

УДК 551.583:556.5

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ СВЯЗИ ИЗМЕНЧИВОСТИ СТОКА ВОЛГИ И СЕВЕРОАТЛАНТИЧЕСКОГО КОЛЕБАНИЯ В 1882–2007 гг.

© 2017 г. Валерия В. Попова, Александр Г. Георгиади

*Институт географии РАН, Москва, Россия  
e-mail: valeria\_popova@mail.ru*

Поступила в редакцию 20.02.2016 г.

**Аннотация.** Связь колебаний годового и весеннего стока Волги с индексом Североатлантического колебания ( $I_{NAO}$ ) за 1882–2007 гг. рассматривается на основе спектральных оценок, выполненных по методу преобразования Фурье. Полученные кросс-спектральные оценки указывают на связь колебаний стока и  $I_{NAO}$  в противофазе в области характерных для их изменчивости периодов: 7–9 лет для среднего для зимы  $I_{NAO}$ , 12–16 лет для среднего для лета  $I_{NAO}$ . Синфазная связь стока в области 5-летних периодов выявлена (для летнего  $I_{NAO}$ ) и около 40-летних периодов (для зимнего  $I_{NAO}$ ). Анализ скользящих спектров, выполненный для годового стока Волги и сезонных  $I_{NAO}$ , выявил неустойчивость 12–16-летних и 5-летних колебаний и относительную устойчивость 7–9-летних квазипериодичностей.

**Ключевые слова:** Североатлантическое колебание, бассейн Волги, речной сток, изменчивость, спектральный анализ.

DOI:10.15356/0373-2444-2017-2-47-59

## SPECTRAL EVALUATIONS OF THE LINK BETWEEN VARIABILITY OF THE VOLGA RIVER RUNOFF AND THE NORTH ATLANTIC OSCILLATION IN 1882–2007

Valeria V. Popova and Aleksandr G. Georgiady

*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
e-mail: valeria\_popova@mail.ru*

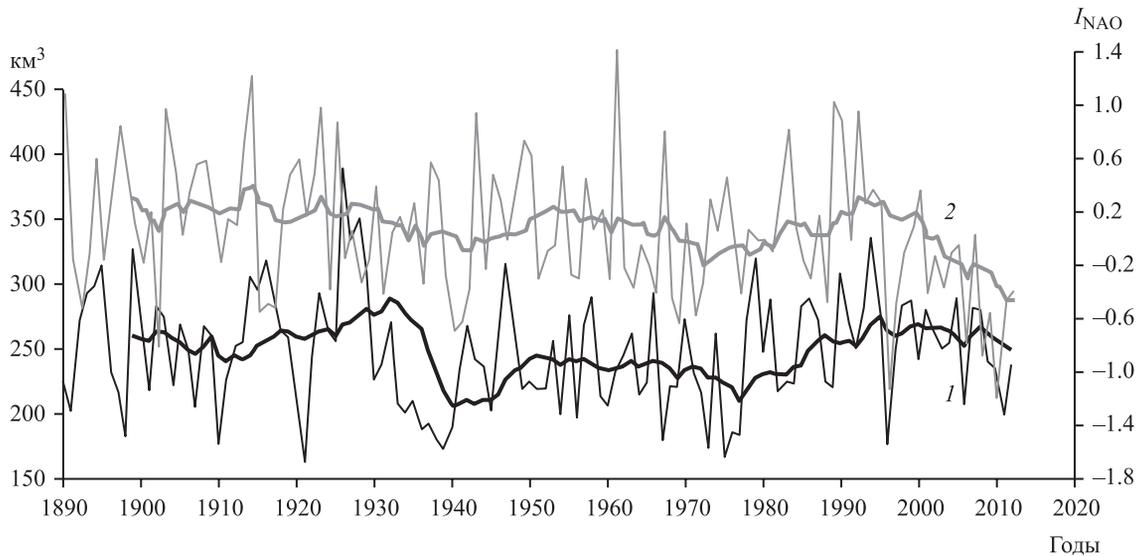
Received February 20, 2016

**Abstract.** Connection of variability of the annual and spring Volga River runoff with the North Atlantic Oscillation index ( $I_{NAO}$ ) during 1882–2007 are studied on the base of spectral evaluations obtained by Fourier transform method. Cross-spectrum evaluations obtained reveal the opposite correlation between runoff variation and  $I_{NAO}$  for the typical cycles with 7–9 (average  $I_{NAO}$  in winter) and 12–16-year periods (average  $I_{NAO}$  in summer). In-phase link of runoff of 5-year periods of the summer  $I_{NAO}$  is revealed also for near 40-year periods for the winter  $I_{NAO}$ . Analysis of the running power spectrum carried out for the annual Volga River runoff and for the seasonal  $I_{NAO}$  showed instability of 12–16-year and 5-year fluctuations and relative stability of 7–9-year quasi-cycles.

**Keywords:** the North Atlantic Oscillation, the Volga River basin, river runoff, variability, spectral analysis.

**Введение.** Закономерная особенность современного глобального потепления – увеличение влагосодержания атмосферы и рост осадков [21]. Несмотря на то, что эти изменения приземной температуры и осадков затрагивают практически все Северное Полушарие, их региональное распределение весьма неоднородно, особенно для осадков [6, 21]. Эта неоднородность связана с вариациями

крупномасштабной атмосферной циркуляции, которая определяет аномалии осадков и температуры в масштабе от суток до года и отражается в полях многолетних средних значений за более продолжительные периоды. Европейская территория России и занимающий практически всю ее территорию южнее 60 с.ш. бассейн Волги находятся в секторе влияния Северной Атлантики, что является



**Рис. 1.** Изменения и годового стока Волги (1), шкала слева, и среднего за год индекса NAO (2), шкала справа. Показаны годовые (тонкие линии) и 11-летние скользящие средние значения (жирные линии).

важнейшим фактором режима тепло- и влагообеспеченности в этих регионах. Степень этого влияния зависит от усиления или ослабления зонального переноса и связана с градиентом давления на севере Атлантики между Исландией и Азорскими островами, показателем многолетних изменений которого, как известно, является индекс Североатлантического колебания (NAO).

Многочисленные исследования показывают, что потепление зимнего сезона на севере Европы тесно связано с положительными аномалиями NAO с начала 1970-х годов [5, 12, 14, 20, 23, 26, 27]. Этот же период характеризовался подъемом стока Волги, на 25–30% в 1978–1991 гг. по сравнению с 1970–1977 гг. [2, 10, 13], после его многолетнего сокращения. Результаты изучения условий формирования стока в бассейне Волги с середины 1970-х годов свидетельствуют об увеличении повторяемости зимних циклонов из Северной Атлантики [4] и росте годовых сумм осадков [17]. Совпадение этих событий указывает на возможную связь многолетних изменений стока Волги с Североатлантическим колебанием, хотя предпринятые ранее попытки выявить линейную корреляцию приводили только к качественным оценкам, свидетельствующим о слабой отрицательной связи годовых величин годового стока и индекса NAO [2, 15].

Изучение связи режима увлажнения бассейна Волги с частотой и интенсивностью Эль-Ниньо в исследованиях колебаний уровня Каспия [1, 15, 18] приводит к выводу о существенном влиянии этой глобальной климатической моды

на долгопериодные колебания стока Волги за счет формирования аномалий осадков на ее водосборе летом и осенью в периоды активизации Эль-Ниньо [1, 18]. Возможный механизм этого влияния связывается с усилением зонального переноса, обусловленным ростом перепада температур экватор-полюс, связанного с Эль-Ниньо. По-видимому, воздействие аномалий полей давления, вызываемых этой климатической модой, может распространяться на центры действия атмосферы Северной Атлантики и, таким образом, на колебания индекса NAO. Это вытекает из результатов [24], где выявлена нелинейная зависимость индекса NAO от ENSO (El Niño – Southern Oscillation) с запаздыванием от двух месяцев до двух лет, усиливающаяся с конца 1990-х годов.

