

ГИДРОФИЗИКА. ГИДРОЛОГИЯ

УДК 551.461.2 (262.81)

УРОВЕНЬ КАСПИЙСКОГО МОРЯ КАК ИНДИКАТОР КРУПНОМАСШТАБНОГО ВЛАГООБМЕНА В СИСТЕМЕ «ОКЕАН – АТМОСФЕРА – СУША»

В. Н. Малинин, С. М. Гордеева

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

Обсуждается вся цепочка причинно-следственных связей в системе «Северная Атлантика – атмосфера – бассейн Волги – уровень Каспия». Ее составной частью является гидрологическая система «Каспийское море», под которой понимается собственно море, его водосборный бассейн и атмосфера над морем и бассейном. В результате ее анализа показано, что изменения объема вод моря описываются комплексом разных по природе гидрологических и метеорологических факторов, имеющих различную пространственно-временную изменчивость и определяемых с существенно неодинаковой точностью. Основным фактором, определяющим межгодовую изменчивость объема вод моря, а следовательно, и приращений уровня Каспия, является годовой сток Волги. Изменчивость стока Волги полностью контролируется осадками в стокоформирующей зоне бассейна. В свою очередь, формирование межгодовых колебаний осадков в значительной степени определяется притоком (оттоком) вертикально интегрированного горизонтального потока водяного пара через боковые границы стокоформирующей зоны бассейна Волги. Показано, что зональный перенос водяного пара с акватории Северной Атлантики является определяющим фактором межгодовой изменчивости осадков в бассейне Волги как в зимний, так и в летний периоды года. Установлено, что в результате активизации циклонической деятельности в Северной Атлантике, особенно в Норвежском море, обусловленной процессами крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы, происходит повышение испарения, усиление зонального переноса водяного пара в Европу, а затем в бассейн Волги. Вследствие этого в стокоформирующей зоне бассейна выпадает большее количество осадков, происходит повышение годового стока Волги и уровня Каспия. Обратная картина отмечается при ослаблении циклонической активности в Северной Атлантике. Поэтому уровень Каспийского моря является интегральным индикатором крупномасштабного влагообмена в системе «океан – атмосфера – суша».

Ключевые слова: Каспийское море; морской уровень; водный баланс; сток Волги; осадки в бассейне Волги; перенос атмосферной влаги; Северная Атлантика; взаимодействие океана с атмосферой.

V. N. Malinin, S. M. Gordeeva. CASPIAN SEA LEVEL AS AN INDICATOR OF LARGE-SCALE MOISTURE CYCLING IN THE OCEAN-ATMOSPHERE-LAND SYSTEM

The article discusses the entire causal chain in the North Atlantic – atmosphere –Volga basin – Caspian Sea level system. Its component part is the “Caspian Sea” hydrological system, interpreted as the sea itself, its drainage basin, and the atmosphere above the sea and the basin. Its analysis has demonstrated that changes in the sea water volume are modeled by a set of hydrological and meteorological factors of different nature, with different spatio-temporal variability, and determined at significantly different accuracies. The main factor for the interannual variation of the sea water volume, and hence the increment of the Caspian level, is the annual runoff via the Volga. The Volga streamflow variation is fully controlled by precipitation in the drainage zone of the catchment. In turn, interannual precipitation fluctuations are largely defined by the inflow (outflow) of a vertically integrated horizontal flow of water vapor across the lateral boundaries of the runoff-producing zone of the Volga basin. The zonal transfer of water vapor from the North Atlantic is shown to be the determinant in the among-year variation of precipitation in the Volga basin both in winter and in summer. It has been established that evaporation is growing and the zonal transfer of water vapor to Europe and then to the Volga basin is being intensified as a result of a higher cyclonic activity in the North Atlantic, the Norwegian Sea in particular, due to large-scale ocean-atmosphere interactions. Consequently, more rainfall occurs in the runoff-producing zone of the basin, annual streamflow of the Volga increases, and the Caspian level rises. The reverse is observed when cyclonic activity in the North Atlantic weakens. Therefore, the Caspian Sea level is an integral indicator of large-scale moisture exchange in the ocean-atmosphere-land system.

Key words: the Caspian Sea; sea level; water balance; Volga streamflow; precipitation in the Volga drainage basin; atmospheric moisture transfer; North Atlantic; ocean-atmosphere interaction.

Введение

Экономическое значение Каспийского моря для населения прибрежных государств трудно переоценить. Кроме того, Каспий – уникальный водоем, не имеющий аналогов в мире по биологическому многообразию флоры и фауны. Социально-экономическое развитие в прибрежной зоне моря связано с колебаниями его уровня. Негативное воздействие изменения уровня отражается на рациональном использовании природного потенциала, в частности, земельных, рыбных, рекреационных ресурсов, а также ресурсов нефти и газа. Поэтому изучение причин межгодовых колебаний и особенно долгосрочный прогноз уровня Каспийского моря (УКМ) является чрезвычайно актуальной проблемой. Достаточно сказать, что в 1960–70-е годы гидрометеорологическая наука «проспала» длительный подъем уровня, начавшийся в конце 1970-х, вследствие чего экономический ущерб исчислялся в миллиардах долларов.

С тех пор прошло полвека, придумано несколько десятков методов сверхдолгосрочного прогноза УКМ, обзор которых содержится в [Водный..., 2016], но ни один из них не получил полного признания, и мы до сих пор не можем уверенно говорить о том, когда начнется новый длительный рост (снижение) УКМ. Это

связано с тем, что до настоящего времени «...отсутствует ясное понимание механизмов, управляющих изменчивостью уровня...» [Водный..., 2016]. На наш взгляд, принципиальной методологической ошибкой многих исследователей является то, что они пытаются построить прогностические модели непосредственно с годовыми значениями УКМ. В этом случае *теряется физический смысл полученных связей, ибо прогнозировать надо внутригодовые приращения уровня, которые входят в уравнение водного баланса моря и позволяют физически правильно рассчитывать сам УКМ.* Действительно, уровень замкнутого водоема в некоторый конечный момент времени t может быть выражен следующим образом:

$$h_t = h_0 + \int_0^t \frac{\partial h}{\partial t} dt, \quad (1)$$

где h_t и h_0 – соответственно уровень водоема в конечный и начальный момент времени, $\partial h / \partial t$ – частная производная уровня моря за период t .

В настоящее время надежными можно считать только методы прогноза характеристик уровня моря с годовой заблаговременностью. Это прогноз внутригодового хода УКМ, разработанный и в течение нескольких десятилетий успешно применяемый в Гидрометцентре [Абу-

зьяров, 2009 и др.], метод прогноза внутригодовых приращений уровня, разработанный в ГГО [Мещерская, Александрова, 1993] на основе метеорологических данных на водосборе Волги и Урала, и физико-статистический метод прогноза составляющих водного баланса и УКМ, предложенный в РГГМУ [Малинин, 1994а], основанный на генетической концепции формирования изменчивости уровня. Цель данной работы – выявление генезиса межгодовых колебаний уровня моря, без знания которого невозможно успешно прогнозировать УКМ.

Генезис межгодовых колебаний уровня моря

Гидрологическая система «Каспийское море»

Как известно, уровню Каспия свойственны значительные межгодовые колебания, амплитуда которых может достигать нескольких метров. Из рис. 1 видно, что в XX столетии размах колебаний уровня моря составил 3,2 м, причем можно выделить три достаточно длительных стабильных периода, в течение которых изменения уровня оказываются сравнительно однородными. Первый период (1900–1929 гг.) характеризуется стоянием уровня, т. е. его колебания носят случайный характер относительно некоторого среднего положения. Второй (1930–1977 гг.) сопровождается почти монотонным падением уровня, причем в течение 1930–1938 гг. он понизился на 1,75 м. На-

конец, третий период, начавшийся в 1978 г., характеризуется интенсивным ростом уровня за 1978–1995 гг., когда он повысился на два метра. На фоне разнонаправленных колебаний УКМ в XX столетии отмечается его постепенное снижение с линейным трендом, равным –17 мм/год и описывающим 33 % дисперсии исходного ряда.

Однако колебания уровня в XX веке не относятся к числу выдающихся событий в истории Каспия. Полный размах колебаний уровня за последние 2000 лет, по данным палеоклиматических реконструкций [Варущенко и др., 1987], мог составить 12 м, при этом его наименьшая отметка, согласно балтийской системе высот, отмечалась в середине V в. (–34,5 м), а наивысшая – в начале нашей эры (–22,5 м).

