

Член-корреспондент НАН Украины **А. Б. Полонский**,
Е. Н. Воскресенская, **В. Л. Посошков**

Статистический прогноз среднемесячного стока черноморских рек на основе циркуляционных атмосферных процессов

З використанням моделі нейронних мереж і даних тривалих спостережень за приземним атмосферним тиском був виконаний експериментальний статистичний прогноз аномалій стоків найбільших чорноморських річок у весняні місяці. Модель побудована на виділених зв'язках між просторово-часовими модами в системі океан — атмосфера — суша й стоками річок, що є інтегральним показником атмосферних умов над площами водозбору, та враховує автокорельованість рядів стоку. Порівняння прогнозу двомісячної завчасності зі спостереженнями для контрольного періоду показало, що прогноз описує до 85% дисперсії рядів.

Известно, что изменчивость региональных погодно-климатических условий в Европе, включая территорию Украины, связана с аномалиями циркуляционных атмосферных процессов в Атлантико-Евразийском регионе. Причем аномалии стока крупных рек, являясь интегральным показателем атмосферных условий над площадями водосбора, служат хорошим индикатором этих процессов и могут прогнозироваться с некоторой заблаговременностью по крупномасштабным атмосферным индексам.

Физическая основа прогноза заключается в наличии достаточно устойчивых связей между пространственно-временной структурой крупномасштабных атмосферных полей, осадками и температурой приземного воздуха над площадями водосбора, которые определяют последующие аномалии стока. Временной лаг между атмосферными индексами и аномалиями стока крупнейших черноморских рек (Дунай, Днепр и Южный Буг), при котором наблюдаются значимые корреляции между этими величинами, составляет 1–3 мес. Наибольшие величины коэффициентов корреляции отмечаются между зимними индексами, характеризующими атмосферные процессы в Атлантико-Евразийском регионе, и стоками рек в весенний период. Это дает возможность построить статистическую модель прогноза весеннего стока рек с соответствующей заблаговременностью. Причем такая модель имеет важное прикладное значение, поскольку именно на весну приходится и климатический максимум стока, и наиболее катастрофические наводнения черноморских рек [1, 2]. Использование нелинейных статистических моделей позволяет построить более качественный прогноз по сравнению с мультирегрессионным подходом [3]. Статистическая модель прогноза аномалий стоков крупнейших черноморских рек в весенние месяцы, построенная нами, основана на связях между пространственно-временными модами в системе океан — атмосфера — суша и стоками рек с использованием модели нейронных сетей.

В качестве предикторов использовались стандартизованные ежемесячные крупномасштабные индексы атмосферной циркуляции с января 1950 г., взятые на сайте Прогности-

ческого климатического центра США [4]. Процедура идентификации мод и крупномасштабных атмосферных индексов в Северном полушарии основывалась на анализе главных вращательных компонент [5], применяемых к среднемесячным аномалиям высот геопотенциала 500 гПа (т. е. аномалиям давления в свободной атмосфере, приблизительно на высоте 5 км). Десять индексов, соответствующих первым десяти эмпирическим ортогональным функциям, в среднем объясняют около 60% дисперсии аномалий поля геопотенциала на уровне 500 гПа. Из их числа анализировались первые пять мод, оказывающих основное влияние на регион Украины, а именно: Североатлантическое колебание (САК), Восточно-Атлантическое колебание (ВАК), Скандинавская мода (СМ), Полярно-Азиатская и Евразийская моды (ПАМ и ЕАМ соответственно). Более подробно перечисленные моды описаны в работах [5, 6]. Здесь же следует только отметить, что используемые индексы фактически отражают пространственно-временную структуру крупномасштабной атмосферной циркуляции в Атлантико-Евразийском регионе. Эта структура определяется интенсивностью зональной и меридиональной циркуляции в атмосфере, положением Высотной планетарной фронтальной зоны и взаимосвязана с характеристиками штормтреков и блокингов, определяющих аномалии температуры и выпадение осадков в Европейском регионе. Следовательно, пространственно-временная структура крупномасштабной атмосферной циркуляции в Атлантико-Евразийском регионе, описываемая в терминах эмпирических ортогональных функций (или мод), вносящих основной вклад в дисперсию анализируемых полей, ответственна за формирование погодно-климатических аномалий над площадями водосбора крупных европейских рек Черноморского бассейна.

Необходимо подчеркнуть, что используемые моды выделены на основании анализа многолетних пространственно-временных массивов данных об атмосферном давлении на уровне 500 гПа и характеризуют достаточно устойчивые режимы атмосферной циркуляции, типичные для современного климата.

