

Он зависит от стока воды WR , удельной теплоемкости (c_p), плотности (ρ) и средней температуры воды θ . Величина теплового стока влияет на изменение составляющих вещественных потоков, учтенных уравнением (1), на состояние водных и наземных биоценозов. Наиболее ярким примером отепляющего влияния рек на состав растительности является смещение границы распространения лесов в сторону высоких широт по долинам крупных северных рек. Изменение теплового стока отражает интегральную реакцию объема воды в русловой сети территории на зональные и местные условия его нагревания и охлаждения.

Классическое содержание термина «речной сток» испытало значительные трансформации в XX в. Развитие водного хозяйства, приоритет задач удовлетворения потребностей населения, промышленного и сельскохозяйственного производства в воде обусловили преимущественное изучение проблем определения водных ресурсов рек, их изменчивости в пространстве и времени. В результате термин «речной сток» утратил свой первоначальный смысл. В основном он стал употребляться в качестве синонима термина «сток воды». Такое упрощение не способствует развитию теории гидрологической науки, ее методологических и практических приложений (Алексеевский, 2000, 2004). Цель данной статьи – исследование географической роли речного стока и оценка возможности использования информации об изменчивости составляющих стока для определения гидрологических последствий природопользования (изучения индикационных свойств речного стока).

Географическая и индикационная роль речного стока

Вода выполняет важнейшие (геосферную, ландшафтную, гидрологическую, экологическую и водохозяйственную) функции на нашей планете (Михайлов, Добровольский, 1991). Достаточно отме-

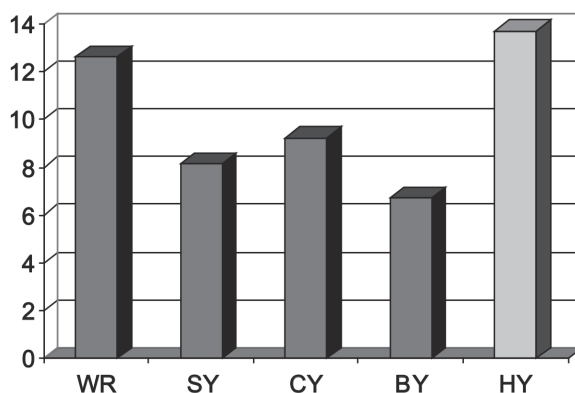


Рис. 1. Соотношение логарифмов абсолютных значений составляющих речного стока для реки с $N = 12$ в бассейне Оки (WR, SY, CY, BY – логарифм от величины стока воды, взвешенных наносов, растворенных веществ, биологических субстанций, кг и стока тепла HY, Дж)

тять, что с поверхности суши ежегодно в среднем за многолетний период в океан поступает $41,7 \times 10^{12}$ т воды (Мировой водный..., 1974), $15,7 \times 10^9$ т взвешенных наносов и до 4×10^9 т растворенных и взвешенных химических веществ (Walling, Webb, 1987). При среднем содержании планктонных организмов в речной воде 1,5 мг/л биологический сток в Мировой океан составляет $0,62 \times 10^{12}$ т. В зависимости от конкретных ландшафтных условий на характерной площади водосборного бассейна или для реки определенного порядка N (определенного в системе кодировки водотоков А. Шайдеггера) формируется больший или меньший сток веществ различного генезиса и тепла. Сопоставление объема переноса этих веществ в русле конкретного водотока обнаруживает абсолютное доминирование стока воды (рис. 1). В зависимости от размера рек и условий формирования в их бассейнах потоков вещества и тепла изменяются абсолютные значения этих потоков и величина речного стока, поступающего с суши в приемные водоемы.

Географическая роль речного стока наиболее полно обоснована в работах С.Д. Муравейского (1946, 1948, 1960). В них введены представления о том, что процессы формирования и перемещения воды, наносов, химических веществ и тепла являются связующим механизмом в совокупности взаимодействующих компонентов природных ландшафтов. Характеристики этих процессов, отражая реакцию не-

больших и крупных природных систем на изменение температуры и влажности воздуха, атмосферных осадков, стока воды и тепла, влияют на направленность и интенсивность процессов склоновой и овражной эрозии (сток наносов), химического выветривания (сток растворенных веществ), развития наземных и водных экосистем (сток биогенных и органических веществ). В результате локальные, районные, региональные, зональные и иные пространственно-временные закономерности изменения составляющих речного стока увязываются с характерным набором природных условий, свойственных конкретным водосборным территориям. Речной сток приобретает смысл количественного признака изменений состояния окружающей среды на глобальном, континентальном и бассейновом уровнях, мерой обмена веществом и энергией между компонентами природных и техногенных ландшафтов. Это позволяет использовать пространственно-временные закономерности изменения различных составляющих речного стока для определения роли физических, химических, биологических факторов, а также хозяйственной деятельности в изменении состояния и режима водных объектов суши, а также их бассейнов, отличающихся по размеру, комплексу природных условий, видам и интенсивности природопользования.

Взаимодействие между участками суши и Мировым океаном реализуется в форме обмена водными массами (Муравейский, 1946, 1948; Эдельштейн, 1991). Они связывают различные географические комплексы (наземные и аквальные ландшафты), реки, озера и водохранилища, сушу и океан, соответствуют местной, региональной и зональной величине составляющих речного стока. Изменение условий формирования водных масс сопровождается изменением отдельных или всех их параметров, нарушением сложившегося обмена веществом между сушей и океаном (Влагооборот..., 1973; Добровольский, 2002; Калинин, 1968; Клиге и др., 1993 и др.). Следствием этих нарушений является изменение соотношения между «внешними» и «местными» осадками для отдельных материков и их частей. Отношение внешних и местных осадков (коэффициент влагооборота) определяет сток воды (Калинин, 1968). Интенсивность внутриматерикового влагооборота возрастает при увеличении размера территории и испарения. Она уменьшается при большом влагосодержании внешних потоков воздуха. Коэффициент влагооборота является функцией высоты рельефа материков. В среднем за многолетний период над территорией Евразии транзитом проносится 8% внешней влаги. Для Австра-

