

УДК 556.5

**Н. В. КИЧИГИНА**

Институт географии СО РАН, г. Иркутск

**ДИНАМИКА ХАРАКТЕРИСТИК СТОКА РЕК БАССЕЙНА АНГАРЫ  
НА ФОНЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ**

*Проведен анализ многолетних колебаний водности, выделены группы рек со сходными чередованиями маловодных и многоводных периодов. Рассмотрены тенденции изменения стока, его внутригодового перераспределения, а также изменения экстремальных характеристик — максимального стока половодья и паводков, минимального летнего и зимнего стока. Приведены результаты проверки однородности рядов за периоды до и после начала выраженных климатических изменений.*

Ключевые слова: климатические изменения, многолетние колебания стока, гидрограф стока, неоднородность рядов, бассейн Ангары.

*Long-term flow rate fluctuations have been analyzed to identify groups of rivers with similar alternations of low and high flow rate periods. Consideration is given to the variation tendencies of the streamflow and its intra-annual redistribution as well as to changes in extreme characteristics: maximum streamflow at the period of high water and floods, and minimum summer and winter streamflow. Results are provided from verifying the homogeneity in the data series for the periods prior to and after the onset of pronounced climatic changes.*

Keywords: climatic changes, long-term streamflow fluctuations, streamflow hydrograph, inhomogeneity in series, Angara basin.

© 2010 Кичигина Н. В. (nkichigina@mail.ru)

## ВВЕДЕНИЕ

Вторая половина XX в. и начало XXI в. характеризуются направленными климатическими изменениями. Это отразилось на факторах формирования стока рек и их гидрологическом режиме. В результате изменений климата крайне неравномерное распределение водных ресурсов по территории РФ, не согласующееся с потребностями в них, станет еще более выраженным. Ожидается увеличение водных ресурсов и связанных с этим опасных гидрологических явлений, в частности — наводнений. Однако в ряде южных регионов ожидается их уменьшение, в них проблемы водообеспечения станут еще более острыми [1].

Проблеме колебаний климата и его последствий в последнее время уделяется достаточно много внимания. Всесторонней комплексной оценке зафиксированных и ожидаемых изменений природной и хозяйственной систем, связанных с изменением климата на территории РФ, посвящено достаточно много работ [1–7]. Изложенные в них данные о влиянии изменений климата на гидрологический режим рек в основном рассматриваются на макроуровне и обобщаются по бассейнам крупных рек. Однако, как известно, региональные проявления изменения климата имеют ряд особенностей, связанных и с местными физико-географическими условиями. Существуют работы по оценке климатически обусловленных изменений водных ресурсов для ряда регионов РФ и сопредельных стран. Тем не менее, их недостаточно, и однозначного вывода о том, как меняются региональные водные ресурсы на фоне глобальных изменений климата, нет.

Настоящая работа посвящена оценке изменения гидрологического режима региональных водных ресурсов в бассейне р. Ангары на фоне климатических изменений.

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

За период инструментальных наблюдений в бассейне Ангары отмечалась устойчивая многолетняя тенденция к росту средних годовых температур ( $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}/10$  лет), причем наибольший вклад вносят изменения в зимние месяцы. Тенденции изменения месячных величин осадков разнонаправлены и колеблются от 4 до 24 мм/10 лет [2]. В. А. Семеновым [3] показано отсутствие направленных изменений количества осадков на юге Сибири, в то время как большинство исследований указывает на увеличение количества осадков на глобальном (планетарном) уровне, а также во многих отдельных взятых регионах РФ и сопредельных стран.

За начало климатических изменений при анализе изменений речного стока разными авторами принимаются различные точки отсчета в период с середины 1970-х до середины 1980-х гг. Аргументируется это тем, что со второй половины 1970-х гг. на территории России преобладают положительные аномалии температуры воздуха [4, 5]. Кроме того, с конца 1970-х гг. отмечается ряд аномальных природных процессов, например, повышение уровня Каспийского моря с 1978 г. и др. [1]. Наиболее интенсивное потепление глобального климата произошло в 1980-е гг., и именно на этот период чаще всего приходится изменения стока рек [3].