Все индексы подвергались следующей предварительной обработке. В первую очередь, ряды разбивались на 12 статистических выборок, соответствующих каждому месяцу года. Поскольку рассматриваемые моды главным образом проявляют себя в зимнее время (когда атмосферная циркуляция наиболее интенсивна), в работе анализировались временные ряды, относящиеся только к холодному периоду года. Идентичная процедура использовалась для предварительной обработки рядов стока рек. Однако основное внимание в этом случае уделялось весеннему периоду. Причем прогнозировались аномалии среднемесячного расхода рек в марте–мае с заблаговременностью до сезона.

Для построения модели прогноза использовались долговременные массивы стока крупнейших рек Черноморского бассейна с месячной дискретностью (или, точнее, их среднемесячных расходов) с января 1947 г. Самый длинный из массивов — временной ряд стока р. Дунай (по 2007 г), имеющийся в наличии временной ряд стока р. Днепр, заканчивается в 2004 г., а р. Южный Буг — в 2002 г. Для увеличения числа предикторов привлекалась модель авторегрессии первого и второго порядка. Например, для прогноза речного стока р. Дунай на май в качестве дополнительных предикторов привлекались данные о его среднемесячных расходах за предыдущие месяцы — март и апрель (при использовании модели авторегрессии второго порядка) или только за апрель (модель авторегрессии первого порядка). Это позволило существенно улучшить качество прогноза.

Все анализируемые моды и стоки рек характеризуются междесятилетней изменчивостью. Сравнительно небольшая длина рядов не позволяла провести надежный статистический анализ этой изменчивости. Поэтому в одном из вариантов расчетов была проведена

фильтрация рассматриваемых временных рядов. Для этого использовался гармонический фильтр, отсекающий тренд и низкочастотные колебания с периодом более 10 лет. Ниже будут приведены результаты, полученные без предварительной фильтрации, поскольку она приводит к заметному уменьшению длины рядов, а статистическая значимость прогноза изменяется незначительно. Так как расходы Днепра в апреле–мае характеризуются значимым отрицательным трендом [1], то перед проведением статистических расчетов линейный тренд в нескольких вариантах расчета вычитался.

При построении прогностической модели каждый временной ряд, относящийся к определенному месяцу года, рассматривался как самостоятельный предиктор. В качестве модели использовалась искусственная нейронная сеть в виде трехслойного персептрона, состоящего из входного слоя (предикторов), промежуточного и выходного слоев. В данном варианте выходной слой представлен единственным нейроном — аномалией среднемесячного расхода. Передаточная функция, преобразующая серию входных переменных (предикторов) в выходной сигнал, определялась согласно методике, подробно описанной в работе [3]. Оптимальные веса и смещения находились путем минимизации целевой функции. В качестве целевой функции использовался функционал среднеквадратичной ошибки.

Число входных нейронов равнялось числу предикторов. Число нейронов в скрытом слое находилось эмпирически методом “проб и ошибок”. Процесс минимизации функционала ошибок называется процессом обучения нейронной сети. “Обучение” сети проходило на тренировочной (или обучающей) независимой выборке данных. На оставшейся выборке производилось тестирование сети. В настоящей работе часть данных применяли одновременно для тестирования и прогноза.

Выбор оптимального числа предикторов сопряжен с противоречивой задачей. С одной стороны, для возможно более полного учета всех взаимодействий между выходным сигналом и входными параметрами, следует использовать как можно больше входных нейронов. С другой, — малозначимые предикторы, применяемые на входе сети, воспринимаются сетью как шумовые составляющие и ухудшают эффективность работы сети. Поэтому при выборе значимых предикторов, прежде всего, учитывалась их линейная статистическая связь с аномалией среднемесячного расхода рек. Если коэффициент корреляции между предиктором и выходом сети принимал значение, ниже уровня значимости, такой предиктор отбрасывался.

Как уже отмечалось, наибольший интерес представляет сток рек в весенний период, когда происходит таяние снежного покрова на площадях водосборов и наблюдаются максимальные аномалии стоков. Поэтому в качестве прогнозируемых параметров выбирались аномалии стоков для трех весенних месяцев. В качестве предикторов брали моды атмосферной циркуляции в холодное время года и сток рек за предыдущие (один–два) месяца, значимо коррелирующие со стоком рек в прогнозируемом месяце. Для примера в табл. 1 и 2 приведены предикторы для прогноза стока рек Дунай и Днепр за май.