Вместе с тем, непосредственное формирование режима температуры и осадков над водосбором Волги связано с полями давления и переносом воздушных масс, обусловленных колебаниями градиента давления над Северо-Атлантическим сектором, описываемыми индексом NAO. На протяжении более чем векового ряда колебаний стока Волги и индекса NAO с 1882 г. (рис. 1) наблюдается согласованность 30–40 летних флуктуаций с некоторым запаздыванием стока по отношению к циркуляции. При этом в многолетнем ходе двух рядов отмечаются асинхронные колебания с периодичностью около 10 лет.

Существование синфазных и противофазных колебаний на разных периодичностях указывает на возможный нелинейный характер зависимости стока Волги от NAO, для выявления которых

необходимо применение методов спектрального анализа. Цель данной работы – получение спектральных оценок связи колебаний годового и сезонного стока Волги с аномалиями NAO за период 1882–2007 гг. и их вклада в изменчивость стока на протяжении более чем векового периода наблюдений.

**Данные и методы.** Для изучения многолетней изменчивости стока Волги (в створе Волгограда) использованы величины восстановленного условно-естественного годового и сезонного стока. Они включают наблюдаемые многолетние данные, относящиеся к периоду до начала заметного воздействия антропогенных факторов, прежде всего, водохранилищ, до 1930 г., и ряд восстановленных значений стока, т.е. “отфильтрованных” от влияния антропогенных факторов, после 1930 г.

При восстановлении годового стока и стока основных гидрологических сезонов Волги, Волгоград (зима, половодье, лето–осень) в качестве рек-индикаторов климатических изменений использовались р. Ока в створе Калуга, Вятка (Киров) и Белая (Бирск), характеризующихся относительно слабо нарушенным водным режимом [7, 8]. Параметры множественной линейной регрессии, как для годового, так и для сезонного стока, оценивались на основании многолетних данных, охватывающих период 1882–1935 гг. с относительно небольшим антропогенным влиянием на водные ресурсы. Для всех сезонов характерны достаточно высокие коэффициенты множественной корреляции с удовлетворительной точностью аппроксимации: 0.89 ( $\pm 7\%$ ) для половодья, 0.86 ( $\pm 10\%$ ) для стока летне–осеннего периода, 0.85 ( $\pm 7\%$ ) для годового стока и 0.80 ( $\pm 17\%$ ) для зимнего стока. Границы сезонов определялись на основе гидрографов стока обобщающих данные за весь период наблюдений и данных о среднемноголетних датах начала и окончания половодья и ледостава.

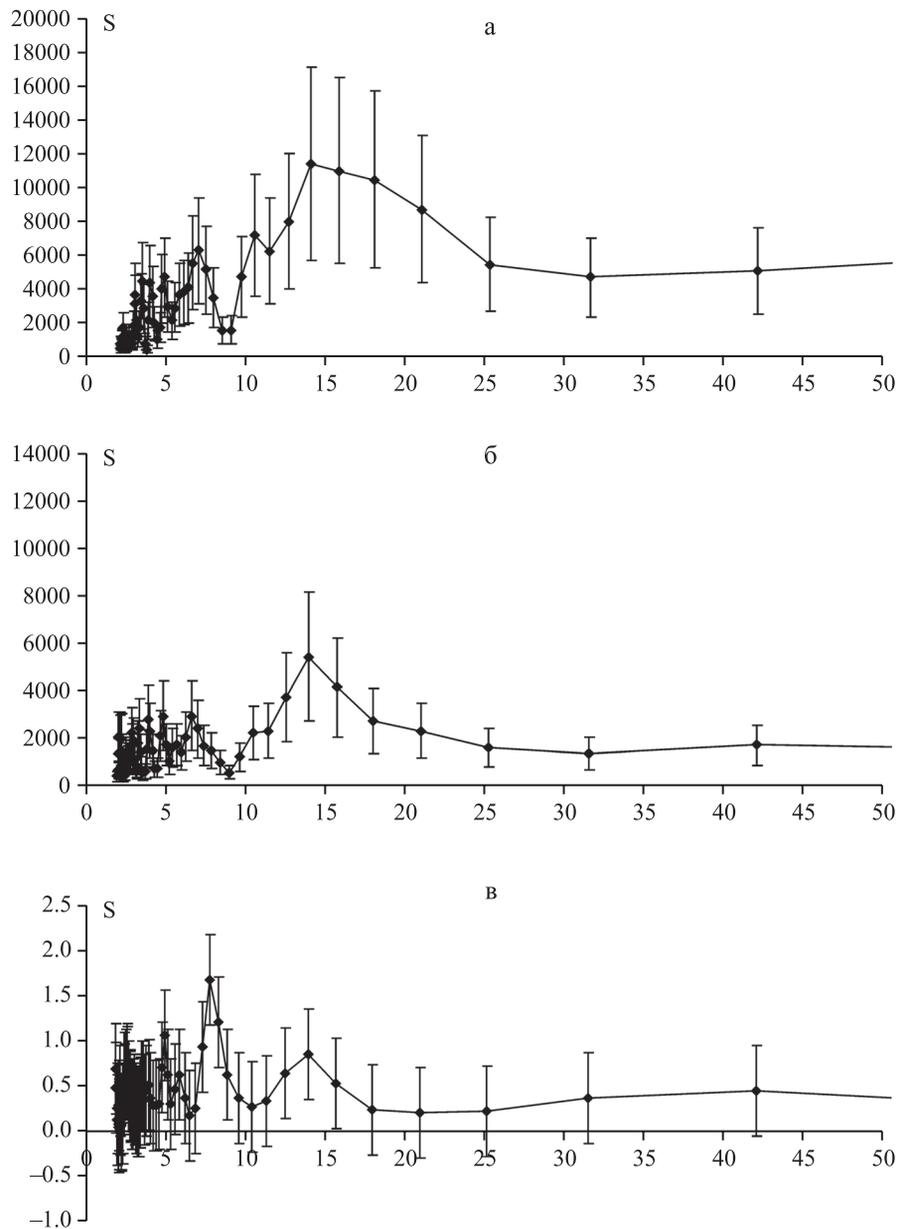
Для выявления пространственных особенностей колебаний аккумуляции снега в бассейне Волги и их связи с  $I_{NAO}$  рассматривались изменения максимальной толщины снежного покрова в марте в разных частях водосбора в 1936–2007 гг. Для этого использовались данные о толщине снежного покрова на метеостанциях из архива ВНИИГМИ-МЦ, предварительно интерполированные в сетку  $2.5 \times 2.5^\circ$ . Были рассчитаны средние ряды толщины снега на территориях Верхней Волги, юга Средней Волги и бассейна р. Белой, а также на севере бассейна Камы и Средней Волги.

Многолетние изменения NAO анализировались на основе многолетних средних месячных рядов индекса NAO ( $I_{NAO}$ ), рассчитанного по

инструментальным наблюдениям за приземным давлением, которые берут начало с 1821 г. North Atlantic Oscillation. <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/nao/>). Количественное выражение  $I_{NAO}$ , определяется как разность нормированных на стандартное отклонение аномалий приземного давления между Исландией (обычно Рейкьявик или Стиккисхоульмур) и Азорскими островами (Понта-Делгада) либо югом Пиренейского полуострова [19, 22].