Объектом исследований служит сток средних рек в бассейне Ангары. Реки, относящиеся к средним, протекают в пределах одной географической зоны, и их сток формируется в более или менее однородных физико-географических условиях. Изменение стока таких рек подчиняется закону географической зональности [8], поэтому оно в наибольшей степени зависит от климатических факторов.

Нами была использована информация о стоке, полученная на 30 створах в бассейне Ангары за период от начала инструментальных наблюдений на реках до 2006 г. Рассматривались ряды данных по среднемесячным расходам воды, а также по стоку за генетически однородные фазы водного режима (среднегодовой сток, минимальные летний и зимний, максимальный половодья и максимальный паводочный). При этом анализ тенденций изменения стока проводился за один и тот же 45-летний период наблюдений — с 1962 по 2006 г., для чего использованы данные наблюдений Иркутского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Кроме того проведен статистический анализ. Выполнена оценка многолетних циклических колебаний стока с использованием интегральных разностных кривых, которые не только отражают его годовые колебания, но и указывают на многолетнее истощение (нисходящие участки кривой) или накопление (восходящие) влаги в бассейне реки. Выделение фаз водности проводилось по основным переломным точкам. Также использовались приемы корреляционного анализа, оценивались линейные тренды, для исследования однородности рядов применялись критерии Стьюдента и Фишера.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Многолетние колебания водности.** Водный режим рек зависит от комплекса физико-географических, прежде всего климатических, факторов, таких как атмосферная циркуляция и осадки. Поскольку они подвержены целому ряду разнопериодных изменений, в водном режиме рек проявляются колебания различной длительности, обусловленные естественными природными причинами. Преобладание одного и того же типа циркуляции воздушных масс в разных районах по-разному влияет на осадки и водность рек, чем и объясняется наличие территорий с одинаковыми или противоположными фазами колебаний водности [9].

Корреляционный анализ среднего годового стока рек показал, что наибольший коэффициент линейной связи отмечен в период с 1962 по 2006 г. между стоком рек горной территории (Восточные Саяны), а также равнинной. Коэффициенты линейной корреляции между значениями годового стока исследуемых рек и индексами атмосферной циркуляции по классификации Вангенгейма–Гирса невысоки, от 0,03 до 0,38. При этом с восточным типом атмосферной циркуляции наблюдается преимущественно обратная связь, с западным — прямая, примерно равное количество отрицательных и положительных значений коэффициентов корреляции с меридиональным типом атмосферной циркуляции.

Интегральные разностные кривые годового стока отчетливо иллюстрируют длительные периоды пониженной и повышенной водности, включающие один-два года противоположной по знаку водности, не нарушающие общей тенденции многолетних колебаний стока в бассейне. Это позволило выделить группы рек со сходными чередованиями мало- и многоводных периодов. Визуальное сравнение интегральных разностных кривых дало возможность разделить бассейн Ангары по синхронности многолетних колебаний стока (рис. 1 и 2). Выделенные типы согласуются с физико-географическими особенностями формирования стока рассматриваемой территории.

Синхронность колебаний стока здесь меняется с юга на север. Сток рек южной части бассейна (тип I), как правило, асинхронен стоку рек северной (тип III). Между этими районами, в центральной части бассейна находится переходный тип (тип II). Многолетние колебания стока рек здесь в отдельные периоды более синхронны типу I, в другие — III. Причем, синхронность колебаний часто наблюдается со сдвигом водности по фазе на несколько лет.