Причины столь значительных колебаний подробно обсуждались в монографии [Малинин, 1994а]. Для этого было введено понятие гидрологической системы «Каспийское море», под которой понимается собственно море, его водосборный бассейн и атмосфера над морем и бассейном. Данную систему для годовых значений параметров можно описать соответствующими уравнениями водного баланса, складывая которые, получим:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\oint_{Lc} F_n dL - \frac{\partial S_0}{\partial t} - \frac{\partial W_{0m}}{\partial t}. \quad (2)$$

Левый член уравнения (2) характеризует внутригодовые изменения объема воды в Каспии. Первый член справа – результирующий приток (отток) вертикально интегрированного гори-



Рис. 1. Межгодовой ход уровня Каспийского моря по инструментальным наблюдениям (за ноль принята отметка –28 м БС)

Fig. 1. The interannual variation of the Caspian Sea level according to instrumental observations (–28 m of BS is taken as zero)

горизонтального потока водяного пара через боковые границы системы «Каспийское море плюс водосборный бассейн», второй член – внутригодовые изменения запасов влаги в почвенно-грунтовой толще этой системы, третий член – внутригодовые изменения влагосодержания атмосферы над этой системой, которыми можно пренебречь без существенной потери точности. На основании теоремы Остроградского – Гаусса первый член справа при его делении на площадь под контурным интегралом соответствует дивергенции вертикально интегрированного горизонтального полного потока водяного пара ($\text{div}\vec{F}$). Итак, *изменения объема вод моря описываются комплексом разных по природе гидрологических и метеорологических факторов, имеющих различную пространственно-временную изменчивость и определяемых с существенно неодинаковой точностью.*

Наземная ветвь гидрологической системы

Внутригодовые изменения объема воды в Каспии, определяемые через уравнение водного баланса моря, функционально связаны с внутригодовыми приращениями его уровня, т. е. $\Delta h = \Delta V/A$, где A – площадь моря. Тогда в соответствии с уравнением водного баланса моря имеем:

$$\Delta h = A^{-1} (Q_6 + U_6 - Q_{\text{КБГ}} + P_{\text{М}} - E_{\text{М}}), \quad (3)$$

где Q_6 – приток речных вод, U_6 – приток подземных вод, $Q_{\text{КБГ}}$ – отток морских вод в залив Кара-Богаз-Гол, $P_{\text{М}}$ – осадки на акваторию, $E_{\text{М}}$ – испарение с акватории моря. В данном уравнении

не учитываются стерические колебания уровня, а также водообмен через дно моря. Так как компоненты уравнения (3) непосредственно влияют на уровень моря, то они являются первичными (внутренними) уровнеобразующими факторами. В свою очередь каждая из них зависит от множества других факторов, которые опосредованно воздействуют на морской уровень и, следовательно, их можно рассматривать как вторичные (внешние) уровнеобразующие факторы.

Принципиальная особенность данного уравнения состоит в том, что формирование внутригодовых приращений уровня моря происходит двумя совершенно разными путями. С одной стороны, они зависят от процессов влагообмена через поверхность моря, а с другой – от зоны формирования стока Волги, находящейся за тысячи километров от самого моря в совершенно иных климатических условиях. Дело в том, что U_6 и $Q_{\text{КБГ}}$ дают значительно меньший вклад в приращения уровня, а величина Q_6 практически полностью зависит от стока Волги (Q_6), который составляет около 80 % от суммарного притока и примерно на 80 % определяет его дисперсию. При этом сам сток Волги формируется преимущественно в лесной зоне европейской части России.

На рис. 2 представлен график зависимости межгодовых колебаний внутригодовых изменений объема моря ($\text{км}^3/\text{год}$) от годового стока Волги в г. Самара ($\text{км}^3/\text{год}$) за период с 1890 по 1990 г. Нетрудно видеть, что зависимость между этими переменными носит линейный характер и с помощью МНК аппроксимирована

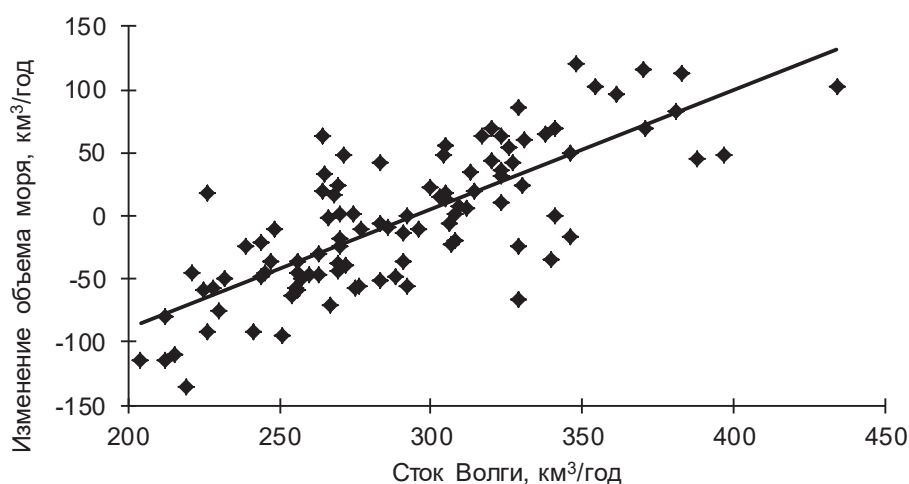


Рис. 2. Диаграмма рассеяния внутригодовых изменений объема Каспийского моря ($\text{км}^3/\text{год}$) от годового стока Волги в г. Самара ($\text{км}^3/\text{год}$) за период с 1890 по 1990 г.

Fig. 2. Ratio of intra-annual changes in the Caspian Sea volume (km^3/year) to the annual Volga runoff in Samara (km^3/year) for the period of 1890–1990

уравнением регрессии: $\Delta V = -246,7 + 0,0323Q_b$. Коэффициент детерминации данного уравнения составляет $R^2 = 0,64$, а среднеквадратическая ошибка – $34,6 \text{ км}^3/\text{год}$, или $2,4 \%$ от стандартного отклонения годового стока Волги. Отсюда видно, что примерно две трети межгодовой изменчивости приращений уровня обусловлены притоком речных вод, сформированным в лесной зоне бассейна Волги. Именно здесь за счет межгодовой изменчивости увлажнения поверхности суши формируется генетический сигнал, который затем как сток Волги поступает в море и в значительной степени влияет на межгодовые колебания уровня. Важно и то, что ряды Q_b и Δh , обладающие совершенно различной физической природой, имеют очень близкую спектральную структуру межгодовой изменчивости, что также подтверждает генетическую обусловленность формирования Δh от Q_b . По-иному обстоит дело с эффективным испарением, т. е. с разностью испарение минус осадки над морем, которое хотя и дает определенный вклад (около 30%) в изменчивость приращений уровня, однако этот вклад в основном сконцентрирован в области белого шума [Малинин, 2009].

Очень сложной является оценка второго члена справа в уравнении (2). Подробная оценка его выполнена в работе [Малинин, 1994а]. С учетом преобладающей роли стока Волги в приращениях уровня Каспия, можно записать:

$$\partial S_b / \partial t \approx \partial S_b / \partial t, \quad (4)$$

где $\partial S_b / \partial t$ отражает внутригодовые изменения запасов поверхностных и подземных вод в стокоформирующей части бассейна Волги, находящейся в условиях избыточного и достаточного увлажнения. Поскольку прямые оценки $\partial S_b / \partial t$ практически невозможны, то обратимся к уравнению водного баланса системы «атмосфера – литосфера» для бассейна Волги без учета влагосодержания атмосферы в следующем виде:

$$\partial S_b / \partial t = -\text{div} \bar{F} - Q_b. \quad (5)$$

В работе [Смирнов, Малинин, 1988] выполнена оценка значений $\text{div} \bar{F}$ и речного стока Волги у г. Самары за гидрологический год (октябрь–сентябрь) с учетом изменений запасов влаги в водохранилищах Волжско-Камского каскада и показано, что между ними отмечается хорошее соответствие, т. е. $\text{div} \bar{F} \approx Q_b$. Отсюда следует, что для площадей порядка 10^6 км^2 и периодов времени в гидрологический год величина $\partial S / \partial t$ является уже малой по сравнению с другими межгодовыми колебаниями компо-

нентов водного баланса. Понятно, что межгодовые колебания значений $\partial S / \partial t$ ощутимо зависят от локальных ландшафтных условий и на больших площадях могут быть весьма значительными. Однако при пространственном осреднении в результате их разнонаправленных колебаний суммарное значение $\partial S / \partial t$ уменьшается и становится малой величиной для площадей порядка 10^6 км^2 [Смирнов, Малинин, 1988].