Для выявления связи стока Волги и NAO в зависимости от частотно временной структуры их колебаний проводился спектральный анализ многолетних рядов за более, чем вековой период (1882–2007 гг.). Были получены оценки спектральных характеристик сезонных и годовых рядов стока и  $I_{NAO}$ , а также их кросс-спектральные оценки. Расчеты спектральных оценок выполнены по методу преобразования Фурье в пакете статистических программ STATISTICA for WINDOWS. Исходя из длины рассматриваемого периода ( $N=126$  лет) и эмпирических оценок периодичности, превышающие  $N/3$  (около 40 лет) не рассматривались. Количество сдвигов  $m$  при расчете автокорреляционной функции определялось как  $1/4$  от длины исходного ряда  $N$ ; количество степеней свободы для определения доверительного интервала функции спектральной плотности и уровня значимости функции взаимной когерентности принималось равным  $2N/m$  согласно [11]. Вклад колебаний зимнего и осенне–летнего стока в изменчивость годового стока и стока половодья оказался несущественным, поэтому анализ взаимных спектров для этих сезонов не проводился. Путем анализа месячных и средних сезонных значений  $I_{NAO}$  установлено, что наиболее информативными для получения взаимоспектральных оценок являются  $I_{NAO}$  зимнего сезона (средний за январь–март) и  $I_{NAO}$  летнего сезона (средний за июнь–сентябрь).

**Спектральные оценки связи многолетней изменчивости стока Волги и Североатлантического колебания за период 1882–2007 гг.** Рассмотрим средние спектры и кросс-спектральные оценки, полученные для 126-летних рядов стока Волги и  $I_{NAO}$  (рис. 2–5). Функция спектральной плотности годового стока Волги для периода 1892–2006 гг. в целом (см. рис. 2а) показывает, что основная доля его дисперсии распределена в длинноволновой части спектра, связанной с периодами колебаний более 10 лет. Существенное увеличение спектральной плотности отмечается около 14–18 лет, но оно сливается с областью более продолжительных периодов (30–40 лет). В спектре весеннего стока этот пик выделяется более четко

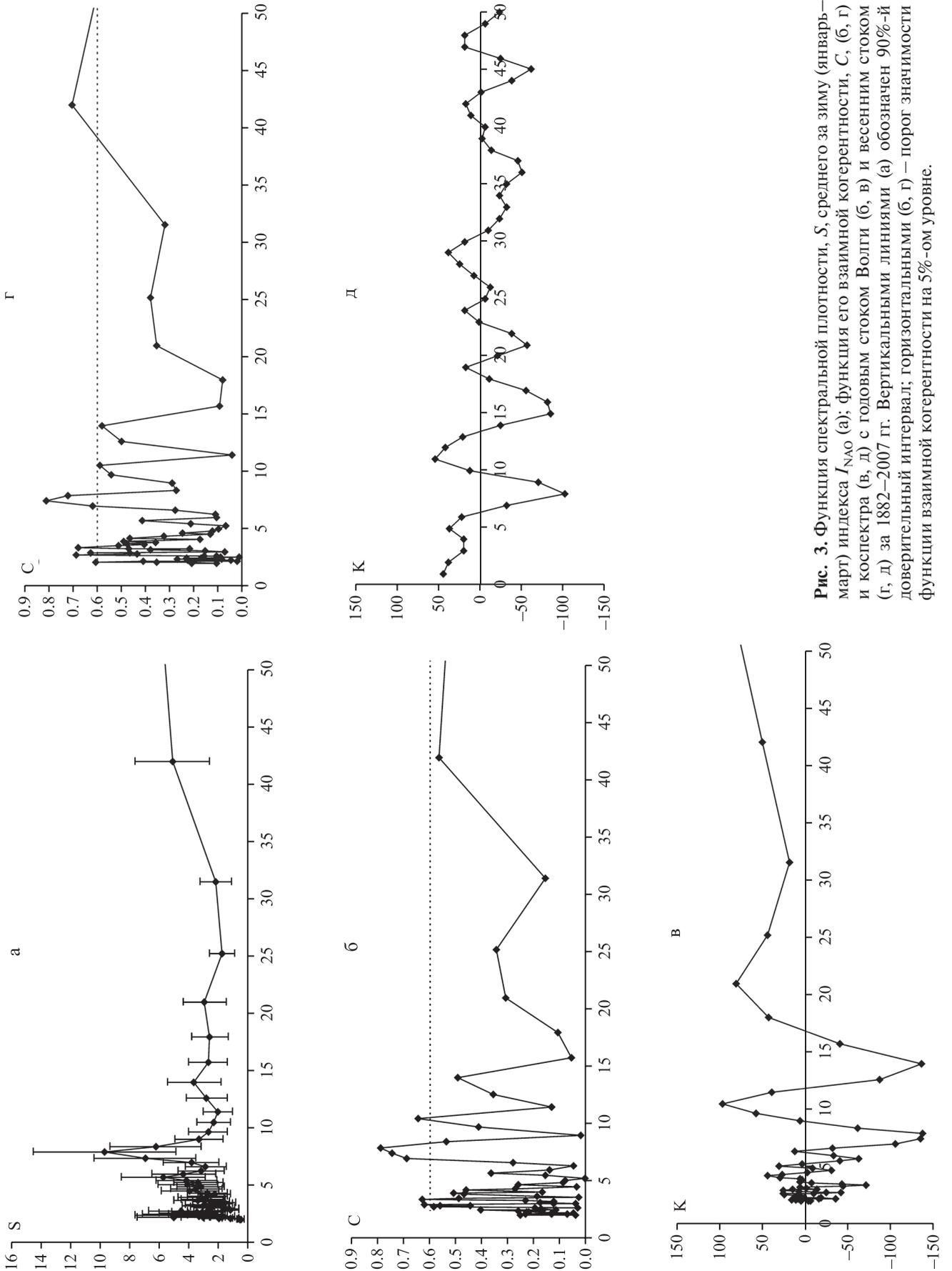


**Рис. 2.** Функция спектральной плотности годового (а) и весеннего (б) стока Волги и среднего за год индекса NAO (в) за 1882–2007 гг. Вертикальными линиями (а) обозначен 90%-й доверительный интервал.