лии транзит внешней влаги возрастает до 76%. Оставшаяся часть этой влаги выпадает на сушу в виде осадков (Эдельштейн, 1991). Абсолютная высота горных систем служит главным орографическим фактором их большего или меньшего выпадения из океанических воздушных масс, поскольку наличие гор определяет восходящий подъем воздуха, его охлаждение и повышенную интенсивность выпадения осадков. Вследствие этого изменяется структура материковых гидрологических циклов, составляющих речного стока (Эдельштейн, 2005). В зависимости от интенсивности внутриконтинентального влагооборота одни континенты являются перехватчиками влаги (Азия, Северная и Южная Америки), другие континенты или их части (Европа и Африка – для Азии, Австралия – для островов Океании) – донорами влаги. Континенты, преимущественно перехватывающие атмосферную влагу, доминируют в отношении выноса воды, наносов и т.п. в прибрежные зоны морей. Другие крупные участки суши оказывают меньшее влияние на обмен веществом с Мировым океаном. Химическая и биологическая составляющая речного стока при этом отражает совокупность физико-химических механизмов биотических и абиотических процессов, контролирующих водную миграцию химических элементов (Савенко, 1982).

Гидрологические состояние и режим водных объектов отдельных материков и их частей зависят от конкретных физико-географических условий. Географическая обусловленность гидрологических процессов, состояния водных объектов соединена с цельностью и неразрывностью природной среды, взаимосвязанностью и взаимобусловленностью всех компонентов ландшафта, включая природные воды. Эту закономерность наиболее четко характеризуют многочисленные территориальные гидрологические обобщения (Алекин, 1970; Воскресенский, 1962; Евстигнеев, 1990; Сток наносов., 1977 и др.). Они устанавливают соответствие характеристик речного стока, его режима с географическим положением речного бассейна, физико-географическими факторами водосборов, обеспечивают возможность интерполяции гидрологических характеристик. Такая возможность обосновывается законом географической зональности, предполагающим непрерывное и плавное изменение в пространстве природных факторов, включая и характеристики речного стока. Зональные закономерности изменения составляющих речного стока раскрываются методом географической интерполяции и наиболее ярко прослеживаются в том случае, если эти характеристики отражают измене-

ние условий тепло- и влагообеспеченности территории, а их величины нормированы для устранения масштабных эффектов, связанных с отличиями в площади бассейнов рек. При подобии площадей водосборов должно существовать подобие и характеристик речного стока (Евстигнеев, 1990; Христофоров, 1994).

В общем случае специфика гидрологических процессов прослеживается в различных масштабах времени. Это означает, что характеристики указанных процессов изменяются в масштабах времени от 10^0 до 10^{11} с и более. Они проявляются на всех характерных пространственных масштабах существования физических объектов, связанных с водой. Каждому из них соответствует некоторый характерный размер объекта. В спектр таких размеров входит диаметр нашей планеты, длина и ширина материков, длина рек, их однородных участков, русловых форм, диаметр взвешенных частиц и русловых отложений, молекулы воды. В зависимости от длины, площади или объема этих объектов находятся скорость и характерное время изменения состояния гидрологических объектов. Оно соответствует периоду времени, за который состояние и режим любого из таких объектов испытывает закономерно повторяющиеся изменения. При уменьшении линейных (площадных, объемных) размеров объектов их характерное время также уменьшается. Поэтому «элементарным кирпичикам» гидросферы соответствует минимальное, а всей гидросфере – максимальное характерное время изменения состояния. Закономерности изменения их состояния отвечают точечной идеализации развития элементарных объектов гидросферы. Они справедливы лишь для этого типа объектов, изменяются при переходе к объектам более крупным, для которых характерны другие закономерности изменения их состояния, возникающие как следствие изменения внешних факторов.

На планетарном уровне анализа гидрологических событий закономерности обмена водными массами между сушей и океаном проявляются в полной мере при сопоставлении характеристик этого процесса, осредненных за десятки, сотни лет и большие интервалы времени (Алексеевский, 1998). С другой стороны, состояние водных объектов зависит от особенностей локального и быстрого изменения гидродинамического состояния водных объектов, их реакции на изменение составляющих водного баланса, изменения содержания в воде взвешенных частиц, химических веществ, биологических субстанций, температуры. Оно является функцией другого набора факторов. Это обстоятельство позволяет понять суть проблемы противопостав-

ления значимости гидрологических закономерностей, характерных для местной и «быстрой» изменчивости гидрологических событий, и глобальных гидрологических процессов, реализующихся, например, в вековых масштабах времени. Закономерности перемещения отдельных минеральных частиц на участке поверхности дна вследствие пульсаций актуальных скоростей течения (Караушев, 1977) не могут считаться более значимыми по сравнению с закономерностями осадконакопления в Мировом океане (Лисицын, 1974). Это разные закономерности общего процесса перемещения и накопления литогенного материала, соответствующие особому сочетанию пространственных и временных масштабов осреднения характеристик этого процесса (Алексеевский, 2005).

При увеличении характерных размеров гидрологических объектов изменяется их длина, площадь, возникает ряд специфических свойств, которые не проявляются при небольшой длине потоков, площади акваторий и т.п. Продольное смещение русловых форм, например, связано с закономерностями перемещения минеральных частиц по поверхности русловых отложений, но процесс формирования и движения русловых форм отличают и собственные, специфические закономерности. Аналогично соотносятся, например, закономерности изменения местной и средней скорости потока в поперечном сечении русла. Очевидно, что между ними существует опосредованная связь. Однако законы изменения местной скорости обусловлены колебаниями локальной глубины, шероховатости поверхности дна, силы, направления ветра и т. п. Средняя же скорость зависит в основном от притока воды на участок реки, средней глубины, уклона и шероховатости русла на участке реки.

На уровне речных бассейнов географическая и индикационная роль речного стока уникальна, поскольку его отсутствие или резкое сокращение соответствует уменьшению интенсивности денудационных процессов, отражающему конкретное сочетание климатических, орографических, литологических, почвенно-ботанических факторов выветривания на данной территории, условий транспортировки, преотложения и трансформации переносимых субстанций. Под влиянием этих факторов речной сток и его отдельные составляющие закономерно изменяются по длине русловых систем, что определяет индикационные свойства составляющих речного стока, поскольку на их основе можно определять тенденции развития компонентов природной среды в пределах бассейнов водных объектов.