Итак, можно сделать вывод, что *формирование межгодовых колебаний стока Волги, а следовательно, и приращений уровня Каспия в значительной степени определяется притоком (оттоком) вертикально интегрированного горизонтального потока водяного пара через боковые границы стокоформирующей зоны бассейна Волги.*

Есть основания полагать, что формирование стока Волги от начала половодья до начала следующего половодья практически полностью зависит от увлажнения в ее бассейне за два предшествующих года. В свою очередь, общее увлажнение представляет собой разность осадки минус испарение, причем межгодовая изменчивость осадков для сравнительно больших территорий значительно выше межгодовой изменчивости суммарного испарения [Малинин, 1994а; Малинин и др., 2014]. Исходя из этого, статистическая модель для годового стока Волги может быть записана в следующем виде:

$$Q_i = f(P_{(i-1)j}^x, P_{(i-1)j}^T, P_{(i-2)j}^x, P_{(i-2)j}^T), \quad (6)$$

где Q_i – календарный годовой сток реки; P_j^x , P_j^T – суммарные за холодный (октябрь–март) и теплый (апрель–сентябрь) периоды года осадки на j станции; i – номер текущего года; $i-1$, $i-2$ – номера двух предыдущих лет соответственно. Основное влияние на сток оказывает первый предшествующий год. Влияние второго года сказывается главным образом в аномальные по характеру увлажнения годы.

Эффективность прогностической модели (6) доказана в работе [Малинин, 1994а], в которой за период 1891–1990 гг. приведены результаты прогноза годового стока Волги по очень большому числу осадкомерных пунктов, усредненных для административных территорий (областей) на основе использования пошагового алгоритма множественной линейной регрессии. После 1991 года и резкого уменьшения наблюдательной сети использование осредненных осадков для административных областей стало невозможным. Поэтому были выполнены новые расчеты годового стока Волги по малому числу ($n = 30$) реперных осадкомерных станций в лесной зоне [Описание..., 2019]. Осадки брались отдельно в теплое и холодное полугодия

Статистические оценки годового стока р. Волги по зависимой (1983–2008 гг.) и независимой (2009–2013 гг.) выборке для всех деревьев решений [Malinin, Gordeeva, 2019]

Statistical assessment of the Volga River annual runoff for the dependent (1983–2008) and independent (2009–2013) samples for all decision trees [Malinin, Gordeeva, 2019]

Номер дерева Tree number	Число терминальных (нетерминальных) вершин Number of terminal (nonterminal) vertices	Коэффициент детерминации по зависимой выборке Determination coefficient for the dependent sample	Стандартная ошибка годового стока Волги по зависимой выборке, м ³ /с The standard error of the Volga River annual runoff for the dependent sample, m ³ /s	Стандартная ошибка годового стока Волги по независимой выборке, м ³ /с The standard error of the Volga River annual runoff for the independent sample, m ³ /s
1	7 (6)	0,89	378,3	982,4
2	6 (5)	0,90	367,9	876,6
3	5 (4)	0,88	412,2	876,6
4	4 (3)	0,79	536,0	845,6
5	3 (2)	0,65	695,9	554,6
6	2 (1)	0,39	923,9	740,1

за период 1981–2013 гг. В результате общее число предикторов, в соответствии с (6), составило $m = 120$. При этом зависимая выборка включала в себя 26, а независимая – 5 лет (2009–2013 гг.). Для оптимальной модели множественной линейной регрессии (МЛР), содержащей пять переменных, стандартная ошибка оценки стока по зависимой выборке составила 589 м³/с, а по независимым данным за 2009–2013 гг. она равна 605 м³/с.

Помимо модели МЛР использовался также метод деревьев решений (decision trees), описание которого дано в работах [Breiman et al., 1984; Bramer, 2007]. Отметим, что данный метод пока не получил распространения в гидрометеорологии [Гордеева, Малинин, 2016]. Моделирование годового стока р. Волги (г. Волгоград) выполнялось в пакете Statistica алгоритмом CART с априорными вероятностями, пропорциональными численности классов, и ценой одинаковой для всех классов ошибки классификации [Interactive...].

В результате расчетов получено, что полное дерево имеет шесть ветвлений [Malinin, Gordeeva, 2019]. Для полного дерева коэффициент детерминации между исходными и вычисленными значениями стока для зависимой выборки составляет $R^2 = 0,89$, стандартная ошибка стока равна 378 м³/с при стандартном отклонении речного стока 1207 м³/с. Отсюда видно, что алгоритм CART отсекает около 10 % дисперсии стока Волги, т. е. мелкомасштабную изменчивость. Однако для независимой выборки наилучшим является не полное дерево, а дерево 5 (табл.), которое содержит всего две вершины ветвления. Для него стандартная ошибка годового стока Волги составляет всего 554,6 м³/с, или 0,46 от величины стандартного отклонения стока.

Дерево 5 приводится на рис. 3. Нетрудно видеть, что оно имеет очень простой вид. На пер-

вом ветвлении разделителем выступают зимние осадки за предшествующий год в п. Кумены. Если осадков выпадало < 254,6 мм, то в 15 случаях из 26 отмечался низкий сток Волги со средней величиной 7760,7 м³/с. Если их выпадало > 254,6 мм, то, наоборот, сток был высоким (среднее – 9257,3 м³/с). Очевидно, п. Кумены можно рассматривать как важнейший индикатор оценки межгодовых колебаний стока Волги, так как он также является первым предиктором в регрессионной модели годового стока и самым чувствительным индикатором влияния переноса влаги с Северной Атлантики на осадки.

На втором ветвлении уточняется формирование 15 значений низкого стока Волги за счет летних осадков в п. Рыбинск за предыдущий год. Если осадков выпадало мало (< 455,2 мм), то отмечалось 10 значений аномально низкого стока Волги (среднее – 7195 м³/с), если осадков выпадало > 455,2 мм, то величина стока была близка к норме (среднее – 8892 м³/с). Уже двух указанных переменных оказалось достаточно, чтобы с высокой точностью по заданной выборке осуществлять долгосрочный прогноз годового стока Волги у г. Волгограда.

Сравнение результатов сопоставления фактических и вычисленных значений стока р. Волги по модели МЛР для пяти переменных и по дереву решений для двух ветвлений свидетельствует, что модель по деревьям оказывается заметно эффективнее. Дополнительным преимуществом данного метода является визуализация получаемых результатов и более понятная их интерпретация.

Итак, *осадки в стокоформирующей зоне бассейна Волги контролируют изменчивость годового стока Волги и внутригодовых приращений уровня Каспия*. В этом суть наземной ветви гидрологической системы «Каспийское море».

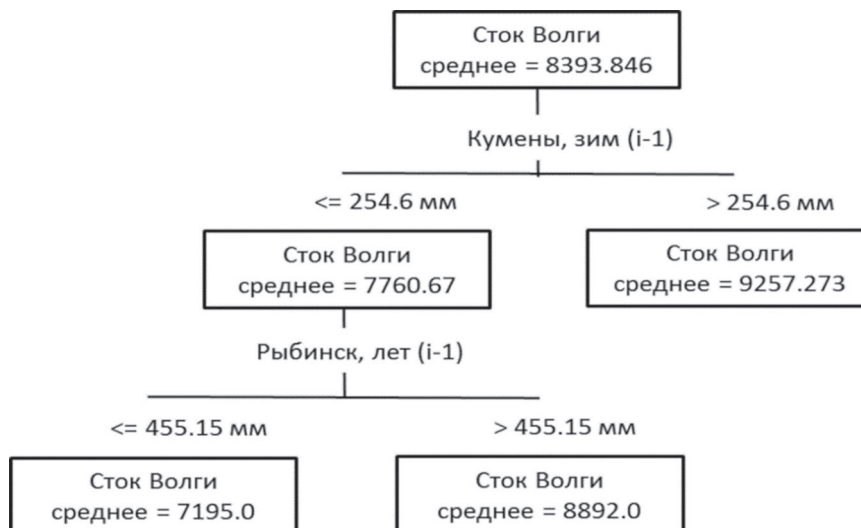


Рис. 3. Дерево решений номер 5, описывающее формирование годового стока (м³/с) Волги (г. Волгоград) в i -год в зависимости от зимних и летних осадков (мм/год) в $i - 1$ и $i - 2$ годы на метеорологических станциях, расположенных на территории бассейна, за период 1983–2008 гг.