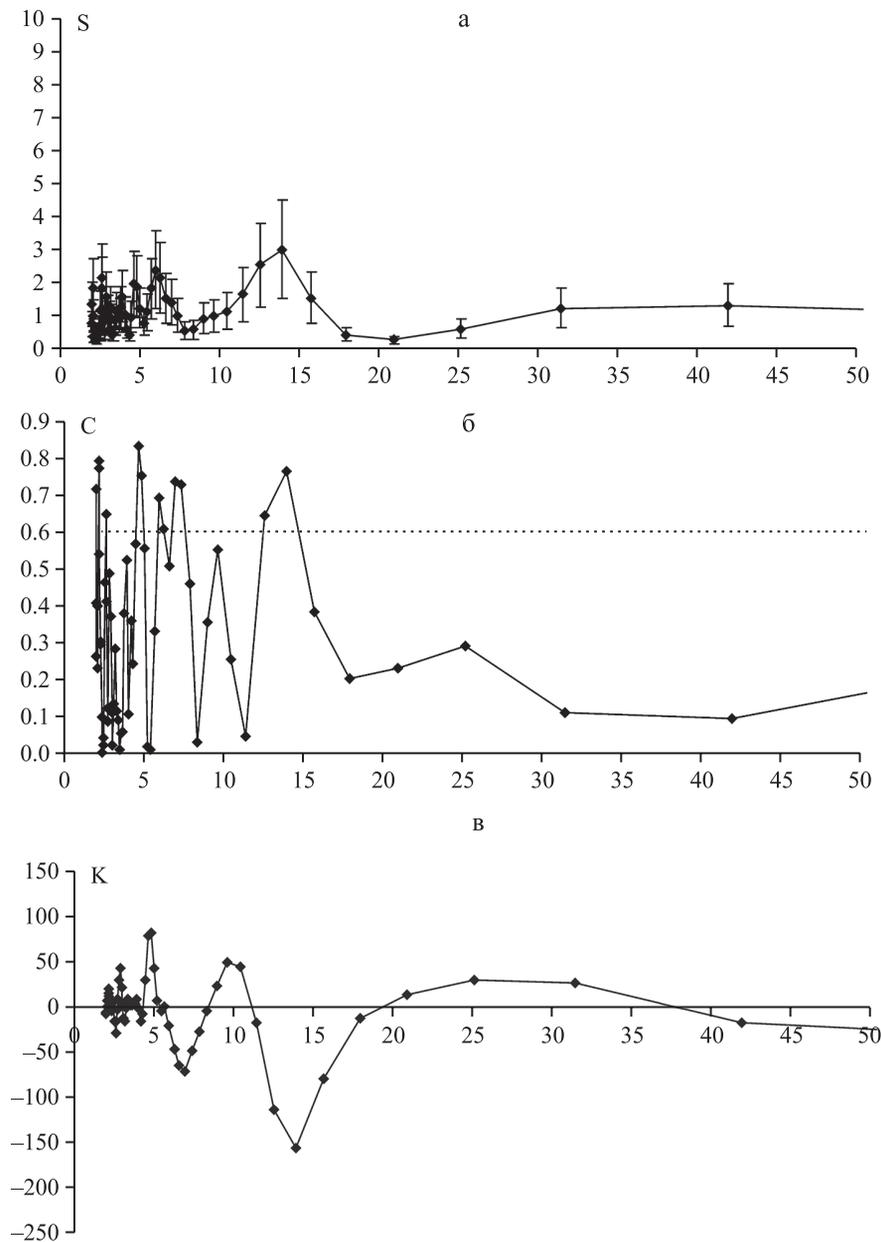
и статистически значимо отделен от периодов 30–40 лет (см. рис. 2б). Существенно уступающая этому максимуму вторая по значимости область концентрации дисперсии годового и весеннего стока в области периодов 6–8 лет (см. рис. 2а, б) статистически значимо отличается от основного максимума (14–18 лет), хотя сливается с областью периодов 5 лет.

Для колебаний  $I_{\text{NAO}}$ , как известно [16, 23] характерны квазидесятилетние циклы, которые в спектре среднего годового  $I_{\text{NAO}}$  проявляются в виде концентрации дисперсии около периодов 7–9 лет

(см. рис. 2в). В области периодов 14–18 лет, с которыми, как обсуждалось выше, связана основная дисперсия стока Волги, наблюдается относительно небольшой статистически незначимый максимум. Спектры средних сезонных значений  $I_{\text{NAO}}$  (см. рис. 3а, 4а, 5а) указывают на то, что основная дисперсия его средней годовой изменчивости связана с колебаниями в зимний период (январь–март), так же как и квазидесятилетние циклы, которые по величине дисперсии намного превосходят максимумы спектральной плотности,



**Рис. 3.** Функция спектральной плотности,  $S$ , среднего за зиму (январь–март) индекса  $I_{\text{НЛО}}$  (а); функция его взаимной когерентности,  $C$ , (б, г) и коспектра (в, д) с годовым стоком Волги (б, в) и весенним стоком и коспектра за 1882–2007 гг. Вертикальными линиями (а) обозначен 90%-й доверительный интервал; горизонтальными (б, г) – порог значимости функции взаимной когерентности на 5%-ом уровне.

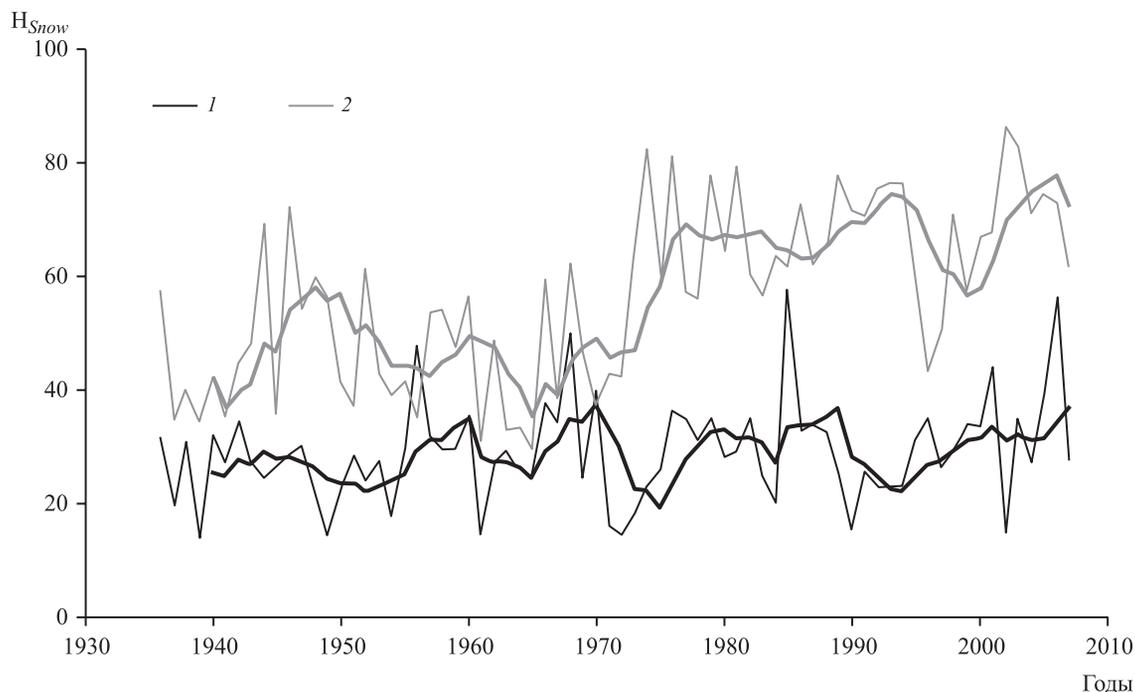


**Рис. 4.** Функция спектральной плотности,  $S$ , среднего за лето (июнь–сентябрь) индекса  $I_{\text{NAO}}$  (а); функция его взаимной когерентности,  $C$ , (б) и коспектра,  $K$ , (в) с годовым стоком Волги за 1882–2007 гг. Вертикальными линиями (а) обозначен 90%-й доверительный интервал; горизонтальными (б) – порог значимости функции взаимной когерентности на 5%-ом уровне.

наблюдаемые в спектре  $I_{\text{NAO}}$  других сезонов, в том числе летнего.

Значимый максимум в области периодов 12–16 лет, близких к характерным периодам колебаний годового стока, обнаруживается в спектре летнего  $I_{\text{NAO}}$  (осредненного за июнь–сентябрь) (см. рис. 4а), хотя величина его спектральной плотности примерно в три раза меньше, по сравнению с квазидесятилетними периодичностями зимнего

$I_{\text{NAO}}$ . Функция взаимной когерентности между годовым стоком и зимним  $I_{\text{NAO}}$  (см. рис. 3б) имеет максимум в области квазидесятилетнего цикла, который выходит за порог статистической значимости и достигает значения 0,8, т.е. составляет 80% общей изменчивости рассматриваемых параметров в этой области спектра. Более отчетливое проявление квазидесятилетних колебаний зимнего  $I_{\text{NAO}}$  обнаруживается в спектре весеннего стока Волги, о чем позволяет судить функция взаимной



**Рис. 5.** Изменения максимальной толщины снежного покрова (см) в марте на водосборе Волги (1 – Верхняя Волга, юг Средней Волги и бассейн р. Белой, 2 – север Средней Волги и бассейна Камы). Показаны годовые и 5-летние скользящие средние значения.

