

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА СТОКА РЕК И СТЕПЕНИ ЕГО ЕСТЕСТВЕННОЙ ЗАРЕГУЛИРОВАННОСТИ НА ПАРАМЕТРЫ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ

Речной бассейн рассматривается как сложная нелинейная динамическая система (хаотическая, в общем случае), генерирующая многолетний ряд стока в замыкающем створе. Для характеристики поведения системы используются динамические параметры. Проведено исследование влияния режима стока рек и степени его естественной зарегулированности на значения динамических параметров системы. Показано, что значения временной задержки τ и корреляционной размерности D временных рядов семи сибирских горных и равнинных рек сильно зависят от коэффициента естественной зарегулированности ϕ , выражающего долю базисного стока в общем объеме стока реки за год.

Традиционно процесс формирования водности рек, обуславливающий закономерности ее временной изменчивости, рассматривался как результат действия большого числа факторов, что определяло преимущественно стохастический подход к изучению этих закономерностей [1]. Однако результаты гидрологических исследований последнего десятилетия углубляют представления о детерминированной природе стока и свидетельствуют о присутствии детерминированного хаоса в многолетних рядах наблюдений с разным интервалом осреднения на реках, протекающих в разных районах мира с сильно различающимися природными условиями и разной степенью выраженности сезонного характера гидрологического режима [2, 3]. Наши исследования [4] позволяют предполагать присутствие детерминированного хаоса также в рядах наблюдений за стоком сибирских рек. При этом возникает вопрос: каким образом характеристики хаотической динамики систем зависят от факторов климата и характеристик речных бассейнов, определяющих многолетнюю изменчивость стока и его естественную зарегулированность. Исследование этого вопроса и определяет цель работы.

Теория и методы исследования

Авторы статьи исходят из предположения, что временной ряд стока на выходе системы «черный ящик» (в замыкающем створе речного бассейна) отражает детерминированный процесс стокообразования в бассейне и воздействие случайного «шума», а также содержит в себе признаки детерминированного хаоса. При этом речной бассейн рассматривается как нелинейная динамическая колебательная система.

Динамическая система – это объект, состояние которого изменяется во времени в результате действия детерминированного оператора эволюции, т.е. будущее состояние системы $y(t)$ для любого $t > t_0$ однозначно определяется начальным состоянием $y(t_0)$: $y(t) = F[y(t_0)]$, где F – детерминированный закон. Параметры нелинейной системы зависят от ее текущего состояния, создавая условия для саморегулирования системы. В работе [5, С. 252] предлагается категория «реальной динамической системы», для которой «...возможно ввести понятие состояния в каждый момент времени и предположить, что существует непрерывный или дискретный оператор, приближенно описывающий ее эволюцию (во времени и/или в пространстве). При этом под шумом можно понимать внутренние или внешние флуктуации или воздействие большого числа факторов, ока-

зывающих слабое влияние на поведение системы и по этой причине не учтенных при задании состояния. Тогда минимальное количество независимых координат, достаточное для описания состояния системы в заданном приближении, можно назвать ее размерностью».

Поведение динамической системы изображается в виде фазовой диаграммы – графика, координатами которого являются динамические переменные $x_j(t)$, ($j = 1, 2, \dots, n$), необходимые для задания состояния системы в фиксированный момент времени t . Так как мгновенное состояние системы определяется n -мерным вектором $x(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}$ в фазовом пространстве, этому состоянию соответствует точка, описывающая по мере эволюции системы фазовую траекторию. Установившемуся режиму соответствует предельное множество траекторий – аттрактор. Размерность аттрактора (геометрического объекта, характеризующего поведение системы в фазовом пространстве) всегда меньше размерности фазового пространства n системы, в которое он вложен.

Реконструкция аттрактора производится методом временной задержки и представляет собой вложение одномерного ряда наблюдений в многомерное фазовое пространство для представления скрытой в наблюдениях динамики. Н. Паккард с соавт. и Ф. Такенс в начале 1980-х гг. показали, что в качестве координат состояния динамической системы в момент времени t можно использовать сами значения наблюдаемого временного ряда $y(t)$, взятые с запаздыванием (задержкой) на некоторый интервал времени τ . Фазовые траектории представлены при этом множеством векторов

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\} = \\ &= \{y(t), y(t + \tau), y(t + 2\tau), \dots, y(t + (n-1)\tau)\}, \end{aligned}$$

где размерность пространства вложения n должна обязательно превышать размерность d заключенного в него аттрактора. Формула обратима, т.е. вместо следующих за $y(t)$ значений временного ряда в качестве фазовых координат можно использовать предыдущие его значения, взятые со сдвижкой τ относительно друг друга. Для реконструкции аттрактора предварительно определяется временная задержка τ и размерность фазового пространства n .