В целом за период инструментальных наблюдений с 1930-х гг. по 2006 г. для всех рек типа I характерен конец продолжительного маловодного периода в 1982–1983 гг. Далее наблюдается тенденция к повышению стока, имеющая место до 2000–2002 гг. Для рек типа III с 1940 г. по 1960–1965 гг. свойствен многоводный период, а с 1960 по 1990 г. — период стабильно высокой водности с некоторым понижением к 1990 г. С 1990 по 2000 г. отмечался период пониженной водности с переломом в 2000 г., после чего начался многоводный период, продолжавшийся вплоть до 2006 г. Колебания водности рек типа II в разные периоды совпадают с колебаниями водности типа I и III.

В текущем десятилетии (2001–2006 гг.) в бассейне Ангары наблюдалось существенное увеличение водности большинства рек. Практически на всех створах (за исключением створов на Куде) средний годовой сток за 6 лет текущего десятилетия был выше нормы. Увеличение водности рек за эти годы колебалось от 0,35 до 48 %, а среднее увеличение стока по отношению к норме составляло 14,8 %. На интегральных разностных кривых рек этот период характеризуется резким наклоном кривой вверх относительно горизонтальной линии, что характеризует многоводную фазу цикла. Таким образом, в настоящее время на подавляющем большинстве рассматриваемых водотоков в бассейне Ангары наблюдается многоводный период, начавшийся в среднем в 2001–2002 гг.

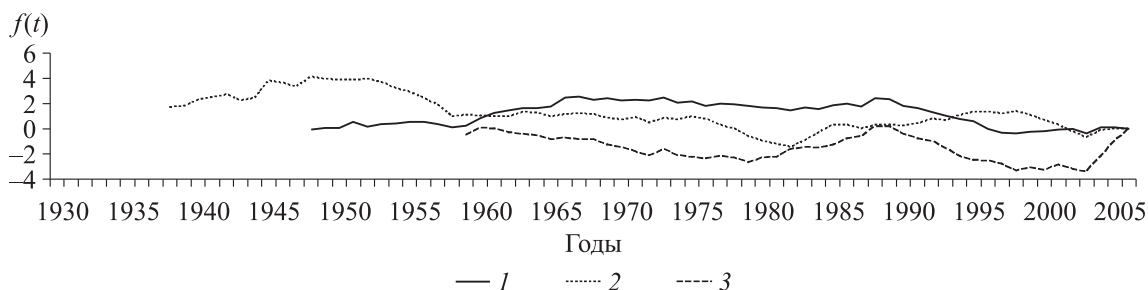


Рис. 1. Интегральные разностные кривые стока рек (I–III — их типы с разными фазами колебания водности).

I — р. Усолка (с. Троицкое), III тип; 2 — р. Куде (с. Грановщина), I тип; 3 — р. Кадуй (с. Кадуй), II тип.  $f(t)$  — ординаты интегральных разностных кривых ( $f(t) = \Sigma(k - I)/C_v$ , где  $k$  — модульный коэффициент,  $C_v$  — коэффициент вариации).