когерентности этих параметров с пиком около 0.8 в области 7–9-летних периодичностей (см. рис. 4г). Хотя в области периодов 30–40 лет не выявляется максимумов, нельзя обойти вниманием значимую когерентность около периодов 40 лет, которая отражает отмеченную выше согласованность длиннопериодных колебаний стока и  $I_{NAO}$  (см. рис. 1).

В спектре летнего  $I_{NAO}$  помимо отмеченного максимума дисперсии около периодов 12–16 лет, присутствует также уступающий ему максимум около квазидесятилетних периодичностей. На рис. 4б видно, что функция взаимной когерентности годового стока с  $I_{NAO}$  за июнь–сентябрь имеет значимые пики для каждой из отмеченных периодичностей. Значимая когерентность годового стока с летним  $I_{NAO}$  в области периодичностей 12–16 лет, с которыми связана существенная часть дисперсии стока, позволяет говорить о его связи с NAO на указанных периодах. Хотя в спектре стока эта полоса (12–16 лет) сливается с широкой областью периодов большей длительности, скорее всего, она обусловлена колебаниями летнего  $I_{NAO}$ . Учитывая, что значение функции взаимной когерентности в области 12–16 лет, превышает 0.7, можно прийти к выводу, что общая изменчивость среднего за июнь–сентябрь индекса NAO и стока Волги на 12–16 лет периодах может достигать почти 70–75%. Значимая когерентность колебаний

стока и летнего  $I_{NAO}$  выявляется также в области 7–9 и 4–5-летних периодов.

Анализ коспектральных функций для рассмотренных взаимно-спектральных оценок (см. рис. 3в, д; рис. 4в) позволяет судить о знаке и величине общей энергии колебаний стока Волги и  $I_{NAO}$ . Во всех случаях, включая оценки годовых и сезонных колебаний стока и NAO, отрицательные значения коспектральных функций, как в полосе периодичностей 7–9 лет, так и в области 12–16-летних периодов, где выявлены статистически значимые пики взаимной когерентности (см. рис. 3б, г; рис. 4б), указывают на корреляцию между стоком и  $I_{NAO}$  в противофазе. Значимая положительная связь годового стока с летним  $I_{NAO}$  отмечается для 4–5-летних периодов (см. рис. 4б, в). Также на синфазную связь указывает статистически значимая когерентность между колебаниями весеннего стока и среднего за январь–март  $I_{NAO}$  и незначительный всплеск соответствующей коспектральной функции (см. рис. 3б, в) в области длиннопериодных колебаний около 40 лет. По соотношению площадей, описываемых коспектральными функциями для рассмотренных взаимно-спектральных оценок в случае периодичностей 4–5, 7–9, 12–16 лет и около 40 лет можно заключить, что наибольшая общая энергия колебаний стока и  $I_{NAO}$  связана с летним сезоном и 12–16 летними периодами, несколько

меньшая с зимним сезоном и 7–9-летними (квaziдесятилетними) циклами. Вклад NAO в длиннопериодные (около 40 лет) колебания стока также связан с зимним сезоном, но на фоне общей дисперсии стока он кажется незначительным. Доля 4–5-летних колебаний незначительна как с точки зрения общей изменчивости стока и летнего  $I_{\text{NAO}}$ , так и по доле в суммарной дисперсии стока.

Природа противофазной зависимости колебаний годового и весеннего стока Волги от зимнего  $I_{\text{NAO}}$  на периодах 7–9 лет может быть проиллюстрирована рис. 5, где представлены изменения толщины снежного покрова к концу зимы за 1936–2007 гг. в разных частях водосбора Волги. На западе и юге бассейна (Верхняя Волга, юг Средней Волги и бассейн р. Белой) многолетний ход снежной аккумуляции характеризуется выраженными квазидесятилетними флуктуациями в противофазе с  $I_{\text{NAO}}$  (коэффициент корреляции составляет  $-0.40$ ). Этот характер связи, очевидно, отражается в спектральных оценках – функции взаимной когерентности и коспектра на периодах 7–9 лет (см. рис. 3б–д). На севере Средней Волги и бассейна Камы колебания толщины снега отличаются и противоположными по фазе колебаниями и положительным трендом, соответствующим изменениям  $I_{\text{NAO}}$  почти на протяжении всего периода, за исключением 2000-х годов (корреляция для рядов толщины снега и зимнего  $I_{\text{NAO}}$  без тренда составляет 0.30). Синхронные для обеих частей бассейна колебания аккумуляции снега наблюдаются в периоды отрицательной фазы  $I_{\text{NAO}}$  (в конце 1930 – начале 1940-х годов, а также с середины 1950-х до конца 1960-х годов). Известно, что север Средней Волги и бассейна Камы отличается наиболее высокими климатическими нормами осадков, в том числе и твердых (что отражается рис. 5), и вносит основной вклад в объемы годового и весеннего стока Волги [9, 10]. В силу этой закономерности, положительная связь  $I_{\text{NAO}}$  и толщины снега на севере Средней Волги и бассейна Камы, по-видимому, оказывается решающей для длиннопериодных (около 30–40 лет) изменений стока Волги, которые демонстрируют синфазную связь с  $I_{\text{NAO}}$  (см. рис. 1).

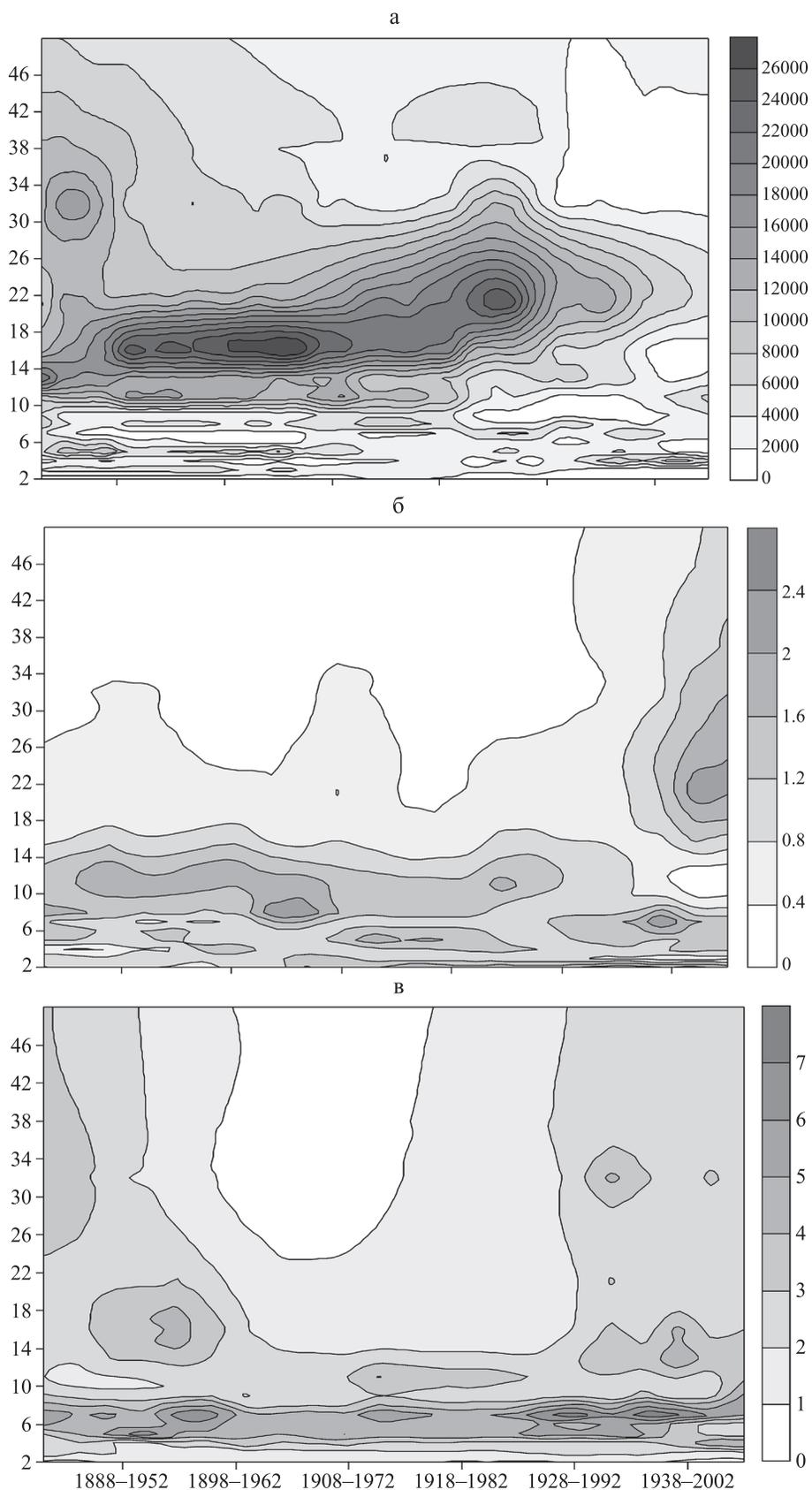
Таким образом, на основании спектральных оценок, полученных в среднем за период 1892–2007 гг., можно заключить, что характерные для годового стока Волги квазипериодические колебания с периодами около 5, 6–8 и 12–16 лет на 70–80% могут быть объяснены изменчивостью зимнего (январь–март) и летнего (июнь–сентябрь)  $I_{\text{NAO}}$ . Тем не менее, эти результаты требуют оценки устойчивости выявленных периодичностей на протяжении рассмотренного периода. Рассмотрим