Поскольку наблюдаемые временные ряды изначально зашумлены, безошибочно различить стохастическую и детерминированную хаотическую системы очень сложно, поэтому для изучения динамики системы рекомендуется использовать комплекс методов, взаимно дополняющих друг друга [2]. Набор методов анализа и прогноза поведения гидрологических систем

включает, во-первых, статистические методы предварительного анализа данных наблюдений и, во-вторых, специфические методы анализа и прогноза нелинейной динамики. К первой группе методов относится оценка базовых описательных статистик, автокорреляционной функции (АКФ) и спектра мощности Фурье. Вторая группа взаимосвязанных методов включает: 1) реконструкцию аттрактора в фазовом пространстве; 2) расчет и анализ динамических инвариантов (корреляционный интеграл, корреляционная размерность D , энтропия Колмогорова K и др.); 3) метод ложных ближайших соседей; 4) нелинейное прогнозирование (локальное – методом ближайших соседей и глобальное – например, с помощью нейронных сетей); 5) исследование нелинейности с помощью рядов суррогатных данных, генерированных линейной моделью. Подробное описание этих методов имеется в литературе по анализу временных рядов [1, 2, 5–8]. В расчетах нами использовался пакет анализа временных рядов TISEAN [8] и программа В.В. Сычева Fractan 4.4 (<http://impb.psn.ru/~sychyov/>). Задачи и полученные нами при применении этих методов результаты приведены в [4]. Ниже дается географическая интерпретация основных параметров динамических систем.

Исходная информация

Предварительно нами выполнен отбор объектов исследования исходя из трех следующих критериев: 1) наличия достаточно продолжительного ряда режимных гидрометрических наблюдений в замыкающем створе речного бассейна, 2) неодинаковости физико-географических условий формирования стока при переходе от одного рассматриваемого бассейна к другому и 3) отсутствия в бассейнах исследуемых рек существенных антропогенных воздействий, влияющих на величину стока и его зарегулированность (сосредоточенный забор и сброс воды, регулирование стока гидроузлами и т.п.).

Ряды имеют единый интервал осреднения, равный 1 декаде, и состоят из средних за 10 суток расходов воды, наблюдаемых на 7 реках Западной Сибири и Алтая за период наблюдений 1958–1988 гг. (31 год, или 1116 декад): реки Бия у Бийска, Томь у Новокузнецка, Чая у Подгорного, Икса у Плотниково, Кеть у Максимкина Яра, Васюган у Среднего Васюгана и Обь у Салехарда (табл. 1). Исследуемые бассейны существенно различаются по условиям формирования стока: 1) они имеют разные размеры – от 2,953 млн км² у Оби до г. Салехард до 2,56 тыс. км² у р. Икса до с. Плотниково; 2) представлены горная и равнинная территории (бассейны рек Томи и Бии расположены в горах и предгорьях, остальные реки – равнинные, протекают в лесной зоне, река Обь у Салехарда – огромная река с полизональным режимом, ее гидрологический режим формируется сначала в горах, а затем на равнине, в разных природных зонах – от степи до лесотундры); 3) реки Томь и Бия имеют разную степень озерного регулирования (последняя вытекает из Телецкого озера); 4) бассейны равнинных таежных рек имеют разное геологическое строение и разную долю подземного питания – на левобережье Оби состав грунтов дренируемой толщи глинистый, на правобережье – преимуще-

ственно песчаный, что определяет более низкую величину и долю подземного стока рек в общем объеме стока за год у рек левобережной части бассейна Оби, а поэтому – и меньшую степень зарегулированности стока.

В течение рассматриваемого периода наблюдений направленные многолетние изменения режима стока, обусловленные изменениями климата, прослеживаются еще достаточно слабо.