Fig. 3. Decision tree number 5 describing the formation of the Volga annual runoff (in Volgograd) for i -year depending on winter and summer precipitation (mm/year) in $i - 1$ and $i - 2$ years at meteorological stations on the basin for the period of 1983–2008. The Volga runoff in m³/s

Атмосферная ветвь гидрологической системы

Атмосферная ветвь данной системы – это горизонтальный перенос атмосферного водяного пара и его влияние на формирование осадков на территории бассейна. Запишем уравнение водного баланса атмосферы над бассейном Волги в виде

$$\partial W_B / \partial t + \text{div} \bar{F} = E_B - P_B, \quad (7)$$

где W_B – интегральное влагосодержание атмосферы, осредненное над бассейном Волги, \bar{F} – вертикально интегрированный полный горизонтальный поток водяного пара, определяемый по аэрологическим данным обычно до верхней границы тропосферы, E_B , P_B – соответственно испарение и осадки, осредненные по территории бассейна. Как уже отмечалось, величиной $\partial W_B / \partial t$ обычно пренебрегают ввиду малости для годовых интервалов времени.

Результаты расчетов отдельных компонентов уравнения (7) показали [Смирнов, Малинин, 1988], что количество осадков, выпадающих в стокоформирующей зоне бассейна Волги, пропорционально интенсивности адвективного горизонтального переноса водяного пара, обусловленного процессами общей циркуляции атмосферы. Известно, что единственным источником выпадения осадков в бассейне Волги в холодный период года и основным в теплый период является атмосферный перенос водяного пара, обусловленный испарением

с акватории Северной Атлантики. И хотя атмосферная влага с Северной Атлантики может попадать с трех направлений (западное, южное, северное), преобладающий перенос является зональным. Поэтому был выбран меридиональный разрез по 5° в. д. от 40 до 70° с. ш., через который осуществляется основной внос атмосферной влаги на территорию Европы, в том числе на европейскую территорию России.

Для оценки вертикально интегрированных горизонтальных потоков водяного пара использовался архив NCEP – DOE Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP-II) reanalysis (Reanalysis-2) [Kanamitsu et al., 2002]. Данный архив является продолжением 50-летнего проекта (с 1948 г. по настоящее время) NCEP-NCAR Reanalysis и охватывает спутниковый период с 1979 г. по настоящее время. Срочные 6-часовые аэрологические данные температуры воздуха, относительной влажности, скорости и направления ветра, геопотенциальной высоты представлены на стандартных изобарических поверхностях (1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300 гПа) в узлах $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ географической сетки. Данные архива Reanalysis-2 находятся в свободном доступе по адресу: http://apdr.c.soest.hawaii.edu/dods/public_data/Reanalysis_Data/NCEP.

Как известно, вертикально интегрированный полный зональный поток водяного пара может быть определен следующим образом:

$$F_x = \bar{F}_x + F'_x = g^{-1} \int_{P_k}^{P_0} \bar{q} \bar{u} dp + g^{-1} \int_{P_k}^{P_0} q' u' dp, \quad (8)$$

где g – ускорение свободного падения, q – удельная влажность, u – зональная компонента скорости ветра (чертой обозначено усреднение во времени, а штрих показывает пульсации характеристик), P_0 и P_k – атмосферное давление у земной поверхности и на такой высоте, где влажность становится пренебрежимо малой. В формуле (8) \bar{F}_x и F'_x представляют собой соответственно адвективный и вихревой зональные потоки водяного пара. Считается, что при временном осреднении 1 месяц адвективная компонента характеризует поток атмосферной влаги за счет средней во времени (общей) циркуляции, а вихревая – перенос влаги за счет макротурбулентности, обусловленный главным образом циклонами и антициклонами.

Если для оценки полного потока влаги F_x необходимы срочные (не менее двух раз в сутки) данные радиовеетрового зондирования, то адвективный перенос \bar{F}_x может быть рассчитан по среднемесячным данным о ветре и влажности. В связи с этим расчет полного потока, особенно за длительный период времени, представляет весьма сложную задачу и не всегда оказывается возможным по техническим причинам или из-за отсутствия необходимых данных [Малинин, 1994б].

Среднемесячные потоки влаги (полные, адвективные, макротурбулентные) были рассчитаны по срочным (2 раза в сутки) данным для меридионального разреза по 5° в. д. через $2,5^\circ$ широты от 40 до 70° с. ш. за период 1980–2014 гг. [Malinin, Gordeeva, 2019]. Именно через этот разрез идет основной внос атмосферной влаги на территорию Европы, который можно рассматривать как *отражение результирующего влияния Северной Атлантики на процессы влагооборота атмосферы над Европой*. Макротурбулентный поток F'_x определялся как разность полного и адвективного потоков водяного пара. После этого вычислялись средние значения потоков влаги за холодное (октябрь–март) и теплое (апрель–сентябрь) полугодия, а также за год в целом. Вклад вихревого потока влаги в полный перенос в среднем за год максимален в зоне 45 – 55° с. ш. (до 11 %), причем для зимних условий его вклад увеличивается до 17 %.

Естественно, важным является вопрос оценки точности расчета потоков влаги. С этой целью для трех аэрологических станций: Ставангер (Норвегия, $58,87^\circ$ с. ш. $5,67^\circ$ в. д.), Леруик (Шетландские острова, $60,13^\circ$ с. ш. $1,185^\circ$ з. д.) и Валентия (юго-запад Англии, $51,93^\circ$ с. ш. $10,25^\circ$ з. д.) в работе [Малинин и др., 2015] были рассчитаны среднемесячные полные зональные потоки влаги за период 1980–2014 гг. и выполнено их сравнение с переносом влаги

для ближайших узлов сеточной области к этим станциям: 58° с. ш. 6° в. д.; 60° с. ш. $2,5^\circ$ з. д.; $52,5^\circ$ с. ш. 10° з. д. Оно показало очень высокое сходство, причем систематические и случайные расхождения оказались незначительными. Коэффициент детерминации, характеризующий объясненную дисперсию рассчитываемой переменной, меняется в пределах от $R^2 = 0,81$ (ст. Ставангер) до $R^2 = 0,94$ (ст. Валентия). Некоторые расхождения по ст. Ставангер вызваны влиянием на перенос влаги орографических эффектов подстилающей поверхности в районе этой станции. Отсюда следует, что для оценки потоков атмосферной влаги над океаном с высокой степенью надежности можно использовать архив Reanalysis-2.

Межгодовая изменчивость зонального переноса влаги через данный разрез рассмотрена в работе [Malinin, Gordeeva, 2019]. Максимальный поток водяного пара отмечается на широте $52,5^\circ$ с. ш. По направлению к югу он начинает уменьшаться под влиянием ослабления скорости ветра, а к северу – в связи с уменьшением влагосодержания атмосферы. Максимальная межгодовая изменчивость отмечается в северных широтах и уменьшается к южным широтам примерно в 2 раза. Были выявлены отрицательные значения линейных трендов в потоках влаги, которые проявляются в течение всего года. Однако все они оказались незначимыми, что говорит о слабой тенденции к уменьшению переноса влаги на континент. Эти результаты не подтверждают рост эффективного испарения по данным большинства архивов реанализа на акватории Северной Атлантики, но полностью соответствуют результатам Reanalysis-2 [Malinin, Gordeeva, 2019].

Для оценки влияния зонального переноса влаги с акватории Северной Атлантики на межгодовую изменчивость осадков в бассейне Волги было выбрано 30 относительно равномерно расположенных станций, для которых был сформирован архив зимних (октябрь–март) и летних (апрель–сентябрь) осадков за период 1981–2013 гг. Для каждой из этих станций для холодного и теплого периода рассчитывались регрессионные модели с полным зональным потоком водяного пара в 13 точках на меридиональном разрезе 5° в. д. Всего было рассчитано 60 моделей МЛР. Это позволило построить карты пространственного распределения коэффициентов детерминации (рис. 4), которые показывают суммарный вклад потоков влаги в формирование межгодовой изменчивости осадков [Malinin, Gordeeva, 2019].