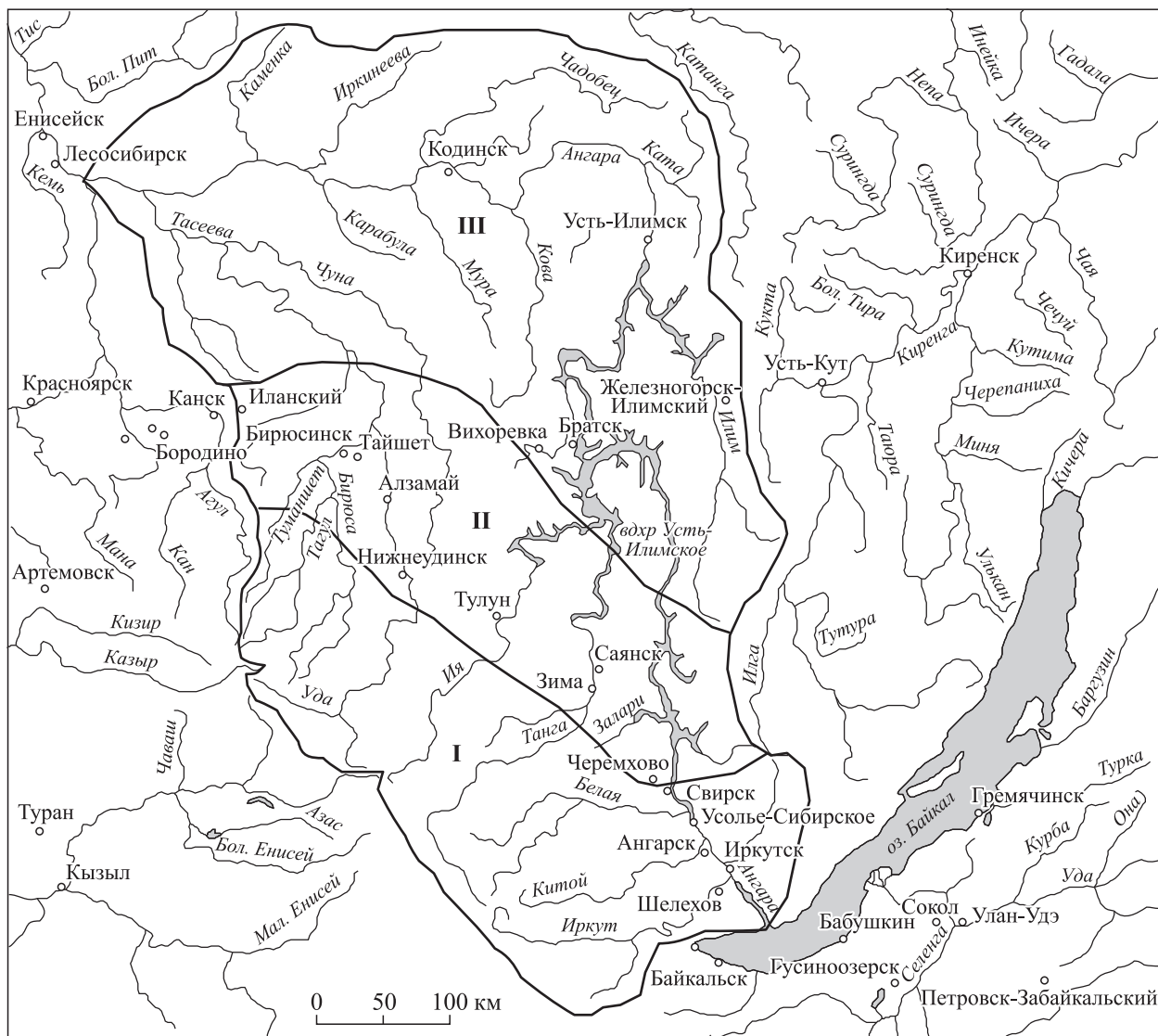


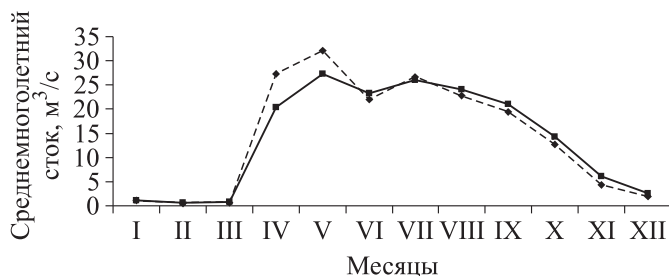
Рис. 2. Дифференциация территории бассейна р. Ангары по синхронности многолетних колебаний стока.

**Однородность рядов и внутригодовое перераспределение стока.** Климатические изменения и усиливающееся антропогенное воздействие на водосборах привносят нестационарность в режим гидрометеорологических характеристик, при этом возникает неоднородность в рядах стока. В практике гидрологических расчетов принято использовать данные по бассейнам с однородными условиями формирования стока. Обычно исходный ряд расходов не вызывает сомнений относительно однородности, если он сформирован из фазово-однородных величин, относящихся к определенной фазе стока (например, к весеннему половодью или к дождевым паводкам, или к летней межени).