Типичная величина коэффициентов корреляции между предикторами и стоком рек составляет 0,2–0,4. Наиболее значимыми предикторами являются индексы САК и ЕАМ, а наименее значимым — СМ. При этом типичная автокоррелированность рядов стока рек Дунай и Днепр с лагом 1–2 мес. составляет 0,4–0,8. Несмотря на относительно небольшие коэффициенты корреляции между отдельными предикторами и прогнозируемыми стоками, в результате обучения многофакторной нелинейной модели и существенной автокоррелированности рядов расходов рек удается добиться того, что модель объясняет до 85% дисперсии ряда (для майского стока р. Дунай), а сам прогноз представляется весьма успешным

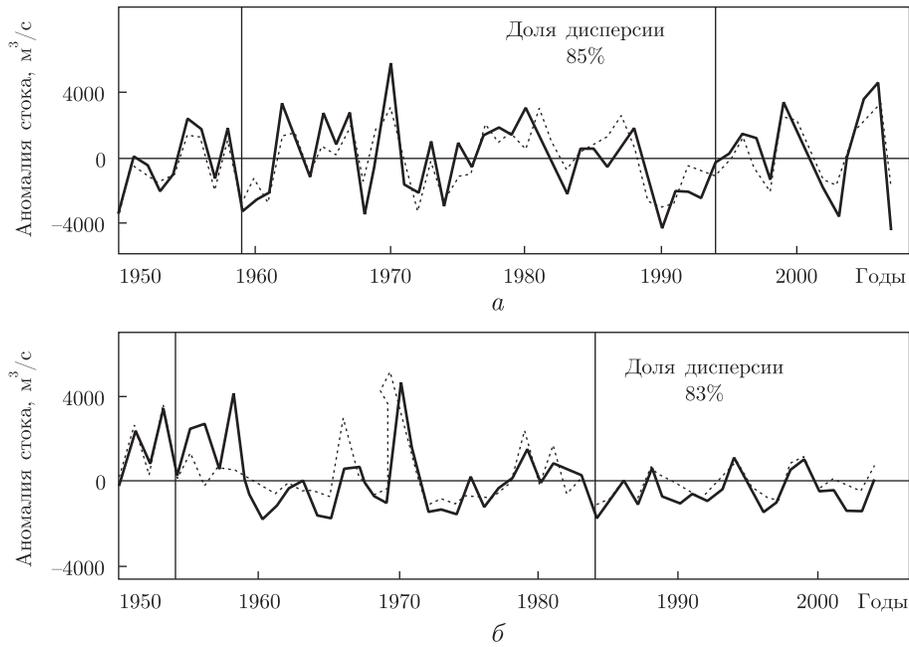


Рис. 1. Прогноз аномалий расхода Дуная (а) и Днепра (б) в мае на основании предикторов табл. 1 и 2 (штриховая кривая) и наблюдаемые величины (сплошная кривая).

Вертикальные линии ограничивают период “обучения” нейронной сети

(рис. 1, а). При использовании модели авторегрессии первого (вместо второго) порядка этот процент уменьшается до 74%, а при полном исключении из числа предикторов стока р. Дунай за предыдущие месяцы он падает до 49%. В то же время в последнем случае заблаговременность прогноза возрастает до двух месяцев. Отметим, что на “обучение” нейронной

Таблица 1. Коэффициенты взаимной корреляции между предикторами и аномалиями майского стока р. Дунай

Предиктор	Январь	Февраль	Март	Апрель
САК	0	0	-0,38	0
ВАК	0	-0,28	0	0
ЕАМ	-0,29	0	-0,41	0
СМ	0	0	0,16	0
ПАМ	0	-0,25	-0,24	0
Сток Дуная	—	—	0,53	0,77

Примечание. Здесь и в табл. 2: знаком “0” помечены ячейки с незначимым уровнем корреляции.

Таблица 2. Коэффициенты взаимной корреляции между предикторами и аномалиями майского стока р. Днепр

Предиктор	Январь	Февраль	Март	Апрель
САК	-0,19	0	-0,35	0
ВАК	-0,14	-0,2	0	0
ЕАМ	-0,25	0	0	0
СМ	0	0	-0,11	0
ПАМ	0	-0,22	0	0
Сток Днепра	—	—	0,36	0,72

сети в рассматриваемом случае отведено 35 лет, которые показаны на рис. 1 вертикальными отрезками. При обучении модели использовано 10 000 итераций.