Из рис. 4 видно, что для преобладающей части стокоформирующей зоны бассейна этот

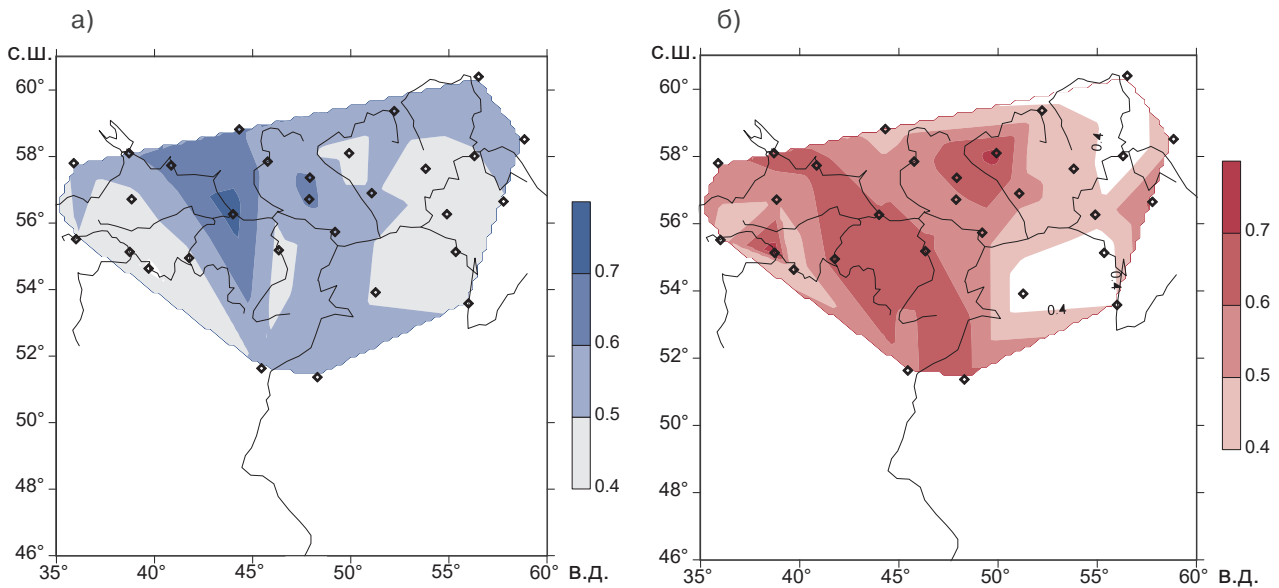


Рис. 4. Пространственное распределение коэффициентов детерминации, показывающих суммарный вклад полных зональных потоков влаги в 13 точках на меридиональном разрезе 5° в. д. в формирование межгодовой изменчивости (а) зимних (октябрь–март) и (б) летних (апрель–сентябрь) осадков в стокоформирующей зоне бассейна Волги

Fig. 4. Spatial distribution of determination coefficients as sum contribution of the total zonal moisture flux at 13 points of the 5E meridional section to the formation of interannual variability of winter (October–March) (a) and summer (April–September) (b) precipitation in the Volga basin

вклад превышает 50 % как в холодный, так и в теплый период года. Максимальные значения R^2 зимой достигают 0,65–0,70 и отмечаются в левобережной части Волги до Чебоксар, а летом – на водосборе р. Вятка. Абсолютный максимум R^2 наблюдается зимой на ст. Нижний Новгород ($R^2 = 0,73$), а летом на станции Кумыны ($58^{\circ}06'$ с. ш. $49^{\circ}54'$ в. д.), расположенной на водосборе р. Вятка ($R^2 = 0,73$). Среднее значение для всех станций вклада потоков влаги в дисперсию осадков одинаково зимой и летом и составляет $R^2 = 0,53$. Это означает, что перенос влаги на меридиане 5° в. д. испытывает по мере движения на восток не очень заметную трансформацию, вследствие чего его влияние на изменчивость осадков в бассейне Волги остается внушительным.

Итак, зональный перенос водяного пара с акватории Северной Атлантики в значительной степени определяет межгодовую изменчивость осадков в бассейне Волги как в зимний, так и в летний периоды года.

Океаническая ветвь гидрологической системы

Атмосферный перенос влаги формируется под воздействием крупномасштабных процессов взаимодействия океана с атмосферой в Северной Атлантике. В 1994 году высказано

следующее предположение [Малинин, 1994а]: «...если вследствие крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в Северной Атлантике эффективное испарение оказывается выше нормы, то большее количество влаги будет переноситься на континент и, соответственно, большее количество осадков выпадает в бассейне Волги. Следовательно, происходит увеличение годового стока и наблюдается положительное приращение уровня моря. Обратная картина отмечается при ослаблении эффективного испарения в Северной Атлантике. Таким образом, именно изменчивость эффективного испарения является, очевидно, наиболее важным «уровнеобразующим» фактором...». В дальнейшем в монографии [Малинин и др., 2003] выполнена детализация процессов взаимодействия океана с атмосферой в Северной Атлантике, формирующих межгодовую изменчивость зонального переноса водяного пара. Выявлено, что при усилении процессов циклонической активности в Северной Атлантике, и прежде всего в области Исландской депрессии, увеличивается испарение и влагосодержание атмосферы и происходит понижение температуры поверхности воды. Одновременно с этим повышается зональная составляющая эффективной скорости горизонтального переноса атмосферной влаги, характеризующая количество переносимого водяного пара

в системе средней циркуляции атмосферы и крупномасштабных синоптических вихрей. Наконец, при росте циклонической активности происходят углубление Исландского минимума давления и его пространственные миграции. В свою очередь, его углубление усиливает интенсивность североатлантического колебания, которое в значительной степени регулирует адвективный (за счет средней циркуляции) зональный перенос атмосферы в умеренных широтах. Все это вместе взятое должно приводить к значительному повышению зонального переноса водяного пара в системе общей циркуляции и синоптических вихрей на европейский континент и европейскую территорию России. Естественно, при ослаблении циклонической и возрастании антициклонической активности картина будет меняться на противоположную. Это позволяет всю цепочку причинно-следственных связей формирования межгодовых колебаний УКМ представить в виде следующей концептуальной модели (рис. 5), из которой видно, что в конечном счете генезис межгодовых колебаний УКМ обусловлен особенностями крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в Северной Атлантике.

Итак, приходим к выводу, что *уровень Каспия можно рассматривать как интегральный показатель крупномасштабного влагообмена в системе «океан – атмосфера – суша».*

С учетом новых данных о зональном переносе влаги на меридиане 5° в. д. возможна опре-

деленная детализация влияния процессов в системе «океан – атмосфера» на изменчивость атмосферного потока водяного пара. С этой целью вначале рассмотрим закономерности межгодовых колебаний переноса влаги на меридиональном разрезе 5° в. д., для выявления которых использован метод главных компонент. Разложению подвергались три матрицы полного потока водяного пара (для обоих полугодий и за год в целом) размером 13×35. Вследствие высокой коррелированности потоков влаги получена высокая и почти одинаковая сходимость для всех трех разложений. Так, для холодного полугодия первые две главные компоненты, а для года в целом три главные компоненты, описывают 90 % дисперсии исходного поля [Malinin, Gordeeva, 2019].

Анализ собственных векторов разложения (нагрузок главных компонент), представляющих собой коэффициенты корреляции между исходными данными и соответствующей главной компонентой, свидетельствует об их четкой структурированности, которая заключается в том, что легко выделяются квазиоднородные зоны по характеру межгодовых колебаний переноса водяного пара. Например, в холодное полугодие в первом собственном векторе отмечается резко выраженная оппозиция между южной (40–42,5° с. ш.) и северной (57,5–70° с. ш.) зонами: усиление переноса в одной из них ведет к ослаблению в другой и наоборот (рис. 6). Второй собственный



Рис. 5. Генетическая модель формирования межгодовых колебаний уровня Каспийского моря

Fig. 5. Genetic model of interannual fluctuations formation of the Caspian Sea level

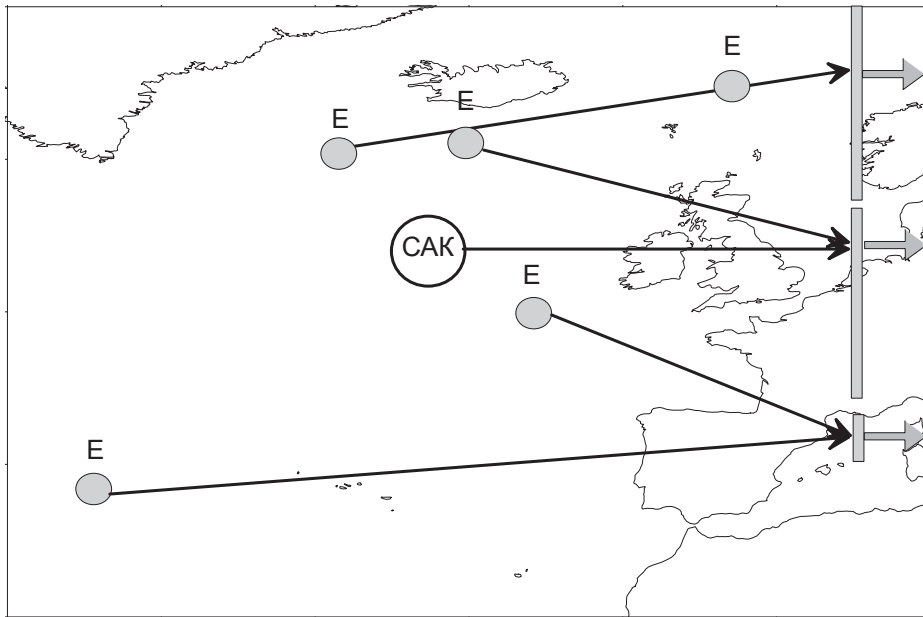


Рис. 6. Районирование вертикально интегрированных горизонтальных зональных потоков водяного пара на меридиональном разрезе 5° в. д. от 40 до 70° с. ш. для холодного полугодия (октябрь–март) 1980–2014 гг. Кружками показаны районы в океане, в которых испарение имеет наиболее высокую положительную корреляцию с переносом влаги на разрезе