С точки зрения характеристики шума в гидрологической системе, а именно величины и характера (аддитивность, мультипликативность) шумовой составляющей исследуемых рядов, важен вопрос о точности определения расходов воды с разным интервалом осреднения.

Расходы воды Q в реках измеряются не ежедневно. Ежедневные расходы воды вычисляются в зависимости от измеренных уровней по кривой расходов $Q = f(H)$, построенной по результатам одновременных измерений расхода и уровня воды в период открытого русла. Точность определения ежедневных расходов воды зависит от точности отдельных измерений расходов, частоты измерений, их распределения по гидрологическим сезонам и способа вычисления ежедневных расходов [9]. При осреднении ежедневных расходов воды, например при получении средних за декаду расходов, случайная погрешность их определения снижается примерно в 3 раза.

Для большинства исследуемых сибирских рек на участках постов гидрологических наблюдений, по данным Гидрометслужбы РФ, характерны следующие условия: 1) относительная стабильность или слабая деформированность русла; 2) наличие широкой поймы с протоками (в том числе и у таких рек, как Бия и Томь) – например, на р. Кеть у пос. Максимкин Яр в период половодья при уровне 750 см в пойме действуют 3 протоки, по которым проходит около 7% общего стока, при уровне 800 см – 4 протоки, по которым проходит 20% общего стока, а при уровне 835 см по всем протокам проходит около 25% общего стока, при этом расходы воды на пойме не измеряются; 3) продолжительный ледостав (около 6 месяцев) в зимний период; 4) прохождение ледохода в начале половодья; 5) при ледоходе могут образовываться заторы льда; 6) наличие петлеобразных кривых расходов на равнинных реках (Чая, Кеть, Васюган). Все эти условия определенным образом влияют на точность измерения и подсчета расходов воды в разные сезоны года.

Таким образом, временные ряды расходов воды содержат не только динамическую составляющую, но и случайный «шум», связанный с неточностью измерения расходов и их подсчета по кривой $Q = f(H)$. Шумовая составляющая может при наличии ледовых явлений превышать 20% расхода воды. При этом шум в чистом виде не является ни аддитивным, ни мультипликативным. Более того, в период половодья расходы воды в многоводные годы могут быть занижены на несколько процентов из-за недоучета стока в пойме. Все это затрудняет динамический анализ рядов стока и снижает точность оценки параметров динамических систем.

**Гидрографические характеристики речных бассейнов
(по материалам Государственного водного кадастра)**

| Река – пункт | L , км | L_p , км | I_{cp} , м/км | $I_{срв}$, м/км | F , км ² | H_{cp} , м | $f_{оз}$, % | f_6 , % | $f_л$, % |
|-----------------------|----------|------------|-----------------|------------------|-----------------------|--------------|--------------|-----------|-----------|
| Томь – Новокузнецк | 392 | 247 | 4,07 | 2,23 | 29800 | 550 | 1 | 5 | 80 |
| Бия – Бийск | | 280 | | | 36900 | 1370 | | | |
| Чая – Подгорное | 434 | 58 | 0,21 | 0,21 | 25000 | 120 | 1 | 35 | 60 |
| Икса – Плотниково | 163 | 163 | 0,20 | 0,14 | 2560 | 130 | 1 | 50 | 50 |
| Кеть – Максимкин Яр | 1010 | 1010 | 0,27 | 0,14 | 38400 | 160 | 1 | 10 | 80 |
| Васюган – Ср. Васюган | 812 | 812 | 0,09 | 0,07 | 31700 | 110 | 2 | 40 | 58 |
| Обь – Салехард | | | | | 2953000 | | | | |

Примечание: L – длина реки от наиболее удаленной точки речной системы; L_p – длина реки от истока; I_{cp} – средний уклон реки; $I_{срв}$ – средний взвешенный уклон реки; F – площадь водосбора; H_{cp} – средняя высота водосбора; $f_{оз}$ – озерность; f_6 – заболоченность и $f_л$ – лесистость водосборной площади.