Однако трансформация условий формирования стока в последние десятилетия может привести к неоднородности и в фазово-однородные ряды стока. Для того, чтобы ее выявить, выполнена проверка статистической однородности фазово-однородных рядов стока (среднегодового, минимальных летнего и зимнего), а также среднемесячных расходов по критериям Стьюдента и Фишера. Для этого выборки исследуемых расходов воды делились на две подвыборки: первая — от начала наблюдений до середины 1970-х гг. (до начала выраженных климатических изменений), вторая — с середины 1970-х до 2006 г. Затем эти подвыборки проверялись на принадлежность к одной генеральной совокупности.

Ряды среднегодовых расходов на большинстве створов однородны, за исключением трех створов на р. Иркут (Монды, Тунка, Тибельти), а также створов рек Куда (Грановщина) и Кадуй (Кадуй). Неоднородными хотя бы по одному из двух критериев оказались в большинстве случаев ряды среднемесячных расходов за осенне-зимний период (с октября по март) — от 41 до 68 % всех створов, при этом наибольшей неоднородностью отличается март и ноябрь (по 68 % всех створов). Ряды наименьших летних и зимних расходов неоднородны в 59 и 68 % случаев соответственно. Рост темпе-

Рис. 3. Осредненные значения среднего месячного стока за 1938–1975 гг. (штриховая линия) и за 1976–2006 гг. (сплошная линия) в створе р. Куды (с. Грановщина).



ратур воздуха в зимний период влияет на перераспределение стока внутри года, и, как следствие, возникает неоднородность в рядах стока.

Гидрографы стока наглядно иллюстрируют особенности внутригодового перераспределения стока, происходящие на фоне климатических изменений. На рис. 3 представлено изменение среднемноголетнего значения средних месячных расходов за период выраженных климатических изменений (1976–2006 гг.) по сравнению с предшествующим периодом (1938–1975 гг.) для р. Куды (Грановщина). За последние годы заметно уменьшился сток в апреле и мае (время весеннего половодья) и увеличился за летне-осенний период (с августа по ноябрь). Гидрограф стока стал более сглаженным. Гидрографы стока за маловодные, многоводные и средние по водности годы показали, что эти особенности характерны в большей степени для средних и маловодных лет и в меньшей — для многоводных.

**Тенденции изменения стока.** Коэффициент вариации годового стока, показывающий меру его изменчивости на реках в бассейне Ангары за период выраженных климатических изменений (1976–2006 гг.) по сравнению с более ранним периодом (1951–1975 гг.), в целом существенно не изменился.

При анализе данных наблюдений за стоком оценены линейные тренды за один и тот же 45-летний период (1962–2006 гг.). Оценка трендов рядов среднемесячного стока на реках в бассейне Ангары выявила на большинстве рек тенденцию к уменьшению стока в мае и к увеличению — в осенний и зимний периоды (с октября по декабрь). Направленность изменений в другие месяцы неоднозначна и разнонаправлена.

Наблюдается предрасположенность к уменьшению стока весеннего половодья и увеличению паводочного стока. При этом наибольшие отрицательные тренды весеннего половодья отмечаются на створах, расположенных на равнинной территории в среднем и нижнем течении Ангары. При общей тенденции к увеличению паводочного стока его отрицательные тренды наблюдаются на реках, стекающих с горных сооружений Восточного Саяна. Минимальный летний сток существенно не изменяется. Прослеживается отчетливая тенденция увеличения минимального зимнего стока [10].