Конечно, представленный пример демонстрирует наиболее успешный прогноз из числа выполненных нами. Тем не менее достаточно успешным следует признать и прогноз майского стока р. Днепр (см. рис. 1, б). В этом случае модель объясняет 83% дисперсии ряда. При использовании модели авторегрессии первого порядка этот процент уменьшается до 70%. Когда же из числа предикторов полностью исключается речной сток за предыдущие месяцы, этот процент падает до 30%. Причина того, что весенний сток р. Днепр прогнозируется по атмосферным индексам хуже, чем весенний сток р. Дунай, в значительной степени связана со следующим обстоятельством. После 1955–60 гг., когда были сооружены основные объекты Днепровского каскада водохранилищ, такие как Каховский и Кременчугский резервуары, сток р. Днепр был существенно зарегулирован. Это непосредственно видно и на временном ходе стока р. Днепр на рис. 1, б. Поэтому и эффективность прогноза достаточно сильно зависит от выбранного для “обучения” нейронной сети периода.

Из представленных результатов хорошо видно, что прогностическая модель работает существенно лучше, когда к числу предикторов, являющихся индексами дальних связей, добавляются величины самих стоков в месяцы, предшествующие прогнозируемому (за счет значительной автокоррелированности временных рядов расходов). Таким образом, можно, например, давать оценочный прогноз стока р. Дунай на май с заблаговременностью в 2 мес., пользуясь только крупномасштабными атмосферными индексами, а затем уточнять его, привлекая в качестве дополнительного предиктора стоки за март и апрель. Вместе с тем использование в качестве предикторов величины речного стока за январь и февраль (месяцы, предшествующие паводковому периоду) практически не улучшает качество модели. Это объясняется тем, что режим стока в зимние месяцы существенно отличается от режима стока весной (рис. 2, а и б). Поэтому число предикторов в модели авторегрессии ограничивается периодом половодья. В значительной степени именно поэтому успешность прогноза стоков на апрель и (особенно) на март ниже, чем на май. Так, например, в случае прогноза стока р. Дунай на апрель модель объясняет 49% дисперсии ряда при использовании модели авторегрессии первого порядка. Увеличение же порядка модели авторегрессии практически не улучшает качество прогноза.

Что касается р. Южный Буг, то качество прогноза его стока в весенний период существенно хуже, чем качество прогноза стока рек Дунай и Днепр. Это объясняется меньшей площадью его водосбора и относительно большой дисперсией среднемесячных расходов в весенний период, обусловленной в основном сильными различиями в интенсивности жидких осадков над площадью водосбора в разные годы, что проявляется, в частности, в различном временном ходе стоков более крупных рек (Дунай и Днепр) и р. Южный Буг (сравним рис. 2, а и б) и меньшей автокоррелированности расходов Южного Буга. Подробнее этот вопрос обсуждался в работе [1].

В заключение сформулируем основные выводы.

Предлагаемая модель позволяет давать успешный статистический прогноз изменчивости стока крупнейших черноморских рек (Дунай и Днепр) в период весеннего половодья. В основе прогноза лежат выделенные связи между пространственно-временными модами в системе океан — атмосфера — суша и стоками рек, являющимися интегральным показателем атмосферных условий над площадями водосбора, а также наличие автокоррелированности в рядах стока. Наиболее успешным для прогноза можно считать майский сток р. Дунай.