Факторы временной изменчивости стока и его зарегулированности

Основная идея рассмотрения факторов климата и характеристик речных бассейнов, определяющих многолетнюю изменчивость стока и его естественную зарегулированность, заключается в том, чтобы проследить последовательно во времени, как формируется сток в реках в разные сезоны и месяцы и как последующие значения расходов воды в реке зависят от предыдущих. А также насколько неравномерно распределены расходы воды в реках в течение года: чем меньше эта неравномерность, тем более сток реки зарегулирован естественными или антропогенными факторами. Это важно потому, что сама идея динамической системы и динамического хаоса заключается в получении последующих значений ряда в зависимости от предыдущих, взятых с какой-то определенной сдвижкой во времени τ (у разных рек и, в общем случае, даже в разные гидрологические сезоны – разной).

Будем основываться на следующей гипотезе: чем сильнее зарегулирован сток реки, тем больших значений параметра τ следует ожидать при анализе динамических свойств системы.

Зарегулированность определяется во многом климатическими условиями – насколько равномерно во времени распределяются в году осадки, формирующие сток рек. Участие осадков в формировании речного стока определяется температурными условиями: особенно существенную роль в снижении его зарегулированности играют зимние отрицательные температуры, благодаря которым имеется значительный период времени продолжительностью около полугода, когда в речном бассейне происходит практически только накопление твердых осадков без их таяния и участия в питании рек.

После того как осадки (прежде всего талые воды) поступают на поверхность бассейна, большую роль начинают играть и регулирующие свойства самого бассейна. Важно, например, насколько водопроницаема поверхность водосбора – сразу вода попадает в реки или сначала питает подземные водоносные горизонты и только потом, намного позднее поступает в русло реки. Поэтому при прочих равных условиях более «гладко», или инерционно, должны меняться расходы воды у тех рек, где больше озерное регулирование, где в бассейне меньше глинистых грунтов и больше хорошо проницаемых для влаги песчаных, где широко распространена лесная растительность и где больше размер самого бассейна.

Таким образом, основной задачей здесь является проследить наличие ближних и дальних связей в рядах стока рек, что имеет непосредственное отношение к параметрам системы τ и n , выражающим продолжительность ее памяти и сложность.

На всех исследуемых реках имеется три гидрологических сезона: 1) весеннее (или весенне-летнее) половодье; 2) летне-осенний период (обычно межень, прерываемая дождевыми паводками) и 3) низкая и продолжительная зимняя межень. По своему режиму реки классифицируются как реки с весенне-летним (или весенним) половодьем и паводками в теплое время года [10]. Низкая зимняя межень продолжается около полугода, а на севере и в горах – более полугода. Сток рек включает снеговую, дождевую и подземную составляющие.

Реки Бия и Томь можно отнести по классификации Б.Д. Зайкова к группе рек с весенним половодьем алтайского типа, характеризующегося невысоким, растянутым, многопиковым весенним половодьем, повышенным летним стоком и низким стоком зимой. Таежные реки относятся к этой же группе, но к западно-сибирскому типу, характеризующемуся невысоким растянутым и сглаженным половодьем, повышенным летне-осенним стоком и низкой зимней меженью. Река Обь у Салехарда – типичная река с полизональным режимом, который формируется в пределах крупного бассейна, включающего несколько географических зон на равнине и высотных поясов в горах. Показателем внутригодовой равномерности стока является коэффициент его естественной зарегулированности ϕ , выражающий долю базисного стока в общем объеме стока за год. Чем равномернее распределен сток в году, тем больше значение ϕ .

Река Бия вытекает из Телецкого озера, расположенного в горах Алтая на высоте 436 м над уровнем моря и имеющего площадь 223 км². Около половины площади бассейна реки приходится на бассейн р. Чулышман, основного притока Телецкого озера, – 16800 км². В верховьях Бии (бассейны рек Башкаус и Чулышман) значительную площадь занимают высоко поднятые плато и нагорья, расположенные на высоте 1500–2500 м. Несколько меньшая часть площади бассейна от Телецкого озера до Бийска приходится на низкогорье высотой до 1000 м. Таким образом, здесь наблюдается два максимума распределения площади по высотным зонам. Имеется и два максимума распределения снеготазов по высоте в бассейне, что является причиной формирования двух волн поло-

воды на р. Бия у Бийска: в апреле – мае и июне – июле [11]. Вследствие неодновременности притока талых и дождевых вод с разных высотных зон река имеет сложную многопиковую форму половодья, летняя межень не выражена, зимняя межень низкая и продолжительная. Половодье начинается в апреле и продолжается в отдельные годы до сентября – октября.