Fig. 6. Zoning of vertically integrated horizontal zonal water vapor flows at the 5E meridional section from 40N to 70N for the cold half-year (October–March) in 1980–2014. The circles indicate ocean areas where evaporation has the highest positive correlation with moisture transport across the section

вектор отражает буферную центральную зону (45–55° с. ш.). Отсюда следует, что северная зона представляет собой Норвежское море, южная – Средиземное море, а центральная – территорию Европы.

Два основных фактора, формирующих перенос влаги в Европу, – это *испарение с акватории океана и циркуляция атмосферы*. Интегральным индексом циркуляции может служить североатлантическое колебание (САК), интенсивность которого определяет геострофический зональный перенос воздушных масс с акватории Северной Атлантики в Европу. На рис. 7 представлено распределение коэффициентов корреляции между индексом САК (<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-station-based>) и полным зональным потоком водяного пара для холодного (октябрь–март) и теплого (апрель–сентябрь) полугодий за 1980–2014 гг. на меридиональном разрезе 5° в. д. [Малинин и др., 2015]. Нетрудно видеть, что в холодный период значимая на уровне $\alpha = 0,05$ корреляция отмечается между 45–65° с. ш., причем максимальная корреляция ($r = 0,60$) имеет место в зоне 52,5–55° с. ш., где зональный перенос водяного пара в Европу

максимален. Отметим, что влияние САК на адвективный перенос (\bar{F}_x) несколько выше почти на всех широтах, а максимальная корреляция на широте 55° с. ш. составляет $r = 0,65$. Как и следовало ожидать, в теплый период года, когда САК выражен значительно слабее, его влияние на перенос влаги резко снижается. Значимая положительная корреляция отмечается лишь на широте 60° с. ш.

Значительное влияние САК на межгодовую изменчивость переноса влаги на разрезе 5° в. д. обусловлено характером зонального переноса водяного пара непосредственно над акваторией Северной Атлантики. В работе [Малинин и др., 2003] четко показано, что распределение поля зонального переноса влаги для холодного (октябрь–март) полугодия над Северной Атлантикой за период 1962–1988 гг. характеризуется ярко выраженным диполем, проявляющимся в противофазности колебаний потоков влаги между районами, находящимися под воздействием Исландского минимума (севернее 55° с. ш.) и Азорского максимума (южнее 40° с. ш.). Это соответствует оппозиции в межгодовых колебаниях переноса влаги в южной (40–42,5° с. ш.) и северной (57,5–70° с. ш.) частях меридионального разреза 5° в. д.

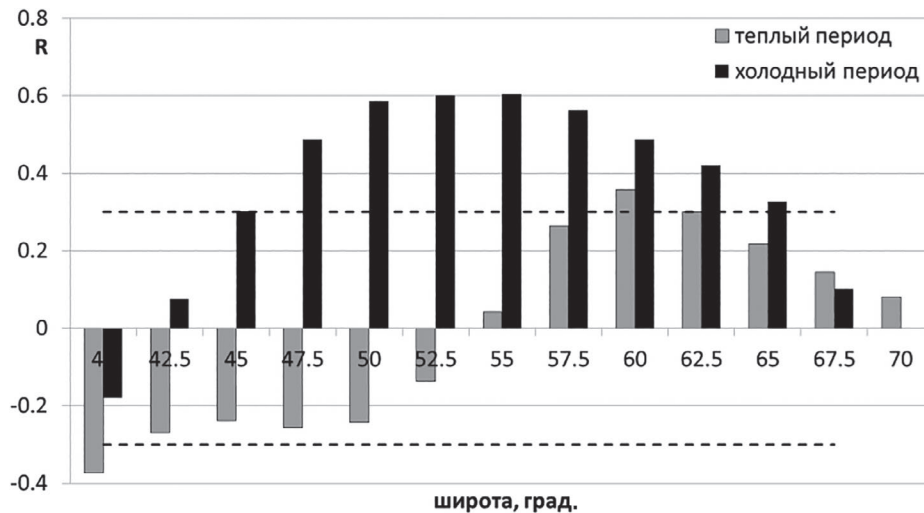


Рис. 7. Коэффициенты корреляции между индексом САК и полным зональным потоком водяного пара для холодного (октябрь–март) и теплого (апрель–сентябрь) полугодий за 1980–2014 гг. на меридиональном разрезе 5° в. д. Штриховые линии – доверительные интервалы при уровне значимости $\alpha = 0,05$ [Малинин и др., 2015]

Fig. 7. Correlation coefficients between the NAO index and the total zonal water vapor flow for the cold (October–March) and warm (April–September) half-year in 1980–2014 at the 5E meridional section. The dashed lines are confidence intervals at $\alpha = 0.05$ significance level [Malinin et al., 2015]

Достаточно подробно межгодовая изменчивость испарения в Северной Атлантике по данным разных архивов рассматривается в статье [Malinin, Gordeeva, 2017]. Процедура оценки влияния испарения с акватории Северной Атлантики на перенос влаги на меридиональном разрезе 5° в. д. описана в работе [Malinin, Gordeeva, 2019]. С этой целью из архива Reanalysis-2 [Kanamitsu et al., 2002] были отобраны 5-градусные «квадраты» акватории Северной Атлантики между 30 и 70° с. ш. Суть процедуры состояла в том, что вначале были построены карты пространственного распределения коэффициентов корреляции между первыми тремя главными компонентами зонального переноса влаги для средних годовых условий и испарением, которые позволили выявить очаги значимой корреляции на акватории Северной Атлантики. Далее для каждой главной компоненты строились оптимальные модели множественной линейной регрессии с реперными квадратами. Выявлено 16 реперных квадратов испарения, по которым выполнено восстановление фактического поля годовых значений переноса влаги на разрезе 5° в. д. в 13 точках. Результаты такого восстановления приводятся на рис. 8. Нетрудно видеть, что, исключая крайний юг (южнее 45° с. ш.) и крайний север (севернее 67,5° с. ш.), горизонтальный перенос описывается с высокой точностью. Коэффициент детерминации, показывающий долю объяс-

ненной дисперсии годовых значений переноса влаги, составляет $R^2 = 0,65–0,79$. Отметим, что для холодного полугодия даже по 5 реперным квадратам испарения в Северной Атлантике (рис. 6) примерно с такой же точностью можно рассчитать значения F_x для Норвежского моря.

Естественно, возникает вопрос оценки точности выявленной цепочки причинно-следственных связей от уровня Каспийского моря до Северной Атлантики. С этой целью выполнен расчет дерева решений для внутригодовых приращений уровня моря в Баку за 1982–2009 гг. ($n = 28$) по матрице, состоящей из зонального потока водяного пара на меридиане 5° в. д. за холодное полугодие (октябрь–март) и теплое полугодие (апрель–сентябрь) прошлого года. Следовательно, в исходную матрицу входит 26 точек потоков влаги с апреля 1981 г.