скользящие спектры годового стока Волги и средних сезонных индексов  $I_{\text{NAO}}$ , рассчитанные по 64-летним периодам с 1882–1945 до 1944–2007 гг. (рис. 6а–в). Мощная полоса спектральной плотности выделяется в области периодов 14–18 лет. Максимум дисперсии, связанный с этой периодичностью, сохраняется в период с конца 1880-х до начала 1970-х годов. В последующие 30 лет он ослабляется, диапазон периодов заметно расширяется, а полоса максимальной дисперсии смещается в сторону 18–22-летних периодов, пик которой выявляется в 1920–1980-х годах. Примерно с начала 1990-х спектральная плотность стока на этих периодах уменьшается на фоне сокращения общей дисперсии. Одновременно наблюдается рост дисперсии, связанной с 4–5-летними периодичностями, которые отличались стабильностью в течение первых 60–70 лет.

Весьма похожий максимум дисперсии обнаруживается в спектре летнего  $I_{\text{NAO}}$  (см. рис. 6б) в области периодов 10–14 лет. Полоса спектральной плотности  $I_{\text{NAO}}$ , связанная с этими периодами, испытывает изменения (в частности, снижение с начала 1970-х годов и еще больший спад с начала 1990-х), временные рамки которых соответствуют полосе максимума дисперсии скользящего спектра годового стока Волги (см. рис. 6а), но со сдвигом в сторону низких частот. Полосы увеличения спектральной плотности наблюдаются также около периодов 4–5 лет (с 1900-х до 1980-х годов), 2-х (с 1970-х годов) и 6–8 лет (с 1990-х годов).

Для спектра зимнего (январь–март)  $I_{\text{NAO}}$  (см. рис. 6в), как известно [16, 22], характерна непрерывная полоса максимума дисперсии в области квазидесятилетних периодичностей. Из рис. 6в видно, что в определенные периоды она сливается с 5-летними циклами, а наибольшая концентрация дисперсии в области периодов 7–9 лет отмечается с 1920-х до 2000-х годов. В спектре стока квазидесятилетние (7–9 лет) периодичности проявляются достаточно слабо, а в последнем тридцатилетии, судя по величине связанной с ними дисперсии, ослабевают и смещаются в сторону 6–7-летних периодов. Тем не менее, они образуют непрерывную полосу в поле скользящего спектра в течение всего периода 1882–2007 гг.

**Обсуждение результатов и выводы.** На протяжении более чем векового ряда колебаний стока Волги и индекса NAO с 1882 г. наблюдается согласованность 30–40 летних флуктуаций, с некоторым запаздыванием стока по отношению к циркуляции. В то же время, полученные ранее оценки линейной корреляции межгодовых колебаний стока Волги с изменениями индекса NAO указывают



**Рис. 6.** Изменение спектров стока Волги и сезонных индексов NAO за 1882–2007 гг. Показаны 64-летние скользящие спектральные функции (а) годового стока Волги, (б) летнего (июнь–сентябрь) и (в) зимнего (январь–март) индекса NAO.

на слабую, с точностью до знака, отрицательную связь [3, 15]. Это обстоятельство, а также сложный и растянутый во времени процесс формирования стока в крупных речных бассейнах, указывает на возможный нелинейный характер связи стока Волги с вариациями NAO, которые рассматривались путем спектрального анализа по методу разложения Фурье.

Спектр 126-летнего ряда годового стока Волги имеет характерные периоды колебаний около 14–18 лет, с которыми связана большая часть его изменчивости, а также около 5 и 6–8 лет, не представляющие значительной доли общей изменчивости стока в 1882–2007 гг. В спектре среднего за год ряда  $I_{NAO}$  такой же продолжительности отмечаются близкие периодичности, но они находятся в обратном соотношении по доли в дисперсии. Доминирующими для этого циркуляционного индекса являются 7–9-летние циклы, известные как “квазидесятилетние” [16, 23], которые, в основном, обусловлены средним зимним (январь–март)  $I_{NAO}$ . Периодичности в 5 и 12–16 лет связаны, в основном, со средним для летнего периода (июнь–сентябрь)  $I_{NAO}$ . Оценки взаимной когерентности показывают, что 7–9-летние колебания годового стока Волги имеют около 70–80% общей дисперсии с зимним  $I_{NAO}$ . Примерно такая же доля дисперсии стока может быть с периодами 5, а также, 12–16 лет, может быть связана с летним  $I_{NAO}$ . Общий вклад этих квазипериодичностей, как видно из функции спектральной плотности, может объяснять значительную долю дисперсии стока в среднем за 1882–2007 гг., причем, судя по соотношению величины дисперсии в спектре годового стока в областях периодов 12–16 лет и 7–8 лет, вклад летнего  $I_{NAO}$  в изменчивость годового стока даже превышает долю изменчивости, обусловленную зимним  $I_{NAO}$ . Это может быть обусловлено тем, что летний гидротермический режим оказывает влияние не только на приходную часть водного баланса – осадки, но и на испарение.

Анализ коспектров для рассмотренных кросс-спектральных оценок указывает на связь стока в противофазе с  $I_{NAO}$  для всех рассмотренных периодичностей кроме 4–5-летних и длинно-периодных, около 40 лет. Они проявляются только для весеннего стока, и могут быть обусловлены изменениями средних многолетних объемов годового и весеннего стока Волги, связанных с увеличением снегонакопления на севере бассейна Камы, в годы положительной фазы NAO.

Анализ 64-летнего скользящего спектра стока Волги показывает, что максимум дисперсии, связанный с периодичностями 14–18 лет, сохра-

няется в период с конца 1880-х до начала 1970-х годов. В последующие годы он ослабляется, а полоса максимальной дисперсии смещается в сторону 18–22-летних периодов. С начала 1990-х уменьшение спектральной плотности на этих периодах сопровождается сокращением общей дисперсии стока. В это же время наблюдается рост дисперсии, связанной с 4–5-летними периодичностями, которые были достаточно устойчивы в течение первых 60–70 лет.