Река Томь – один из самых крупных и многоводных притоков Оби. Гористый рельеф на большей части площади водосбора и практически полное отсутствие оледенения определяют невысокую регулируемую способность бассейна и, как следствие, – слабую инерционность гидрологических процессов по отношению к внешним климатическим воздействиям, что сказывается в быстрой реакции стока на эти воздействия [12].

К равнинным рекам лесоболотной зоны относятся р. Чая с ее притоком Икса, а также реки Кеть и Васюган. Все они входят в категорию средних, исключая малую реку Икса. В питании рек наиболее велика доля снеговых вод, к северу она несколько снижается. Доля грунтовых вод в стоке малых рек (р. Икса – с. Плотниково), русла которых неглубоко врезаны и слабо дренируют водоносные горизонты, обычно меньше, чем у более крупных рек (реки Чая, Кеть, Васюган). Половодье продолжительное, без резких колебаний расходов воды, сток половодья на равнинных реках более равномерен, или зарегулирован, чем в горах.

Бассейн р. Обь до замыкающего створа в Салехарде практически включает в себя весь бассейн Оби и Иртыша. Наибольший вклад в формирование местного стока в бассейне Оби вносит лесная зона, которая занимает 49% всей площади бассейна: 232 км³/год, или 58% суммарного объема стока 400,2 км³ в год. Горные районы при площади 7,4% дают 66,8 км³/год, или 16,7% местного стока. Местный сток в степи и лесостепи (37% всей площади бассейна) составляет 48,3 км³/год, или 12%. В тундре на 6,6% площади бассейна формируется 53,1 км³/год, или 13,3% местного стока [13].

Основным фактором, определяющим многолетнюю изменчивость стока половодья, является изменчивость снегонакопления в бассейне, предшествующего половодью осеннего увлажнения и осадков в период половодья. Исследования Д.А. Буракова показали, что для р. Бия у Бийска осадки весенне-летнего периода хотя и не являются главным фактором многолетней изменчивости стока половодья, но играют определенную роль и могут приниматься во внимание для уточнения прогноза половодья [11]. Влияние осеннего увлажнения на сток половодья практически незаметно. Факторы формирования половодья и вопросы долгосрочного прогнозирования стока половодья горных рек Сибири, включая р. Томь, детально исследованы А.А. Харшаном [14].

Одним из авторов [12] разработана физико-статистическая модель сезонных и месячных расходов воды р. Томь у Новокузнецка в зависимости от месячных температур воздуха и осадков в бассейне реки. В состав предикторов были включены ряды ежегодных значений месячных и сезонных осадков и температур воздуха, полученных путем арифметического осреднения данных наблюдений на расположенных в бассейне репрезентативных метеостанциях. В апреле, первом месяце половодья на Томи у Новокузнецка, накоплен-

ные зимой снегозапасы не полностью расходуются на сток, поэтому его величина зависит в основном от температуры и осадков апреля. Регрессионная модель для майских расходов Томи включает в качестве предикторов температуры в апреле и мае, осадки холодного периода (ноябрь – март) и осадки в апреле. Майский расход воды возрастает с увеличением всех этих величин, кроме апрельской температуры воздуха (которая является репрезентативным показателем снеготаяния и количества растаявшей и стекшей в апреле воды) – ее повышение снижает расход воды в мае. Осадки холодного периода (ноябрь – март) определяют общий фон водности реки вплоть до июля – августа – за счет сработки накопленных весной запасов подземных вод в бассейне. Сток в сентябре значимо зависит от осадков августа и сентября, а в октябре – от осадков сентября и октября. Приведенные сведения показывают, что в период половодья и в летне-осенний период месячный сток р. Томь у Новокузнецка определяется не только предшествующими условиями, но метеоусловиями (температурами, осадками) того самого месяца, сток которого прогнозируется. Это говорит об относительно слабой зарегулированности гидрологических процессов в бассейне в теплый период года. Если же в качестве интервала осреднения стока взять не месяц, а декаду, то и декадный сток будет определяться в существенной степени метеоусловиями непосредственно предшествующих 2–3 декад.