Как отмечено выше, среди всех климатических изменений наиболее выражена тенденция повышения температуры воздуха, особенно в зимние месяцы. Поэтому складываются более благоприятные, чем в середине XX в., теплобалансовые условия для формирования стока в период зимней межени. Увеличение теплого периода, более мягкие зимы, более раннее оттаивание и более позднее промерзание почвогрунтов приводят к увеличению доли подземного питания, которое и определяет, в первую очередь, величину минимального стока.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Роль водных ресурсов речной системы Ангары в экономике Сибири велика. На Ангаре находится каскад крупнейших ГЭС, ведется строительство еще одной — Богучанской. Кроме того, здесь расположены крупные промышленные центры с преимущественно водоемкими и энергоемкими предприятиями цветной металлургии, нефтехимии, поэтому информация о многолетних колебаниях стока, современном и будущем состоянии водных ресурсов имеет принципиальное значение для решения широкого круга водохозяйственных задач, эффективного и устойчивого управления водными ресурсами.

Несмотря на то, что в текущем десятилетии на большинстве рек в бассейне Ангары наблюдается многоводный период, на сегодняшний день нельзя говорить о выраженной тенденции увеличения водности рек (величины среднего годового стока за все время наблюдений существенно не меняются). В то же время на макроуровне [1] отмечается увеличение суммарного годового стока крупнейших водных артерий Евразии, впадающих в Северный Ледовитый океан, и водности рек большинства регионов РФ.

Однако, как показал анализ рядов средних месячных значений стока, имеется тенденция внутригодового перераспределения стока в сторону его выравнивания, что, в свою очередь, привносит неоднородность в ряды наблюдений, в основном в осенне-зимний период. Методы расчета гидрологических характеристик, применяемые для строительного и водохозяйственного проектирования,

планирования и осуществления мероприятий по долгосрочному использованию водных ресурсов, строясь, исходя из гипотезы стационарности гидрологических рядов, поэтому наличие в них неоднородности имеет принципиальное значение для гидрологических расчетов.

Итоги данной работы могут быть полезны при прогнозировании возможных изменений региональных водных ресурсов, при оценке их влияния на экологическую обстановку, водоснабжение отдельных административных районов и водно-энергетический комплекс в целом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Оценочный** доклад об изменениях климата и их последствиях на территории РФ. Т. 2: Последствия изменений климата. — М.: Росгидромет, 2008. — 289 с.
2. **Густокашина Н. Н.** Многолетние изменения основных элементов климата на территории Предбайкалья. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2003. — 107 с.
3. **Семёнов В. А.** Ресурсы поверхностных вод гор России и сопредельных территорий. — Горно-Алтайск: РИО Горно-Алт. ун-та, 2007. — 147 с.
4. **Груза Г. В., Ранькова Э. Я.** Обнаружение изменения климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата // Метеорол. и гидрол. — 2004. — № 4. — С. 50–66.
5. **Анисимов О. А., Белолуцкая М. А.** Влияние изменения климата на вечную мерзлоту: прогноз и оценка неопределенности // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. — СПб: Гидрометеоздат, 2003. — Т. 9. — С. 21–38.
6. **Георгиевский В. Ю.** О влиянии глобального потепления на сток крупных рек России // Научно-промышленный форум «Великие реки, 2001». — Нижний Новгород: Изд-во Нижегород. арх.-строит. ун-та, 2001. — С. 90–91.
7. **Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю.** Изменение стока рек России при глобальном потеплении климата // Тезисы докладов VI Всерос. гидрол. съезда, Санкт-Петербург, 28 сент.—1 окт. 2004. — СПб: Гидрометеоздат, 2004. — С. 200–201.
8. **Чеботарев А. И.** Гидрологический словарь. — Л.: Гидрометеоздат, 1978. — 308 с.
9. **Кузин П. С., Бабкин В. И.** Географические закономерности гидрологического режима рек. — Л.: Гидрометеоздат, 1979. — 199 с.
10. **Кичигина Н. В., Густокашина Н. Н., Максютова Е. В.** Тенденции гидроклиматических изменений в бассейне р. Ангары // Материалы VII Сиб. совещания по климато-экологическому мониторингу. — Томск: Изд-во Ин-та мониторинга климат. и экол. систем СО РАН, 2007. — С. 76–77.

*Поступила в редакцию 9 июня 2009 г.*