Отсутствие стока (процесса перемещения веществ различной природы в руслах постоянных и временных водотоков) даже при наличии воздушного переноса веществ или гравитационного перемещения минеральных частиц на склонах соответствует резкому ограничению природного разнообразия ландшафтов. Выпадение редких дождей в пустынных областях и формирование сети временных водотоков, например, соответствует относительно медленному изменению состояния ландшафтов таких территорий. Речной сток носит временный характер и в условиях очень холодного климата. Лишь в период летнего потепления здесь возможно формирование потоков талых вод, которые обуславливают перенос вещественных потоков на более низкие гипсометрические уровни. Они характеризуют интенсивность процессов обновления массы льда в ледниках, растворения химических соединений, входящих в состав горных пород и моренных отложений, скорость выноса к границе абляции минеральных включений и т.п. При отсутствии талых вод на участках горных оледенений сток обеспечивает лишь смещение льда по склонам. Движение льда вызывает эрозию и способствует переносу продуктов разрушения горных пород. Одновременно изменяются условия теплового воздействия вод на подстилающие горные породы, их растворения, переноса взвешенных частиц, развития водных биоценозов и прилегающих наземных экосистем.

Индикационные свойства стока максимально выражены в бассейнах постоянных водотоков. Равномерное или неравномерное изменение водоносности главной реки вследствие впадения притоков (рис. 2) формирует каскадную систему переноса потоков вещества различной природы и энергии вдоль элементов речной сети (Алексеевский и др., 2004). Ее отличительной чертой является участие самого малого элемента речного бассейна (и его ландшафта) в изменении гидрологического состояния более крупных рек и приемного водоема. За редким исключением относительно большие водотоки и ситуация в их бассейнах не оказывают прямого влияния на состояние даже смежных (и меньших по размеру) элементов русловой сети. В результате отсутствует и встречное (вверх по течению рек) движение вещества и энергии, связь между ландшафтами, занимающими низкое гипсометрическое положение, и ландшафтами, находящимися на большей высоте. Исключение составляют приливные и нагонные участки рек, узлы их слияния, участки рек выше зон формирования заторов и зажоров, где возможны переменные подпорные воздействия.

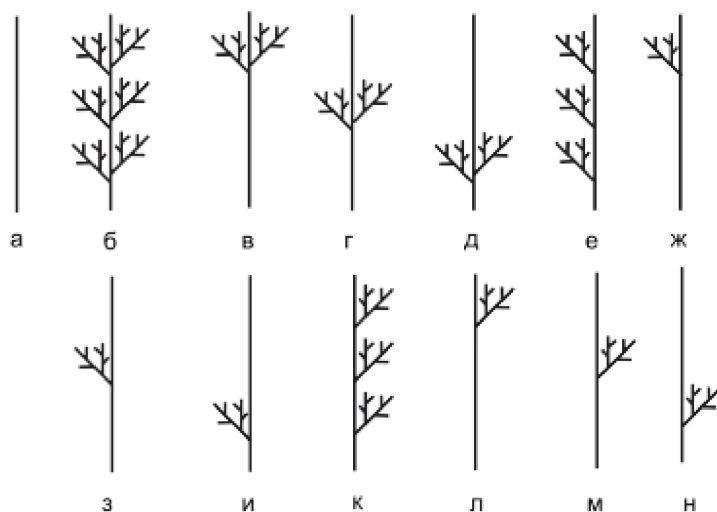


Рис. 2. Рисунки русловой сети водосборов (Алексеевский и др., 2004) и разнообразие типов трансформации составляющих стока по длине рек.

Русловая сеть: а – стволовая; б – симметричная равномерная; в – симметричная привершинная; г – симметричная Ф-образная; д – симметричная корневая; е – правобережная асимметричная равномерная; ж – правобережная асимметричная привершинная; з – правобережная асимметричная Ф-образная; и – правобережная асимметричная корневая; к – левобережная асимметричная равномерная; л – левобережная асимметричная привершинная; м – левобережная асимметричная Ф-образная; н – левобережная асимметричная корневая

В общем случае все составляющие речного стока изменяются под влиянием природных факторов и хозяйственной деятельности. Природная изменчивость стока рек обнаруживает зональные черты, обусловленные закономерной пространственной изменчивостью слоя и модуля стока (Воскресенский, 1962; Евстигнеев, 1990 и др.), средней многолетней мутности (Дедков, Мозжерин, 1984; Сток наносов., 1977 и др.), минерализации (Алекин, 1970; Никаноров, 1989 и др.), биомассы и температуры воды (в теплую часть года). При хозяйственном освоении ресурсов рек и их бассейнов возникает техногенное изменение величины некоторых или всех характеристик речного стока. В результате оказывается, что

$$RR_i = RR_e + RR_a, \quad (4)$$

где RR_e и RR_a – соответственно фоновая величина и техногенное изменение i -й составляющей речного стока.

Особенности изменения составляющих речного стока и их аномалий

Фоновые значения стока воды являются функцией зонального сочетания составляющих водного баланса речных бассейнов (Мировой водный..., 1974). Учет соотношения между ними показывает, что величина среднего многолетнего слоя стока сложным образом изменяется в пределах различных материков нашей планеты. Соотношение между стоком осадков и испарением в пределах одной зоны, слой стока зависят от высоты местности, ориентации орографических структур по отношению к господствующему направлению перемещения влагосодержащих воздушных масс (Воскресенский, 1962 и др.), а также от размера (площади водосбора F или порядка N) рек (Косицкий, 1999). При прочих равных условиях увеличение площади водосбора F сопровождается возрастанием среднего многолетнего расхода воды (табл. 1).