На рис. 9 приводится дерево, состоящее из трех ветвлений. На первом ветвлении разделителем выступает зимний перенос влаги на широте 57,5° с. ш., максимальное значение которого (125 кг/м·с) отделяет экстремальное положительное приращение уровня (41 см, 1990 год) от остальной совокупности. На втором ветвлении разделителем служит поток влаги на широте 47,5° с. ш., который отделяет еще две значительные положительные аномалии приращений уровня со средним значе-

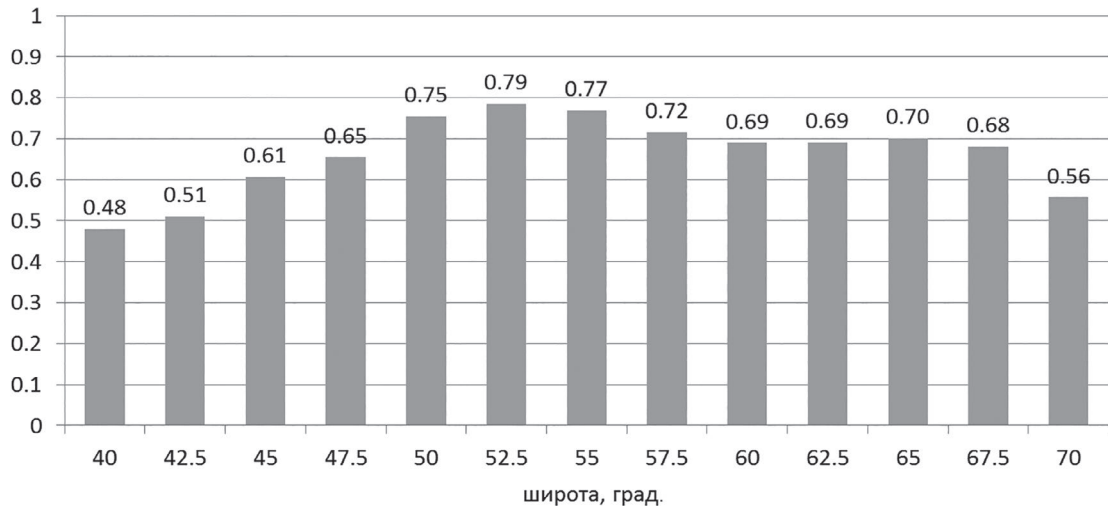


Рис. 8. Распределение коэффициента детерминации восстановления годовых значений полного зонального потока влаги на разрезе 5° в. д. по первым трем главным компонентам [Малинин, Гордеева, 2019]

Fig. 8. Distribution of the determination coefficients of reconstruction of annual total zonal moisture flow values in the 5E section according to the first three principal components [Malinin, Gordeeva, 2019]

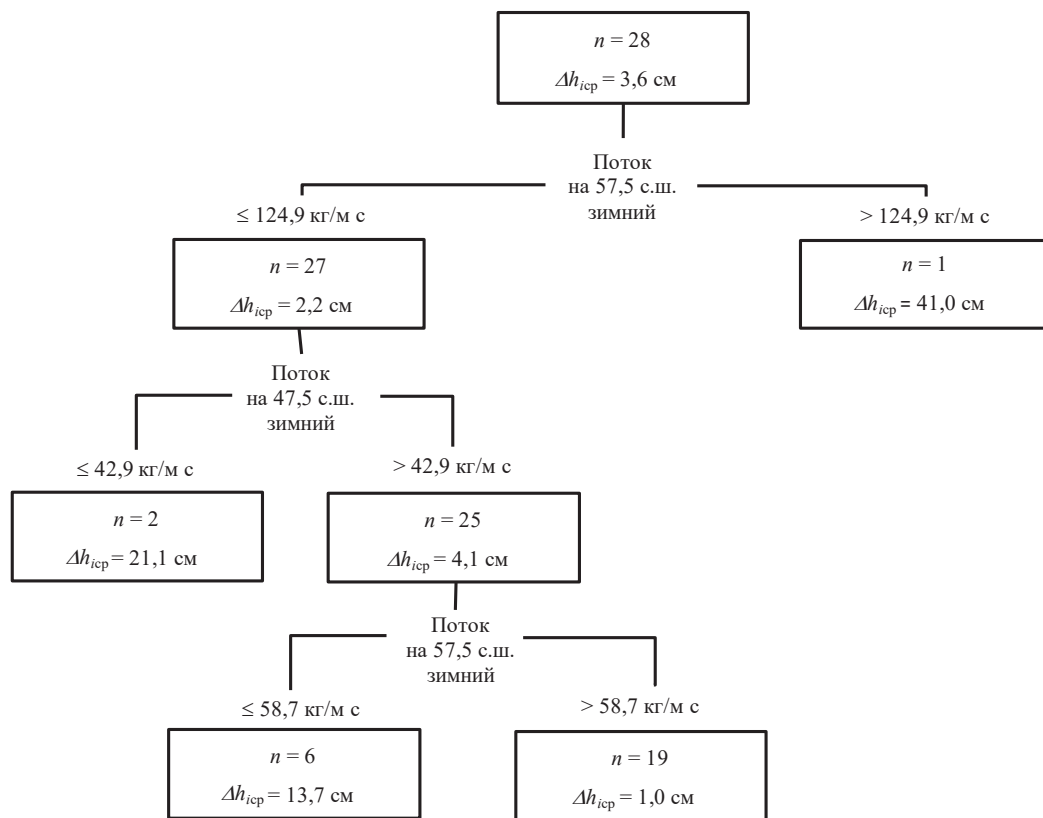


Рис. 9. Дерево решений, описывающее годовое приращение уровня Каспийского моря в i -год в зависимости от полного зонального потока водяного пара на меридиональном разрезе 5° в. д. для зимнего (октябрь–март) и летнего (апрель–сентябрь) периодов года за 1981–2009 гг.

Величина $\Delta h_{иср}$ – среднее значение для n лет.

Fig. 9. Decision tree describing the Caspian Sea level annual increment for i -year depending on total zonal moisture flow values for the cold (October–March) and warm (April–September) half-year in 1981–2009 at the 5E meridional section

The value $\Delta h_{иср}$ means the average value for n years.

нием 21 см. На третьем ветвлении разделителем опять является поток влаги на широте 57,5° с. ш. Этого оказывается достаточно для хорошего соответствия рассчитанных значений приращений уровня моря его фактическим значениям. Коэффициент детерминации построенного дерева составляет $R^2 = 0,66$, стандартная ошибка оценки приращений уровня модели – 7,8 см, или 57 % от их среднеквадратического отклонения, равного 13,7 см.

Итак, можно сделать однозначный вывод, что *уровень Каспийского моря является интегральным индикатором крупномасштабного влагообмена в системе «Северная Атлантика – атмосфера – бассейн Волги».*

Заключение

К сожалению, проблема генезиса межгодовых колебаний УКМ и тем более его сверхдолгосрочного прогноза до настоящего времени относится к числу центральных нерешенных проблем современной гидрометеорологии. Действительно, вряд ли кто-то сможет дать научно обоснованное предсказание о том, когда начнется новый длительный рост (снижение) УКМ. А в том, что это когда-то произойдет, нет сомнений.

Совершенно правильно в обзорной монографии [Водный..., 2016], содержащей сведения практически обо всех результатах в области изучения водного баланса, колебаний уровня моря и методах их прогноза, отмечается отсутствие ясного понимания механизмов, управляющих изменчивостью уровня. Однако еще в 1990-е годы такие механизмы были рассмотрены одним из авторов [Малинин, 1994а, б] в рамках генетической модели формирования межгодовых колебаний УКМ и сделан вывод о том, что уровень Каспия следует воспринимать как интегральный показатель крупномасштабного влагообмена в системе «океан – атмосфера – суша». При этом достаточно уверенно можно утверждать, что генезис межгодовых колебаний УКМ обусловлен особенностями крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в Северной Атлантике. В данной работе приводится детализация генетической концепции, связанная с уточнением влияния Северной Атлантики на зональный перенос атмосферной влаги в Европу, а переноса влаги – на формирование межгодовых колебаний осадков в бассейне Волги, которые, в свою очередь, определяют изменчивость годового стока Волги и, следовательно, уровня Каспия.