Сравнение выявленных максимумов в спектре стока и их изменение во времени со спектром летнего  $I_{NAO}$  указывает на их сходство, хотя в последнем случае полоса увеличения дисперсии относится к области периодов 10–14 лет. Менее продолжительные полосы увеличения спектральной плотности около 4–5 лет (с 1900-х до 1980-х годов), около 2 лет (с 1970-х годов) и 6–8-летних (с 1990-х годов) не обнаруживаются в спектре стока, по крайней мере, явно. В то же время отмеченные совпадения двух рассмотренных спектров дает основание предполагать, что 14–18 лет и 18–22 гг. генерируются колебаниями летнего гидротермического режима, связанного с квазипериодическими флуктуациями летнего  $I_{NAO}$ . Сдвиг периодов основного максимума в спектре стока Волги в область на 4–8 лет по сравнению со спектром летнего  $I_{NAO}$  может быть вызван инерционностью самого бассейна, который является колебательной системой [11], а также наложением разных периодичностей, в том числе и связанных с режимом твердых осадков и колебаниями  $I_{NAO}$  в зимний сезон.

Наибольшая спектральная плотность в области квазидесятилетних (7–9 лет) периодичностей в изменчивости стока, связанных с колебаниями зимнего  $I_{NAO}$ , выявляется с 1920 до 2000-х годов. В последнем тридцатилетии они ослабевают и смещаются в сторону 6–7-летних периодов и образуют непрерывную полосу в поле скользящего спектра в течение всего периода 1882–2007 гг., что свидетельствует об их устойчивости, несмотря на то, что с ними связана лишь незначительная часть дисперсии стока Волги.

Рассмотренные средние для 1882–2007 гг. спектры и кросс-спектральные оценки позволяют выявить в многолетней изменчивости стока Волги отклик колебаний циркуляционного режима, связанного с NAO. Колебания годового стока Волги с периодами около 7–9 лет, а также 12–16 и 5 лет, на 70–80% могут быть связаны с изменчивостью  $I_{NAO}$  в зимний и летний сезоны. Общий вклад этих квазипериодичностей может объяснять существенную долю дисперсии стока в среднем за 1882–2007 гг., причем вклад летнего  $I_{NAO}$  в изменчивость

годового стока превышает долю изменчивости, обусловленную зимним  $I_{\text{NAO}}$ . Судя по соотношениям дисперсии и периодов в скользящих спектрах годового стока и  $I_{\text{NAO}}$ , отражающих их временные изменения, с изменчивостью летнего  $I_{\text{NAO}}$  может быть связана основная доля изменчивости стока Волги в 1880–1970 гг. на периодах около 14–18 лет.

Это соответствует общим закономерностям распределения аномалий температуры и осадков, обусловленных усилением (ослаблением) зонального переноса описываемого  $I_{\text{NAO}}$  на территории Европы, в частности, росту (сокращению) циклонической активности и осадков на севере и северо-западе при их сокращении (росте) на юго-востоке. Зимой водосбор Волги оказывается в области разнонаправленного влияния NAO на зимнюю аккумуляцию снега: обратная зависимость толщины снежного покрова в конце зимы от  $I_{\text{NAO}}$  на Верхней Волге и бассейне р. Белой меняется на положительную на севере Средней Волги и бассейна Камы. В силу того, что эта часть бассейна представляет собой основную область питания Волги, связь толщины снега здесь с зимним  $I_{\text{NAO}}$ , выявленная с 1936 до 2000-х годов, может обуславливать долгопериодные аномалии стока Волги. Вклад подобных аномалий в изменения средних объемов стока может быть достаточным для их многолетнего роста в период положительной и снижения в период отрицательной фазы NAO, что, по-видимому, отражается в синхронной связи 30–40-летних колебаний стока Волги и  $I_{\text{NAO}}$ , проявляющейся с середины прошлого столетия.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 14-05-00761, а также Программы ФНИ государственных академий наук (проект 0148-2014-0015).

**Acknowledgements.** The study is supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 14-05-00761) and the Program of the BSR of state academies (project no. 0148-2014-0015).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арпе К., Бенгтссон Л., Голицын Г. С., Мохов И. И., Семенов В. А., Спорышев П. В. Анализ и моделирование изменений гидрологического режима в бассейне Каспийского моря // Докл. РАН. 1999. Т. 366. № 2. С. 248–252.
2. Алексеевский Н. И., Фролова Н. Л., Антонова М. М., Игонина М. И. Оценка влияния изменений климата на водный режим и сток рек бассейна Волги // Вода: химия и экология. 2013. № 4. С. 3–12.
3. Бабкин В. И. Северо-Атлантическое колебание и многолетняя динамика стока рек Европы. Современные проблемы гидрометеорологии. Сб. науч. тр. Вып. 123. СПб.: Изд-во РГГМУ, 1999. 334 с.
4. Бабкин В. И. Сток Волги в периоды ослабления и усиления циклонической активности // Метеорология и гидрология. 1995. № 1. С. 94–100.
5. Бардин М. Ю., Полонский А. Б. Североатлантическое колебание и синоптическая изменчивость в Европееко-Атлантическом регионе в зимний период // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 2. С. 3–13.
6. Второй оценочный докл. Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. С. 551–587.
7. Георгиади А. Г., Коронкевич Н. И., Зайцева И. С., Кашутина Е. А., Барабанова Е. А. Климатические и антропогенные факторы в многолетних изменениях стока реки Волги // Водное хозяйство России. 2013. № 4. С. 4–19.
8. Георгиади А. Г., Коронкевич Н. И., Милукова И. П., Кашутина Е. А., Барабанова Е. А. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 2. Бассейны рек Волги и Дона. М.: МАКС Пресс, 2014. 214 с.
9. Зайков Б. Д. Многолетние колебания стока Верхней Камы. Труды по комплексному изучению Каспийского моря. Вып. XIII. М.–Л.: Изд-е АН СССР. 1940.
10. Зайцева И. С. Многолетние колебания стока Волги и глобальные изменения климата // Изв. РАН. Сер. геогр. 1996. № 5. С. 45–54.
11. Кайсл Ч. Анализ временных рядов гидрологических данных. Л.: Гидрометеиздат. 1972. 138 с.
12. Крыжов В. Н. Связь средних месячной, сезонной и годовой температур воздуха на севере России с индексами зональной циркуляции зимой // Метеорология и гидрология. 2003. № 2. С. 15–28.
13. Никонова Р. Е., Бортник В. Н. Характеристика межгодовой и сезонной изменчивости составляющих водного баланса и уровня Каспийского моря за период его современного повышения // Водные ресурсы. 1994. Т. 21. № 4. С. 410–414.
14. Попова В. В., Шмакин А. Б. Региональная структура колебаний температуры приземного воздуха в Северной Евразии во второй половине XX – начале XXI века // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 2. С. 161–175.
15. Родионов С. Н. Современные изменения климата Каспийского моря. М.: Гидрометеиздат, 1989. 123 с.
16. Рыбак Е. А., Рыбак О. О. О спектральной структуре северо-атлантического колебания // Метеорология и гидрология. 2005. № 3. С. 69–77.
17. Сидоренков Н. С., Швейкина В. И. Исследование климатического режима бассейна Волги и Каспийского моря за последнее столетие // Водные ресурсы. 1996. Т. 23. № 4. С. 401–406.