Пространственные изменения характеристик стока взвешенных наносов обусловлены вариацией интенсивности склоновой и овражной эрозии, которая зависит от ландшафтных особенностей территории, ее типа (равнина, плоскогорья, горы), литологии пород, доминирующих в пределах водосборных территорий, размера рек. Изменение природных условий на водосборах, видов, масштабов и интенсивности хозяйственной деятельности прослеживается в тенденциях изменения характеристик стока наносов (Сток наносов..., 1977). В условиях умеренного климата интенсивность эрозионных процессов возрастает при увеличении суммы атмосферных осадков, уменьшении площади лесов, в пределах возвышенностей и наличии легкоразмываемых пород (Дедков, Мозжерин, 1984 и др.). На этом фоне происходит увеличение средней многолетней мутности речных вод. Наоборот, равнинный характер местности, большие площади лесов, горных пород, отличающихся повышенной устойчивостью к эрозии, соответствуют пониженной интенсивности эрозионных процессов, относительно низкому содержанию в воде минеральных частиц, небольшому модулю стока взвешенных наносов. В пределах Российской Федерации и сопредельных стран выделяется 22 эрозионных района, в которых существует относительное подобие условий формирования мутности речных вод (Сток наносов..., 1977). Оно относительно, поскольку в пределах каждого района фоновая величина характеристик стока наносов может отличаться на порядок величины и больше вследствие изменчивости факторов, влияющих на интенсив-

Таблица 1. Реакция среднего многолетнего расхода воды ($\text{м}^3/\text{с}$) на изменение площади водосбора

№	Природная зона	$F, \text{км}^2$			
		100	1000	10000	100000
1	Тундра	10,3	47,9	223	1040
2	Тайга	2,24	17,2	132	1010
3	Смешанные и широколиственные леса	5,52	30	163	885
4	Лесостепи и степи	0,455	3,48	26,6	203
5	Полупустыни и пустыни	0,034	0,667	13	254
6	Саванны и редколесья	4,24	21,7	111	568
7	Жестколистные вечнозеленые леса	1,21	11,2	104	969
8	Переменно-влажные леса	6,21	32,1	166	856
9	Влажные экваториальные леса	6,28	40,4	259	1670

ность эрозионных процессов и условия транспорта минеральных частиц водными потоками. Тем не менее дальнейшая дифференциация эрозионных районов на подрайоны способна привести к повышению точности определения средней многолетней мутности воды, модуля стока взвешенных наносов, к возможности определения фонового значения стока наносов, соответствующих аномалий стока для анализа временной изменчивости этих характеристик под влиянием природных условий и хозяйственной деятельности.

Средний многолетний расход влекомых наносов G_0 зависит от водоносности и мощности водного потока, фракционного состава русловых отложений (ил, песок, гравийно-галечный и галечно-валунный материал) или типа горных пород, ограничивающих водный поток (несвязные отложения, связные грунты, скальные породы). Следовательно, природное или техногенное изменение этих факторов отражается на величине транспорта влекомого материала. Поскольку прямые измерения расхода влекомых наносов G не производятся, то фоновые его значения устанавливаются на основе специальных гидрологических расчетов. Для этого определяются ежедневные гидравлические характеристики, влияющие на интенсивность перемещения минеральных частиц по поверхности дна или линейные и динамические характеристики одного из типов гряд, в форме которых осуществляется транспорт влекомого материала (Знаменская, 1968 др.), устанавливается соответствие рассчитанных значений G и расходов воды, определение суточных расходов влеко-

мых наносов (Сток наносов..., 1977). Затем производится осреднение данных за год или иной интервал времени. Другой способ определения G_0 заключается в использовании средних значений геометрических и динамических характеристик гряд за основные фазы водного режима, являющихся функциями порядка рек, средней скорости за период повышенного и пониженного стока воды (Алексеевский, 1998). Поскольку в конкретных природных условиях одинаковому порядку рек соответствует разная их водоносность, активная ширина русел, продолжительность периода повышенного стока, то возникает природная изменчивость величины G_0 . Отклонения этой характеристики от фоновых значений могут рассматриваться в качестве реакции эрозионно-аккумулятивных систем бассейна реки или ее отдельного участка на изменение природных условий или антропогенных нагрузок.

Фоновые значения стока растворенных веществ CY отражают природную изменчивость условий химической денудации. В пределах России минерализация речных вод в целом возрастает при переходе от северных к ее южным регионам. Одновременно происходит закономерное изменение химического состава поверхностного стока (Алекин, 1970; Никаноров, 1989). В пределах конкретных водосборных территорий ионный сток меняется в зависимости от тенденций изменения стока воды. Сток конкретных химических соединений и элементов может при этом испытывать аналогичные или отличающиеся тенденции изменения по сравнению с ионным стоком (рис. 3).

Фоновые изменения биологического стока, доминирующую часть которого формируют планктонные организмы, изучены недостаточно (Геоэкологическое состояние..., 2007; Горбунов, 1976; Добровольская, 2003; Косицкий, 2003 и др.). Величина этого вида речного стока изменяется в зависимости от колебаний стока воды и биомассы планктонных организмов. Тип этой зависимости устанавливает уравнение (2). Увеличение водоносности реки и биомассы фито-, зоо- и бактериопланктона сопровождается возрастанием величины биостока BY . В общем случае $BY \sim WR$, где WR – сток воды. В дельте Волги, например, связь между этими переменными очевидна (рис. 4), хотя и не отличается существенной величиной корреляционного отношения.