На равнинных реках лесоболотной зоны сток весеннего (весенне-летнего) половодья зависит в основном от величины водоподдачи в период снеготаяния и осеннего увлажнения [15]. Соответственно высота половодья в значительной мере, особенно на южных реках, определяется уже осенью (обычно по состоянию на октябрь – ноябрь). В то же время существенно, особенно на северных таежных реках, на объем половодья влияет величина накопленных за зиму снегозапасов в сумме с осадками периода снеготаяния. Этот фактор уменьшает продолжительность памяти системы и, соответственно, заблаговременность прогноза до нескольких дней или, в лучшем случае, декад.

Основными источниками питания рек в зимнюю межень являются подземные воды. Степень естественной зарегулированности зимнего стока определяет интенсивность его истощения в зимний период. Исследуемые реки отнесены, по А.М. Комлеву [16], к типу с правильной нисходящей формой гидрографа зимнего стока. Зимний сток каждого конкретного года определяется, прежде всего, запасами воды, накопленными в бассейне к началу зимы. Эти запасы характеризуются в первом приближении стоком летне-осеннего периода (или его 1–2 последних месяцев). Месячные (и декадные) расходы воды зимней межени распределены во времени достаточно закономерно, а их ход с определенной долей приближения описывается кривой истощения стока. Поэтому расход воды, например, в марте можно предсказать уже в конце летне-осеннего – начале зимнего периода, т.е. с заблаговременностью до 5–6 месяцев.

Зависимость между параметрами динамических систем и зарегулированностью стока рек

Результаты расчета параметров динамических систем бассейнов рассматриваются в [4]. Часть из них

приведена в табл. 2, где также показаны значения коэффициента естественной зарегулированности стока φ , вычисленные нами по среднемесячным расходам воды за период 1958–1988 г. по формуле из [17].

Таблица 2

Динамические параметры системы и значения коэффициента φ

| Река – пункт | Параметры системы | | | φ |
|-----------------------|------------------------------|-----|-----|-----------|
| | $\tau_{\text{АКФ}}$, декады | D | K | |
| Бия – Бийск | 7 | 4,2 | 0,9 | 0,56 |
| Томь – Новокузнецк | 4 | 2,3 | 2,3 | 0,66 |
| Чая – Подгорное | 5 | 3,1 | 1,2 | 0,58 |
| Икса – Плотниково | 5 | 2,4 | 0,7 | 0,49 |
| Кеть – Максимкин Яр | 5 | 3,5 | 0,9 | 0,60 |
| Васюган – Ср. Васюган | 5 | 2,6 | 1,5 | 0,58 |
| Обь – Салехард | 7 | 3,6 | 0,6 | 0,66 |

Значения временной задержки $\tau_{\text{АКФ}}$, соответствующие первому пересечению автокорреляционной функции оси времени τ , определены нами для реконструкции фазового пространства исследуемых систем исходя из условия линейной независимости фазовых координат.

Оценки корреляционной размерности D выполнены на основе анализа корреляционного интеграла и для всех рек получились дробными (см. табл. 2), что говорит о возможности присутствия детерминированного хаоса во временной изменчивости декадных расходов. При этом вопрос о точности определения корреляционной размерности при наличии в системе шума и при ограниченной продолжительности наблюдений оста-

ся открытым – известно, например, что случайный аддитивный шум может увеличивать оцениваемые значения корреляционной размерности аттрактора. Отметим, что присутствие шума в системе приближает ее к стохастической и снижает результативность методов обнаружения нелинейности и хаоса, существенно снижается также точность прогнозирования динамики системы. О возможном присутствии хаотической динамики свидетельствуют и конечные положительные значения энтропии Колмогорова K , которая представляет собой нижний предел суммы положительных показателей соседних фазовых траекторий в фазовом пространстве, что характерно для хаотической динамики.

Обращает на себя внимание тесная зависимость между значениями коэффициента естественной зарегулированности стока φ и такими динамическими параметрами, как временная задержка $\tau_{\text{АКФ}}$ и корреляционная размерность D (рис. 1). Это подтверждает сформулированную выше гипотезу о том, что чем сильнее зарегулирован сток реки, тем больших значений τ следует ожидать при анализе динамических свойств системы. С другой стороны, не совсем понятно увеличение корреляционной размерности D , а значит, и размерности пространства вложения аттрактора n и в целом сложности системы с увеличением φ . Так как рост зарегулированности связан с увеличением времени добегания водных масс до замыкающего створа бассейна, можно полагать, что в течение этого времени и на более обширных пространствах бассейна имеется возможность для проявления большего разнообразия формирующих сток факторов.