18. Arpe K., Bengtsson L., Golitsyn G.S., Mokhov I.I., Semenov V., and Sporyshev P. Connection between Caspian Sea level variability and ENSO // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. № 17. P. 2693–2699.
19. Hurrell J.W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation // *Science.* 1995. V. 269. P. 676–679.
20. Hurrell J.W., Kushnir Y., Ottersen G., and Visbeck M. An overview of the North Atlantic Oscillation: The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact // *Geophys. Monogr.* 2003. V. 134. P. 1–35.
21. IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, UK and NY, USA: Cambridge Univ. Press. 2013. 36 p.
22. Jones P.D., Jónsson T., and Wheeler D. Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland // *Int. J. Climatol.* 1997. № 17. P. 1433–1450.
23. Marshall J., Kushnir Y., Battisti D., Chang P., Czaja A., Dickson R., Hurrell J., McCartney M., Saravanan R., and Visbeck M. North Atlantic climate variability: phenomena, impacts and mechanisms // *International J. of Climatology.* 2001. V. 21. P. 1863–1898.
24. Mokhov and I.I., Smirnov D.A. El Niño-Southern Oscillation drives North Atlantic Oscillation as revealed with nonlinear techniques from climatic indices // *Geophys. Res. Lett.* 2006. № 33. L03708. doi:10.1029/2005GL024557.
25. Rogers J.C. North Atlantic storm track variability and its association to the North Atlantic Oscillation and climate variability of Northern Europe // *J. Climate.* 1997. V. 10. № 7. P. 1635–1647.
26. Scaife A.A., Folland C.K., Alexander L.V., Moberg A., and Knight J.R. European climate extremes and the North Atlantic Oscillation // *J. Climate.* 2008. V. 21. № 1. P. 72–83.
27. Semenov V.A., Latif M., Dommenges D., Keenlyside N.S., Strehz A., Martin T., and Park W. The impact of North Atlantic-Arctic multidecadal variability on Northern Hemisphere surface air temperature // *J. of Climate.* 2010. № 23 (21). P. 5668–5677. doi: 10.1175/2010JCLI3347.1.
3. Babkin V.I. North Atlantic oscillation and multiyear dynamics of European river runoff, in *Sovremennye problemy gidrometeorologii. Sbornik nauchnykh trudov. Vyp. 123* (Actual problems of hydrometeorology. Book of science letters. Vol. 123). St. Petersburg: RSHMU Publ., 1999. (In Russ.). 334 p.
4. Babkin V.I. Volga runoff in the periods of weakened and strengthened cyclonic activity. *Meteorologiya i gidrologiya*, 1995, no. 1, pp. 94–100. (In Russ.).
5. Bardin M. Yu., Polonsky A.B. North Atlantic oscillation and synoptic variability in the European-Atlantic region in winter. *Izv. Atm. Ocean. Phys.*, 2005, vol. 41, no. 2, pp. 127–136.
6. *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii RF* (The second estimating report of Roshydromet on climate change and its consequences in the territory of RF). Moscow: Rosgidromet Publ., 2014. 1008 p.
7. Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Zaytseva I.S., Kashutina E.A., Barabanjva E.A. Climatic and anthropogenic factors in multiyear changes of Volga river runoff. *Vodnoye hozyaistvo Rossii*, 2013, no. 4, pp. 4–19. (In Russ.).
8. Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukova I.P., Kashutina E.A., Barabanova E.A. *Sovremennyye i scenariynye izmeneniya rechnogo stoka v basseynah krupneyshih rek Rossii. Chast' 2. Basseiny rek Volgi i Dona* (Present-day and scenario change of river runoff over the largest river basins. Part 2. Basins of Volga and Don rivers). Moscow: MAKSPress Publ., 2014. 214 p. (In Russ.).
9. Zaykov B.D. *Mnogoletnie kolebaniya stoka Verhnei Kamy*, in *Trudy po kompleksnomu izucheniyu Kaspiiskogo morya. Vyp. XIII* (Letters on complex study of the Caspian Sea. Vol. XIII). Город: AN SSSR Publ., 1940. 53 p.
10. Zaitseva I.S. Perannual variations of Volga river runoff and global climate changes. *Izv. Ross. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 1996, no. 5, pp. 45–54. (In Russ.).
11. Kaisl Ch. *Analiz vremennykh ryadov gidrologicheskikh dannykh* (Analysis of time series of hydrological data). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972.
12. Kryzhov V.N. Connection between monthly mean, seasonal, and annual air temperatures in Northern Russia and winter zonal circulation indices. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2003, no. 2, pp. 9–19.
13. Nikonova R.E., Bortnik V.N. Characteristic of inter-annual and seasonal variability of water balance components and level of the Caspian Sea for the period of its recent rising. *Vodnye resursy*, 1994, vol. 21, no. 4, pp. 410–414. (In Russ.).
14. Popova V.V., Shmakina A.B. Regional structure of surface-air temperature fluctuations in northern Eurasia in the latter half of the 20th and the early 21st centuries. *Izv. Atm. Ocean. Phys.*, 2010, vol. 46, no. 2, pp. 144–158.
15. Rodionov S.N. *Sovremennyye izmeneniya klimata Kaspiyskogo morya* (Recent changes of Caspian Sea climate). Moscow: Gidrometeoizdat Publ., 1989. 123 p.

## REFERENCES

1. Arpe K., Bengtsson L., Golitsyn G.S. Mokhov I.I., Semenov V.A., Sporyshev P. Analysis and modeling of the changes of Caspian Sea hydrology regime. *Doklady Akademii Nauk*, 1999, vol. 366, no. 2, pp. 248–252. (In Russ.).
2. Alekseevskiy N.I., Frolova N.L., Antonova M.M., Igonina M.I. Estimate of the climate change effect on water regime and runoff of Volga basin rivers. *Voda: khimiya i ekologiya*, 2013, no. 4, pp. 3–12. (In Russ.).

16. Rybak E. A., Rybak O. O. Spectral structure of the North Atlantic oscillation. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2005, no. 3, pp. 53–60.
17. Sidorenkov N. S., Shveikina N. S. Changes in the climatic regime of the basins of the Volga and the Caspian sea in the twentieth century. *Water Resour.* 1996. Vol. 23, no. 4., pp. 369–374.
18. Arpe K., Bengtsson L., Golitsyn G. S., Mokhov I. I., Semenov V., Sporyshev P. Connection between Caspian Sea level variability and ENSO. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, vol. 27, no. 17, pp. 2693–2699.
19. Hurrell J. W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science*, 1995, vol. 269, no. 5224, pp. 676–679.
20. Hurrell J. W., Kushnir Y., Otttersen G., Visbeck M. An overview of the North Atlantic Oscillation, in *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*. American Geophysical Union, Washington, D. C., 2003, pp. 1–35. doi: 10.1029/134GM01
21. IPCC, 2013: Summary for Policymakers, in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and NY, USA. 2013. 36 p.
22. Jones P. D., Jónsson T., Wheeler D. Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland. *Int. J. Climatol.*, 1997, no. 17, pp. 1433–1450.
23. Marshall J., Kushnir Y., Battisti D., Chang P., Czaja A., Dickson R., Hurrell J., McCartney M., Saravanan R., Visbeck M. North Atlantic climate variability: phenomena, impacts and mechanisms. *Int. J. Climatol.*, 2001, vol. 21 (15), pp. 1863–1898.
24. Mokhov I. I., Smirnov D. A. El Niño-Southern Oscillation drives North Atlantic Oscillation as revealed with nonlinear techniques from climatic indices. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, vol. 33, pp. L03708.
25. Rogers J. C. North Atlantic storm track variability and its association to the North Atlantic Oscillation and climate variability of Northern Europe. *J. Climate.*, 1997, vol. 10, no. 7, pp. 1635–1647.
26. Scaife A. A., Folland C. K., Alexander L. V., Moberg A., Knight J. R. European climate extremes and the North Atlantic Oscillation. *J. Climate.*, 2008, vol. 21, no. 1, pp. 72–83.
27. Semenov V. A., Latif M., Dommenges D., Keenlyside N. S., Strehz A., Martin T., Park W. The impact of North Atlantic-Arctic multidecadal variability on Northern Hemisphere surface air temperature. *J. Climate.*, 2010, no. 23 (21) pp. 5668–5677.