Фоновые значения теплового стока HU изменяются (в соответствии с уравнением (3)) в зависимости от факторов, влияющих на водоносность рек и температуру воды в теплую часть года. В пределах одной природной зоны главным фактором изменения величин

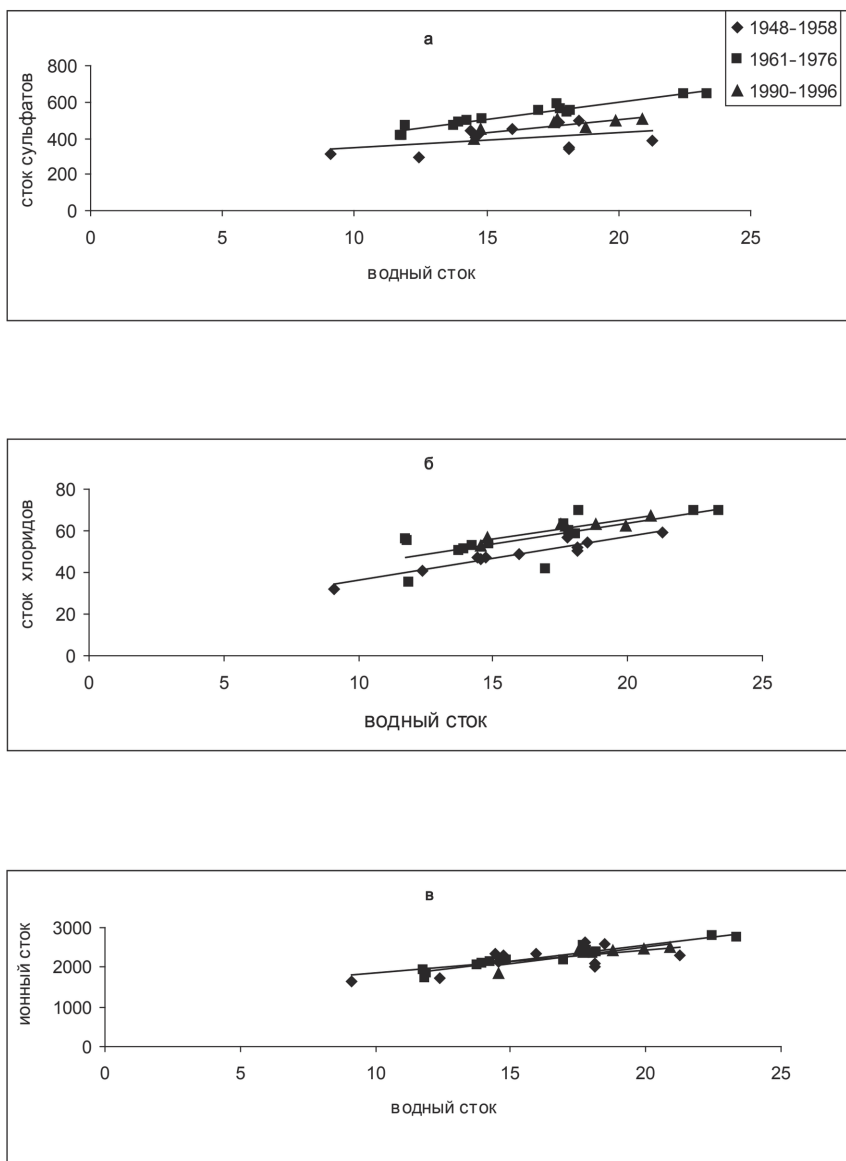


Рис. 3. Соотношение стока сульфатов (тыс. т):
(а), стока хлоридов (тыс. т) (б), ионного стока (тыс. т)
(в) и водного стока (млн. м³) (Онега, с. Порог)
для характерных периодов времени (Геоэкологическое состояние..., 2007)

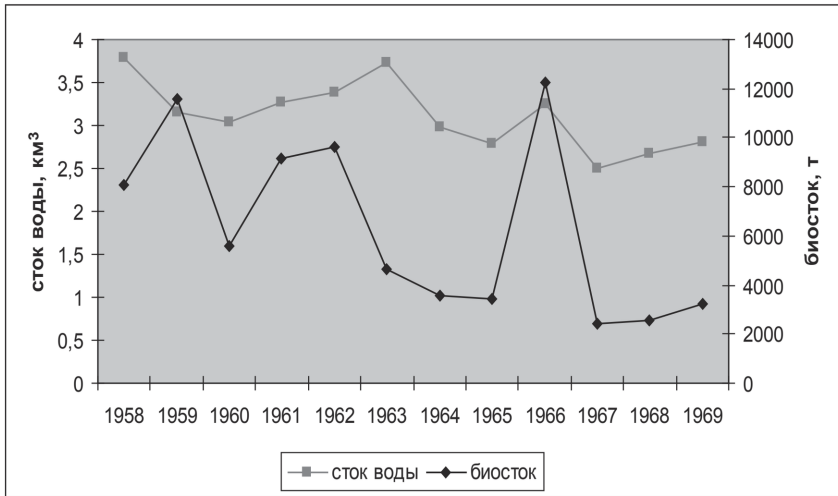


Рис. 4. Соответствие изменений стока воды и биологического стока в дельте Волги (по данным К.В. Горбунова, 1976)

ны HU является изменение стока воды. Реки примерно одинаковой водоносности отличаются по величине теплового стока, если температура воды в руслах рек изменяется в соответствии с географическим расположением их водосборов (рис. 5). Для крупных рек важным фактором изменения теплового стока является генеральное направление течения. При прочих равных условиях средняя температура воды уменьшается по направлению к устью рек, текущих в сторону полярных широт (рис. 6) и, наоборот, она возрастает, если реки несут воды в сторону более низких широт. Эта особенность связана с охлаждающим или обогревающим влиянием притоков на главную реку.

Большое научное и практическое значение имеет изучение аномалий составляющих речного стока (RR_a в уравнении (4)). Их выявление и оценка является составной частью исследований генезиса опасных гидрологических явлений, фоновых и актуальных изменений потребительских свойств водных ресурсов, вариации возобновляемых водных ресурсов (Евстигнеев 1990; Коронкевич, 1990; Фролова, 2006; Христофоров, 1993 и др.). В частности, их изучение необходимо для определения масштабов влияния техногенных нагрузок на состояние ландшафтов водосборных пространств и собственно рек.