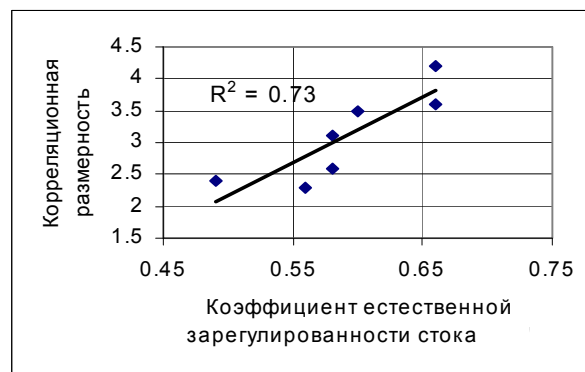
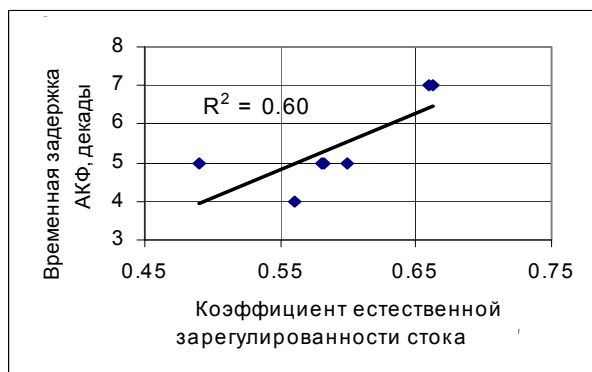


Рис. 1. Зависимость параметров динамической системы речного бассейна $\tau_{\text{АКФ}}$ (слева) и D (справа) от коэффициента естественной зарегулированности стока. R^2 – коэффициент детерминации регрессионной зависимости

Значения коэффициента естественной зарегулированности стока разных рек показывают, что наибольшей зарегулированностью отличается сток Оби у Салехарда и Бии у Бийска: $\varphi = 0,66$. Это объясняется у Оби огромными размерами бассейна, а у Бии – регулированием стока Телецким озером. Равнинные реки лесоболотной зоны со средними размерами бассейнов характеризуются близкими и достаточно большими коэффициентами зарегулированности φ в диапазоне 0,58–0,60, причем в бассейне Кети, где распространены преимущественно песчаные грунты, значение φ несколько выше, чем у левобережных притоков Оби, где преобладают грунты глинистого состава. Наименьшая зарегулированность свойственна рекам Томь у Новокузнецка

($\varphi = 0,56$) и Икса у Плотниково ($\varphi = 0,49$). В первом случае это, несмотря на значительную площадь бассейна, объясняется малой инерционностью гидрологических процессов в горах, а во втором – малой площадью водосбора и широким распространением верховых болот на его территории.

В разные сезоны года инерционность гидрологических систем проявляется по-разному. В зимнюю межень, когда реки питаются только подземными водами, осеннее увлажнение бассейна определяет величину расходов воды по месяцам и декадам, эти расходы закономерно уменьшаются со временем согласно кривой истощения стока. Зная расход воды, например в октябре, можно определить значения стока во все после-

дующие месяцы зимы вплоть до начала весеннего половодья, т.е. «память» системы составляет несколько месяцев (до полугода) практически на всех исследуемых реках.

Объем половодья в значительной мере, особенно на южных реках лесоболотной зоны, определяется уже осенью (обычно по состоянию на октябрь – ноябрь). В то же время существенно, особенно на северных таежных реках, на объем половодья влияет величина накопленных за зиму снегозапасов в сумме с осадками периода снеготаяния. Этот фактор уменьшает продолжительность памяти системы и, соответственно, заблаговременность прогноза.