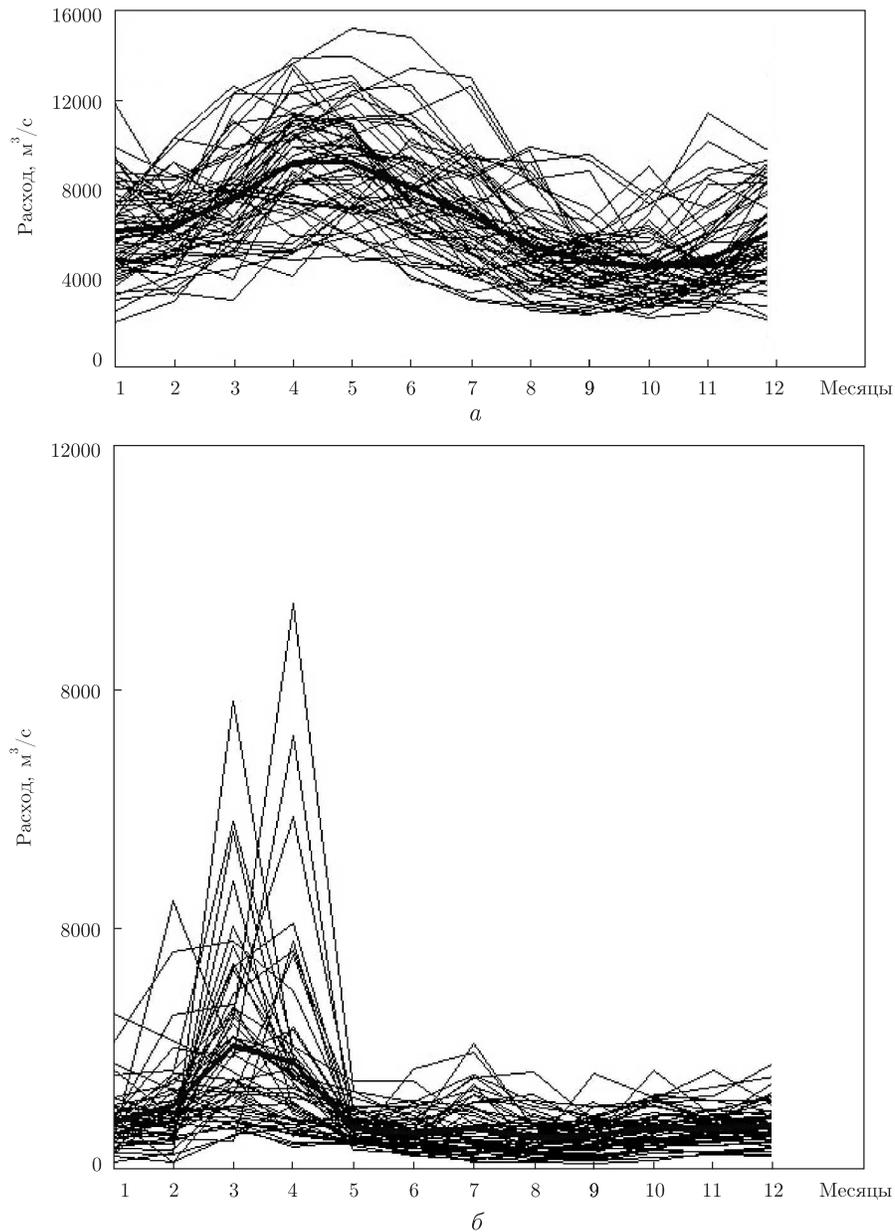


Рис. 2. Годовой ход среднемесячных расходов Дуная (а) и Южного Буга (б). Тонкими кривыми показаны величины расходов в различные годы; жирные кривые — осредненные за весь период наблюдений величины

Майский сток для р. Дунай можно прогнозировать в два этапа: оценочный прогноз с заблаговременностью в 2 мес. только по крупномасштабным атмосферным индексам, а затем уточненный — с привлечением в качестве дополнительного предиктора — сток р. Дунай за март и апрель.

1. *Polonsky A. B., Voskresenskaya E. N., Kadeev D., Kolinko A.* Low-frequency change of the Black sea river discharges associated with the coupled ocean-atmosphere variability in the North Atlantic // Proc. Sec. Int. Conf. Mediter. Coast. Environ. (MEDCOAST). – 1995. – **3**. – P. 1719–1732.

2. *Polonsky A. B., Voskresenskaya E. N., Basharin D. V.* Coupled ocean-atmosphere system and its impacts on European climate // *Climate in transition*. – Washington: Minuteman press, 2003. – P. 15–27.
3. *Ефимов В. В., Посошков В. Л.* Статистическое оценивание суточных сумм зимних осадков с использованием метода нейронных сетей // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2003. – **39**, № 1. – С. 14–25.
4. *Сайт* www.nws.noaa.gov.
5. *Barnston A. G., Livezey R. E.* Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // *Mon. Weather Rev.* – 1987. – **115**, No 6. – P. 1083–1126.
6. *Полонский А. Б.* Роль океана в изменениях климата. – Киев: Наук. думка, 2008. – 184 с.

*Морской гидрофизический институт
НАН Украины, Севастополь*

Поступило в редакцию 18.03.2010

Corresponding Member of the NAS of Ukraine **A. B. Polonsky,
E. N. Voskresenskaya, V. L. Pososhkov**

Statistical forecast of monthly Black-Sea rivers' runoff based on atmosphere circulation indices

Using the neuron network model and long-term sea surface pressure observations, an experimental statistical forecast of the anomalies of the discharges of main Black Sea rivers in spring is done. The model is based on the separated relationships between space-temporal modes in the ocean – atmosphere – land system and the discharges as the integral factor of hydrometeorological conditions above the river's catchment area, by taking the autocorrelations of the long-term runoff series into account. The comparison of the results of a two-month lead time forecast and the observational data (for the checking period) shows that the forecast account for up to 85% of the runoff interannual variability.