Рис. 5. Климатическое изменение средней годовой температуры воды рек (площадь речных водосборов примерно одинакова)

Для южных регионов России эти нагрузки в первую очередь связаны с ирригацией. В бассейне Терека, например, потери стока к вершине дельты ΔQ , м³/с линейно связаны с увеличением площади орошаемых земель $\Delta F_{\text{ор}}$, тыс.га: $\Delta Q = -0,30 \Delta F_{\text{ор}}$ (Шикломанов, 1979). Техногенное преобразование поверхности бассейнов рек привело к значительному увеличению модуля стока взвешенных наносов M_R . Если до периода активного сельскохозяйственного освоения поверхности суши величина M_R не превышала 100 т/(км²×год), то в настоящее время она достигает 500 т/(км²×год) (Дедков, Можжерин, 1984). Вследствие хозяйственной деятельности наиболее мощное изменение испытывает сток растворенных веществ (Можжерин, Шарифуллин, 1988). Это связано с поступлением в реки промышленных, сельскохозяйственных и коммунально-бытовых сточных вод с различной степенью очистки (Антропогенные воздействия..., 2003). Однако и влияние диффузных источников загрязняющих веществ на химический состав вод может быть весьма ощутимым. Например, ионный сток степной реки Сок (левый приток Волги) искажен вследствие хозяйственной деятельности на 9% (Можжерин, Шарифуллин, 1988). Изменение химического состава речных вод под влиянием хозяйственной деятель-

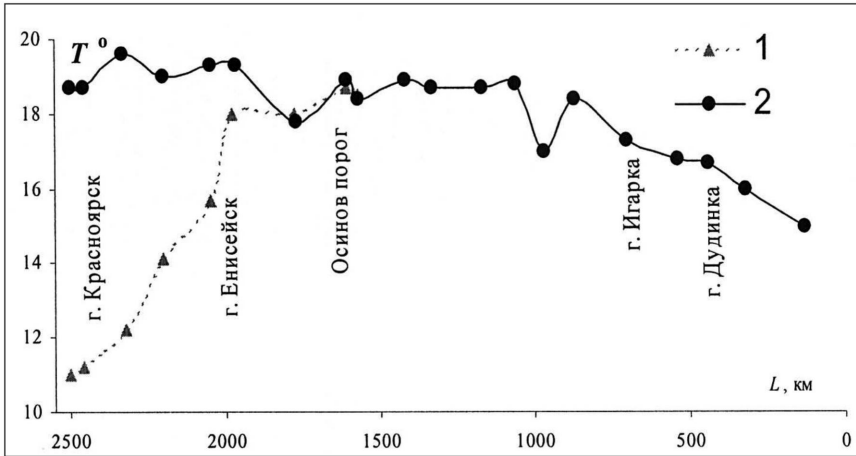


Рис. 6. Изменение летней температуры воды по длине Енисея после (1) и до создания Ангаро-Енисейского каскада ГЭС (2)

ности — главная причина трансформации биомассы планктонных организмов (Абакумов, 1991). Степень этой трансформации зависит от фонового содержания в воде лимитирующих видов химических веществ, массы и продолжительности их дополнительного поступления из сосредоточенных и диффузных источников. В частности, биомасса планктонных организмов может изменяться (относительно природного фона) и вследствие антропогенного изменения характеристик теплового стока. Изменение температуры воды — важный абиотический фактор развития водных биоценозов ниже выпусков подогретых сточных вод и в нижних бьефах водохранилищ (Горбунов, 1976; Леонов, 1977 и др.). После создания Ангаро-Енисейского каскада водохранилищ летняя температура воды ниже Красноярской ГЭС понизилась почти на 8°C (см. рис. 3), а ее антропогенное изменение прослеживается на участке реки длиной более 750 км.

Аномалии составляющих речного стока — физическая, химическая и биологическая причины изменения качества воды (Алексеевский, 2004), которые учитываются при анализе изменения потребительских свойств водных ресурсов. Даже при неизменной величине мутности, минерализации и биомассы качество речных вод будет улучшаться, если расход воды в реке возрастает по сравнению со средней его величиной для данной фазы водного режима и климатической зоны (порядок реки одинаков). Качество воды будет ухудшаться, если

расход воды и разбавляющая способность потока уменьшаются. При неизменной водоносности рек трансформация качества водных ресурсов во времени однозначно связана с природными или антропогенными аномалиями мутности, содержания в воде химических соединений и элементов, биомассы планктонных организмов. Степень изменения потребительских свойств объема воды на участке реки в первую очередь зависит от дополнительного появления в воде химических компонентов, их токсичности, а также бактериального загрязнения природных вод.

Масштабные эффекты изменения составляющих речного стока

При использовании индикационных свойств изменчивости составляющих речного стока и их аномалий необходимо учитывать масштабные эффекты их трансформации по длине русловой сети водосборных территорий. Масштабным эффектом называется закономерное изменение осредненных во времени характеристик речного стока при последовательном увеличении порядка реки на единицу в границах конкретного речного бассейна (Косицкий, 2003). Он в одинаковой мере прослеживается при анализе осредненных гидрографических, гидрологических, морфометрических и других характеристик рек с древовидной структурой русловой сети. Отношение величины составляющей (i) речного стока на участке реки с порядком $N+1$ к ее значению на участке водотока с порядком N называется коэффициентом масштабного изменения этой характеристики K_i . Чем больше величина K_i , тем больше интенсивность изменения гидрологических характеристик по длине рек (зональные условия формирования стока, виды и масштаб хозяйственной деятельности одинаковы). Увеличение порядка реки на единицу вызывает не только изменение характеристик речного стока, но и сопровождается образованием речного бассейна (и, следовательно, природно-территориального комплекса) более высокого иерархического уровня. Для такого бассейна составляющие речного стока, гидрографические и морфодинамические особенности системы «поток – русло» отражают взаимосвязь и совместное функционирование всех компонентов ландшафтной структуры соответствующей территории, что позволяет рассматривать речной бассейн любого размера (порядка) в качестве особой единицы организации природных комплексов (Корытный, 2001 и др.).