Несколько проще обстоит дело на горных реках, где влияние осеннего увлажнения не столь велико, а наиболее значимым фактором, определяющим объем половодья, являются накопленные в зимний период снегозапасы и осадки, выпадающие в период половодья. Сток же отдельных месяцев половодья зависит от температур и осадков, выпадающих в эти же месяцы, что существенно снижает память системы и повышает ее размерность. В то же время интересно, что суммы осадков холодного периода (ноябрь – март) определяют общий фон водности реки Томь вплоть до июля-

августа – по-видимому, и за счет постепенного истощения накопленных весной запасов подземных вод в бассейне.

Летне-осенние паводки на реках в горах и на равнинных реках с небольшой регулирующей способностью водосбора возникают также очень быстро. Все это свидетельствует о том, что в период открытого русла на равнинных реках память системы в целом невелика. Размерность системы, в связи с тем что на сток влияет много факторов, включая формирование осеннего увлажнения, зимних снегозапасов и осадков на спаде половодья и в летне-осенний период, увеличивается.

В интегральном же виде, переходя от отдельных месяцев и сезонов к году, получаем, что рост естественной зарегулированности стока независимо от того, какой тип режима для них характерен, алтайский или западно-сибирский, хорошо согласуется с увеличением как временной задержки τ , так и размерности пространства вложения аттрактора. Это позволяет приближенно оценить динамические параметры систем по коэффициенту ϕ . Таким образом, многочисленность факторов многолетней изменчивости стока в разные сезоны года и степень его естественной зарегулированности существенным образом сказывается на параметрах динамических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Раткович Д.Я., Болгов М.В. Стохастические модели колебаний составляющих водного баланса речного бассейна. М.: Изд-во Ин-та водных проблем РАН, 1997. 262 с.
2. Islam M.N., Sivakumar B. Characterization and prediction of runoff dynamics: a nonlinear dynamical view // *Advances in Water Resources*. 2002. Vol. 25, is. 2. P. 179–190.
3. Sivakumar B. Chaos theory in hydrology: important issues and interpretations // *Journal of Hydrology*. 2000. Vol. 227 (1–4). P. 1–20.
4. Земцов В.А., Юшкина О.А. Динамические свойства временных рядов стока сибирских рек // *Вопросы географии Сибири*. Томск, 2006. Вып. 26. С. 10–13.
5. Анищенко В.С., Вадивасова Т.В., Астахов В.В. Нелинейная динамика хаотических и стохастических систем. Фундаментальные основы и избранные проблемы. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1999. 368 с.
6. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление / Пер. с англ. М.: Мир, 1974. Вып. 1. 406 с.
7. Tsonis A.A., Triantafyllou G.N., Elsner J.B. Searching for determinism in observed data: a review of the issue involved // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 1994. № 1. P. 12–25.
8. Hegger R., Kantz H., Schreiber T. Practical implementation of nonlinear time series methods: The TISEAN package // *CHAOS*. 1999. № 9. P. 413–435.
9. Карасев И.Ф. Речная гидрометрия и учет водных ресурсов. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 310 с.
10. Кузин П.С., Бабкин В.И. Географические закономерности гидрологического режима рек. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 200 с.
11. Снежно-водно-ледниковые ресурсы бассейна Верхней Оби и прогнозы стока весеннего половодья / Н.К. Барашкова, Д.А. Бураков, В.П. Галахов, В.Е. Дмитриев и др. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1986. 253 с.
12. Земцов В.А. Оценка чувствительности стока р. Томь к изменениям климатических характеристик // *География и природные ресурсы*. 1997. № 3. С. 176–182.
13. Савкин В.М. Ресурсы поверхностных вод Западной Сибири и их качество // *Обской вестник*. 1996. № 1. С. 22–31.
14. Харшан А.А. Долгосрочные прогнозы стока горных рек Сибири // *Тр. Гидрометцентра СССР*. 1970. Вып. 65. 210 с.
15. Бураков Д.А. Гидрологический анализ весеннего половодья в лесной зоне Западно-Сибирской равнины // *Вопросы географии Сибири*. Томск, 1978. Вып. 10. С. 69–89.
16. Комлев А.М. Исследования и расчеты зимнего стока рек (на примере Западной Сибири). М.: Гидрометеиздат, 1973. 200 с.
17. Комлев А.М., Проскурина Г.В. Аналитический способ вычисления коэффициента естественной зарегулированности речного стока // *Метеорология и гидрология*. 1977. № 10. С. 95–99.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 8 апреля 2008 г.