Литература

- Абузьяров З. К. Усовершенствованный метод прогноза годового хода уровня Каспийского моря // Труды Гидрометцентра России. 2009. Вып. 343. С. 48–66.
- Варущенко С. И., Варущенко А. Н., Клиге Р. К. Изменения режима Каспийского моря и бессточных водоемов в палеовремени. М.: Наука, 1987. 240 с.
- Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз. М.: Триада Лтд, 2016. 378 с.
- Гордеева С. М., Малинин В. Н. Использование Data Mining в задаче гидрометеорологического прогнозирования // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 44. С. 30–44.
- Малинин В. Н. Проблема прогноза уровня Каспийского моря. СПб.: Изд. РГГМИ, 1994а. 160 с.
- Малинин В. Н. О генезисе межгодовых колебаний уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. 1994б. № 4–5. С. 492–499.
- Малинин В. Н. Долгосрочное прогнозирование уровня Каспийского моря // Изв. РАН. Сер. геогр. 2009. № 6. С. 7–16.
- Малинин В. Н., Гордеева С. М., Горбушина Я. А. К оценке влияния Северной Атлантики на перенос атмосферной влаги в Европу // Общество. Среда. Развитие. 2015. № 3. С. 179–185.
- Малинин В. Н., Гордеева С. М., Гурьянов Д. В. Малопараметрическая модель увлажнения Северо-Западного региона России для условий современных изменений климата // Ученые записки РГГМУ. 2014. № 36. С. 35–49.
- Малинин В. Н., Радикевич В. М., Гордеева С. М., Куликова Л. А. Изменчивость вихревой активности атмосферы над Северной Атлантикой. СПб.: Гидрометеиздат, 2003. 171 с.
- Мещерская А. В., Александрова Н. А. Прогноз уровня Каспийского моря по метеорологическим данным // Метеорология и гидрология. 1993. № 3. С. 72–82.
- Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России // Российский гидрометеорологический портал: ВНИИГМИ-МЦД [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/data/158total-precipitation#описание-массива-данных> (дата обращения: 25.10.2019).
- Смирнов Н. П., Малинин В. Н. Водный баланс атмосферы как гидрологическая задача. Л.: ЛГУ, 1988. 189 с.
- Bramer M. Principles of Data Mining. London: Springer-Verlag, 2007. 344 p. doi: 10.1007/978-1-84628-766-4
- Breiman L., Friedman J., Olshen R., Stone C. Classification and regression trees. New York: Chapman and Hall, 1984. 358 p.
- Interactive Trees (C&RT, CHAID): Statistica help/StatSoft inc. URL: http://documentation.statsoft.com/STATISTICAHelp.aspx?path=Gxx/Indices/InteractiveTrees-CRTCHAID_HIndex (дата обращения: 25.10.2019).
- Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S.-K., Hnilo J. J., Fiorino M., Potter G. L. NCEP – DOE AMIP-II reanalysis (R-2) // Bull. of the Atmos. Met. Soc. 2002. Vol. 83. P. 1631–1643. doi: 10.1175/BAMS-83-11-1631
- Malinin V. N., Gordeeva S. M. Variability of evaporation and precipitation over the ocean from satellite

data // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2017. Vol. 53, no. 9. P. 934–944. doi: 10.1134/S0001433817090195

Malinin V. N., Gordeeva S. M. Effect of moisture exchange in the Northern Atlantic on European Russia moistening and annual Volga runoff // *Water Re-*

sources. 2019. Vol. 46, no. 3. P. 466–479. doi: 10.1134/S009780781903014X

Поступила в редакцию 04.11.2019

References

Abuzyarov Z. K. Usovershenstvovannyi metod prognoza godovogo khoda urovnya Kaspiiskogo morya [An improved method for predicting the annual level of the Caspian Sea]. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Hydrometeorological Research and Forecasting]. 2009. No. 343. P. 48–66.

Gordeeva S. M., Malinin V. N. Ispol'zovanie Data Mining v zadache gidrometeorologicheskogo prognozirovaniya [Use of Data Mining in hydrometeorological forecasting]. *Uchenye zapiski RGGMU* [Proceed. RSHU]. 2016. No. 44. P. 30–44.

Malinin V. N. Problema prognoza urovnya Kaspiiskogo morya [The problem of predicting the Caspian Sea level]. St. Petersburg: RSHI Publ., 1994a. 160 p.

Malinin V. N. O genezise mezhgodovykh kolebaniy urovnya Kaspiiskogo morya [On the genesis of inter-annual fluctuations in the level of the Caspian Sea]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 1994b. No. 4–5. P. 492–499.

Malinin V. N. Dolgosrochnoe prognozirovanie urovnya Kaspiiskogo morya [Long-term forecasting of the Caspian Sea level]. *Izv. RAN. Ser. geogr.* [Izv. RAS. Geographical ser.]. 2009. No. 6. P. 7–16.

Malinin V. N., Gordeeva S. M., Gorbushina Ya. A. K otsenke vliyaniya Severnoi Atlantiki na perenos atmosfery v Evropu [To the estimation of the North Atlantic influence on the water vapour transfer to the European continent]. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie* [Society. Environment. Development: Terra Humana]. 2015. No. 3. P. 179–185.

Malinin V. N., Gordeeva S. M., Gur'yanov D. V. Maloparametricheskaya model' uvlazhneniya Severo-Zapadnogo regiona Rossii dlya uslovii sovremennykh izmenenii klimata [Simple parametric humidification model of northwestern Russia for the conditions of modern climate change]. *Uchenye zapiski RGGMU* [Proceed. RSHU]. 2014. No. 36. P. 35–49.

Malinin V. N., Radikevich V. M., Gordeeva S. M., Kulikova L. A. Izmenchivost' vikhrevoi aktivnosti atmosfery nad Severnoi Atlantikoi [The variability of atmosphere vortex activity over the North Atlantic]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2003. 171 p.

Meshcherskaya A. V., Aleksandrova N. A. Prognoz urovnya Kaspiiskogo morya po meteorologicheskim dannym [Caspian Sea level forecast based on meteorolo-

gical data]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Russ. Meteorology and Hydrology]. 1993. No. 3. P. 72–82.

Opisanie massiva dannykh mesyachnykh summ osadkov na stantsiyakh Rossii [Description of data set of monthly precipitation totals from Russian stations]. *Rossiiskii gidrometeorologicheskii portal: VNIIGMI-MTsD* [RIHMI-WDC]. URL: <http://meteo.ru/english/climate/descrip7.htm> (accessed: 25.10.2019).

Smirnov N. P., Malinin V. N. Vodnyi balans atmosfery kak gidrologicheskaya zadacha [Atmospheric water balance as a hydrological task]. Leningrad: LSU Publ., 1988. 189 p.

Varushchenko S. I., Varushchenko A. N., Klige R. K. Izmeneniya rezhima Kaspiiskogo morya i besstochnykh vodoemov v paleovremeni [Changes in the regime of the Caspian Sea and inland reservoirs in paleotime]. Moscow: Nauka, 1987. 240 p.

Vodnyi balans i kolebaniya urovnya Kaspiiskogo morya. Modelirovanie i prognoz [Water balance and level fluctuations of the Caspian Sea. Modeling and predicting]. Moscow: Triada Ltd, 2016. 378 p.

Bramer M. Principles of Data Mining. London: Springer-Verlag, 2007. 344 p. doi: 10.1007/978-1-84628-766-4

Breiman L., Friedman J., Olshen R., Stone C. Classification and regression trees. New York: Chapman and Hall, 1984. 358 p.

Interactive Trees (C&RT, CHAID): Statistica help. StatSoft inc. URL: http://documentation.statsoft.com/STATISTICAHelp.aspx?path=Gxx/Indices/Interactive-TreesCRTCHAID_HIndex (accessed: 25.10.2019).

Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S.-K., Hnilo J. J., Fiorino M., Potter G. L. NCEP – DOE AMIP-II reanalysis (R-2). *Bull. of the Atmos. Met. Soc.* 2002. Vol. 83. P. 1631–1643. doi: 10.1175/BAMS-83-11-1631

Malinin V. N., Gordeeva S. M. Variability of evaporation and precipitation over the ocean from satellite data. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2017. Vol. 53, no. 9. P. 934–944. doi: 10.1134/S0001433817090195

Malinin V. N., Gordeeva S. M. Effect of moisture exchange in the Northern Atlantic on European Russia moistening and annual Volga runoff. *Water Resources.* 2019. Vol. 46, no. 3. P. 466–479. doi: 10.1134/S009780781903014X

Received November 04, 2019

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Малинин Валерий Николаевич

профессор каф. прикладной океанографии ЮНЕСКО-МОК
и комплексного управления прибрежными зонами, д. г. н.
Российский государственный гидрометеорологический
университет
Воронежская ул., 79, Санкт-Петербург, Россия, 192007
эл. почта: malinin@rshu.ru

Гордеева Светлана Михайловна

доцент кафедры прикладной океанографии ЮНЕСКО-МОК
и комплексного управления прибрежными зонами, к. г. н.
Российский государственный гидрометеорологический
университет
Воронежская ул., 79, Санкт-Петербург, Россия, 192007
эл. почта: gordeeva@rshu.ru
тел.: 89111603085

CONTRIBUTORS:

Malinin, Valery

Russian State Hydrometeorological University
79 Voronezhskaya St., 192007 St. Petersburg, Russia
e-mail: malinin@rshu.ru

Gordeeva, Svetlana

Russian State Hydrometeorological University
79 Voronezhskaya St., 192007 St. Petersburg, Russia
e-mail: gordeeva@rshu.ru
tel.: +79111603085