Масштабный эффект выявляется при сравнении осредненных характеристик системы руслового потока. Он утрачивается при переходе к анализу зависимости состояния участка реки, поскольку это состояние изменяется под воздействием определяющих факторов меньшего временного и пространственного осреднения. Зависимости характеристик стока от площади водосбора, длины или порядка водотока N не являются универсальными. Для крупных территорий они обнаруживают районный характер, поскольку в их пределах существует зональное изменение условий формирования составляющих речного стока, возможна орографическая, литологическая, почвенно-ботаническая, гидрографическая неоднородность этих условий, а также специфика видов и интенсивности природопользования. В общем случае произвольная и осредненная составляющая речного стока Γ связана с порядком рек N зависимостями типа

$$\Gamma = a \cdot e^{bN}. \quad (5)$$

Параметры a и b отражают пространственную изменчивость ландшафтных факторов формирования составляющих речного стока. При изменении N от 1 до 12 площадь частных бассейнов F в пределах водосбора Северной Двины возрастает от 7,5 до 12 600 км², длина реки – от 15 до 370 км, а уклон реки уменьшается от 0,0011 до 0,00017 (Косицкий, 2003; Алексеевский и др., 2004). Изменение значений F ($N = \text{const}$) связано и с дифференциацией территории по густоте речной сети (Евстигнеев, Шенберг, 2000). Чем больше эта характеристика, тем меньше площадь водосбора, на которой формируется река с $N = \text{const}$. Чем больше густота расчленения водосборной территории, тем выше скорость продольного увеличения размера водных потоков и вероятность вскрытия большего числа водоносных горизонтов. В этих условиях возникают предпосылки для формирования рек с большим зональным расходом воды (см. табл.1). Одновременно изменяются водный режим рек, режим транспорта наносов, гидрохимический режим водотоков и водоемов, состояние водных экосистем, режим русловых переформирований и устьевых процессов, что и определяет специфику функционирования конкретного речного бассейна при характерной структуре естественных и антропогенных ландшафтов. Для выявления этой специфики указанные изменения оцениваются при последовательном увеличении порядков рек, определенных по дихотомической схеме кодировки элементов русловой сети территории (Алексеевский, 1998; Коротыный, 2001 и др.).

Порядок реки – критерий подобия рек по условиям сосредоточения в их руслах воды, наносов, растворенных химических веществ и т.п. Он зависит от числа условно бесприточных водотоков, образующих первичную русловую сеть бассейна. В качестве рек первого порядка удобно принимать водотоки с длиной менее 10 км (Алексеевский, 2000). В близких природных условиях на единице площади водосбора существует примерно одинаковое их число. Изменение указанных условий означает, что на этой площади формируется больше или меньше притоков первого порядка, что и влияет на размер главной реки (Евстигнеев, Шенберг, 2000). Он влияет на водоносность и продолжительность фазы повышенного стока, средние за фазы водного режима гидравлические и морфометрические характеристики и т.п. Изменение порядков рек – главная причина возникновения масштабного эффекта изменения частных составляющих стока по их длине.

Исследование масштабных эффектов изменения характеристик речного стока заключается в поиске закономерностей увеличения или уменьшения этих характеристик по длине речных систем в различных физико-географических условиях. Величина масштабного коэффициента K_i для некоторой (i) осредненной за длительный интервал времени характеристики речного стока на участке реки, порядок которой равен $N+1$ и N , изменяется в довольно узком диапазоне значений. В зависимости от вида гидрологических характеристик величина K_i изменяется от 0,5 до 4,2 (Косицкий, 2003; Алексеевский и др., 2004). Минимальные значения K_i характерны для изменения уклона рек при увеличении их размера, а максимальные – для соответствующего изменения стока планктонных организмов. Увеличение размера реки от N до $N+1$ в разных природных условиях приводит в среднем к увеличению площади водосбора в 2 раза, ширины реки в 1,4 раза, нормы стока воды и ионного стока в 2 раза, среднего многолетнего расхода взвешенных и влекомых наносов соответственно в 2,2 и 1,4 раза.

При переходе от верховий к среднему и нижнему течению рек степень увеличения водоносности рек в значительной степени связана с зональными условиями формирования речного стока. В бассейне Печоры, где средние многолетние расходы воды максимальны ($N = \text{const}$), скорость продольного возрастания среднего многолетнего расхода воды Q_0 на верхних 1000 км в среднем равна $1,2 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{км})$. В верховьях Оки и Дона скорость его увеличения по длине рек со-

ставляет соответственно 0,54 и 0,27 м³/(с·км), что связано с отличием увлажненности территории в зоне тайги, смешанных, широколиственных лесов, лесостепей и степей (Косицкий, 2003). В одинаковых природных условиях продольное изменение стока зависит от числа притоков, впадающих в главный водный поток, и равномерности расположения их устьев. Поэтому продольное изменение осредненных характеристик речного стока часто определено типом рисунка речной сети (см. рис. 2).

Таким образом, речной сток выполняет комплекс функций, связанных с перемещением разнообразных видов веществ, тепла, формированием и трансформацией энергии водных потоков. Величина и изменчивость составляющих речного стока отражают специфику функционирования природного комплекса бассейнов рек большего или меньшего размера в конкретных ландшафтных условиях и при характерном уровне природопользования. Использование информации о пространственной и временной изменчивости составляющих речного стока и ее интерпретация – реальный путь к организации мониторинга над природными и антропогенными изменениями окружающей среды, выявлению реакции компонентов природных и техногенных ландшафтов на климатические изменения и хозяйственные нагрузки.

Литература

1. *Абакумов В.А.* Экологические модификации и развитие биоценозов // Экологические модификации и критерии экологического нормирования. Л.: Гидрометеиздат, 1991. С. 18–40.
2. *Абрамов Н.Н.* Надежность систем водоснабжения. М.: Стройиздат, 1979. 231 с.
3. *Алексеевский Н.И.* Генетический анализ качества воды // География. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. С. 224–228.
4. *Алексеевский Н.И.* Формирование и движение речных наносов. М.: МГУ, 1998. 202 с.
5. *Алексеевский Н.И.* Концепция геостока и состояние малых рек // Эроз. и русл. процессы. Вып. 13. М.: МГУ, 2000. С. 68–77.
6. *Алексеевский Н.И.* Экологическая гидрология и гидроэкология в системе наук // Гидроэкология: теория и практика. (Проблемы гидрологии и гидроэкологии. Вып. 2). М.: Геогр. фак. МГУ, 2004. С. 6–37.
7. *Алексеевский Н.И.* Некоторые особенности современного этапа развития гидрологии // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. № 1. 2005. С. 91–98.

8. *Алексеевский Н.И., Айбулатов Д.Н., Косицкий А.Г.* Масштабные эффекты изменения стока в русловой сети территории // География, общество и окружающая среда. Т. 6: Динамика и взаимодействие атмосферы и гидросферы / Под ред. проф. Н.И. Алексеевского и проф. С.А. Добролюбова. М.: Издательский Дом «Городец», 2004. С. 345–374.
9. *Алекин О.А.* Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 444 с.
10. Антропогенные воздействия на водные ресурсы России и сопредельных государств в конце XX столетия / Под ред. Н.И. Коронкевича, И.С. Зайцевой. М.: Наука, 2003. 367 с.
11. Влагооборот в природе и его роль в формировании ресурсов пресных вод. М.: Стройиздат, 1973. 348 с.
12. Воскресенский К.П. Норма и изменчивость годового стока рек Советского Союза. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 247 с.
13. Геоэкологическое состояние Арктического побережья России и безопасность природопользования / Под ред. Н.И. Алексеевского. М.: Геогр. фак. МГУ, 2007. 585 с.
14. *Горбунов К.В.* Влияние зарегулирования Волги на биологические процессы в ее дельте и биосток. М., 1976. 219 с.
15. *Дедков А.П., Мозжерин В.И.* Эрозия и сток наносов на Земле. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1984. 264 с.
16. *Добровольская Н.Г.* Пространственно-временные особенности распределения бактериопланктона равнинных рек // Эрозия почв и русловые процессы. 2003. Вып. 14. С. 94–103.
17. *Добровольский С.Г.* Климатические изменения в системе «гидросфера–атмосфера». М.: ГЕОС, 2002. 232 с.
18. *Евстигнеев В.М.* Речной сток и гидрологические расчеты. М.: Изд-во МГУ, 1990. 304 с.
19. *Евстигнеев В.М., Шенберг Н.В.* О возможностях оценок характеристик стока по структурным показателям речных систем // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. №4. 2000. С. 38–42.
20. *Знаменская Н.С.* Грядовое движение наносов. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 188 с.
21. *Калинин Г.П.* Проблемы глобальной гидрологии. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 377 с.
22. *Караушев А.В.* Теория и методы расчета речных наносов. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 271 с.
23. *Клиге Р.К., Воронов А.М., Селиванов А.О.* Формирование и многолетние изменения водного режима Восточно-Европейской равнины. М.: Наука, 1993. 128 с.
24. *Коронкевич Н.И.* Водный баланс Русской равнины и его антропогенные составляющие. М.: Наука, 1990. 205 с.

25. *Корытный Л.М.* Бассейновая концепция природопользования. Иркутск: Ин-т геогр. СО РАН, 2001. 163 с.
26. *Косицкий А.Г.* Особенности формирования речного стока в разных природных условиях // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 1999. №1. С. 56–60.
27. *Косицкий А.Г.* Масштабные эффекты изменения речного стока в различных природных условиях: Автореф. диссерт. ... к.г.н. М., 2003. 25 с.
28. *Леонов Е.А.* Изменение термического режима рек под влиянием хозяйственной деятельности // Труды ГГИ. Вып. 239. 1977. С. 49–77.
29. *Лисицын А.П.* Осадкообразование в океанах. Количественное распределение осадочного материала. М.: Наука, 1974. 438 с.
30. Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 638 с.
31. *Михайлов В.Н., Добровольский А.Д.* Общая гидрология. М.: Высшая школа, 1991. 368 с.
32. *Мозжерин В.И., Шарифуллин А.Н.* Химическая денудация гумидных равнин умеренного пояса. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1988. 193 с.
33. *Муравейский С.Д.* Процесс стока как географический фактор // Изв. АН СССР. Сер. географ. и геофиз. 1946. Т. 10. №3. С. 293–300.
34. *Муравейский С.Д.* Роль географических факторов в формировании географических комплексов // Вопросы географии. 1948. Сб. 9. С. 95–110.
35. *Муравейский С.Д.* Реки и озера. Гидробиология. Сток. М.: Географгиз, 1960. 388 с.
36. *Никаноров А.М.* Гидрохимия. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 351 с.
37. *Савенко В.С.* Физическая гидрохимия – ее задачи и перспективы // Вестник Моск. ун-та. Сер.5. География. 1982. №1. С. 9–15.
38. Сток наносов, его изучение и географическое распределение / Под ред. А.В. Караушева. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 240 с.
39. *Фролова Н.Л.* Гидрология рек (антропогенные изменения речного стока). М.: Геогр. фак. МГУ, 2006. 112 с.
40. *Христофоров А.В.* Надежность расчетов речного стока. М.: Изд-во МГУ, 1993. 166 с.
41. *Христофоров А.В.* Теория случайных процессов в гидрологии. М.: Изд-во МГУ, 1994. 139 с.
42. *Чеботарев А.И.* Гидрологический словарь. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 308 с.
43. *Шикломанов И.А.* Влияние хозяйственной деятельности на речной сток. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 302 с.
44. *Эдельштейн К.К.* Особенности материковых звеньев глобального гидрологического цикла // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1991. №3. С. 95–102.

45. Эдельштейн К.К. Гидрология материков. М.: Изд. центр «Академия», 2005. 304 с.
46. Walling D.E., Webb B.W. Material transport by the words river // IANS Publ. 1987. № 164. P. 313–329.

N.I. Alekseevskiy

RIVER RUNOFF: GEOGRAPHICAL ROLE AND INDICATIVE PROPERTIES

Main geographical functions of the river runoff connected to matter and heat transition and formation and transformation of the flow energy are investigated. It is found out that the size and variability of runoff characteristics reflect the specificity of drainage basin functioning in the conditions of existing landscapes and distinctive level of environmental management. The analysis of scale effects changes of the flow, sediments, dissolved solids and biological substations are given. It is showed that information on spatial-temporal inequality of runoff characteristics allows to organize efficient system of environment monitoring and to educe the reaction of environment and technogenic landscapes on climatic changes and changes in human impact.