

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 556.5.06

ЗАКОНОМЕРНОСТИ МЕСЯЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ СТОКА РЕКИ ИЛИ И ЕГО ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

© 2020 г. А. В. Бабкин^{a, b, *}, В. И. Бабкин^{b, **}, А. С. Мадибеков^{c, ***},
А. Мусакулкызы^{c, ****}, А. В. Чередниченко^{d, ****}

^aРоссийский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

^bГосударственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

^cИнститут географии Республики Казахстан, Алматы, Казахстан

^dНИИ проблем биологии и биотехнологии, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

*e-mail: Abav@mail.ru

**e-mail: Vladimir-babkin@mail.ru

***e-mail: Madibekov@mail.ru

****e-mail: Geliograf@mail.ru

Поступила в редакцию 12.09.2019 г.

После доработки 02.11.2019 г.

Принята к публикации 30.01.2020 г.

Анализ колебаний во временных рядах месячных значений стока р. Или за 1971–1994 гг. методом “Периодичностей” в створах, расположенных 164 км выше и 37 км ниже Капчагайской ГЭС, выявил по девять гармоник с длинами периодов более 1.5 лет. Установленные синусоиды вместе с повторяющимися последовательностями средних месячных значений стока в годовом цикле использованы в различных схемах прогнозирования стока по месяцам и в целом на 1995 г. Результаты поверочных прогнозов оценивались на новом независимом материале. Регулирование стока водохранилищем приводит к некоторому снижению его среднего значения, сглаживанию и нарушению ритмичности годового цикла. Многолетние периоды отчетливее проявляются в колебаниях стока ниже плотины. Несмотря на воздействие ГЭС, среди прочих синусоид в обоих рядах оказались выявлены гармоники с одинаковыми периодами длиной соответственно 25 и 35 месяцев. Возможно, они достовернее и их целесообразнее применять для оценок будущего стока по сравнению с синусоидами, периоды которых установлены только в одном из рядов. Сток р. Или в 1995 г. выше Капчагайской ГЭС был экстремально низким, а ниже — близким к среднему значению временного ряда. По многим использованным методикам прогнозов их результаты для стока выше плотины оказались лучше его оценок на будущее по среднему значению временного ряда, а ниже плотины фактическая ошибка прогнозирования была меньше допустимой. Поэтому прогнозы по ним по месяцам и на год в целом могут быть оценены как не хуже, чем удовлетворительные и приемлемые.

Ключевые слова: речной сток, Капчагайская ГЭС, скрытые гармоники, прогноз

DOI: 10.31857/S2587556620030036

ВВЕДЕНИЕ

Река Или протяженностью 1440 км образуется при слиянии на территории КНР рр. Кунгес и Текес, на протяжении 815 км протекает по Алматинской области Казахстана и впадает в оз. Балхаш. Она является крупнейшей в бассейне Балхаша, обеспечивает более 70% притока в него воды и высоту уровня. Водные ресурсы реки частично разбираются на нужды различных отраслей современной экономики. Часть притоков, в том числе стекающие с хр. Джунгарский Алатау, часто не достигают ее русла, так как их воды практически полностью расходуются на орошение, хозяй-

ственные и коммунально-бытовые нужды населенных пунктов [1]. Начиная со второй половины XX в. сток реки в растущих объемах забирается Китаем на нужды Синьцзян-Уйгурского автономного района [8, 11].

В 1967–1970 гг. в среднем течении р. Или была построена Капчагайская ГЭС, у плотины которой сформировано водохранилище. Площадь его акватории составляет примерно 1847 км², и оно используется для нужд орошаемого земледелия, туризма и рыбного хозяйства.

Таким образом, проблема прогнозирования стока реки весьма важна для многих отраслей со-

временной экономики Казахстана, связанных с использованием ее вод [7]. Актуальность развития подходов оценки на будущее притока вод к крупным водохранилищам и замыкающих их ГЭС возрастает в связи с происходящим изменением климата [12] и увеличением антропогенной нагрузки, влияние которой на речные бассейны не постоянно во времени [9].

Целью настоящей работы является выявление закономерностей колебаний стока р. Или, расчет с использованием поверочных прогнозов и оценка их результатов на независимом материале.

Наблюдения за стоком р. Или проводятся в створах, расположенных 164 км выше Капчагайской ГЭС и 37 км ниже (ур. Капчагай). Оба эти ряда непрерывны за период времени 1971–1995 гг.

Капчагайская ГЭС и водохранилище оказывают регулирующее влияние на сток реки, изменяя структуру его колебаний. Не все периоды, установленные в рядах его наблюдений выше плотины, должны быть выявлены в данных постов, расположенных ниже нее. Но, наиболее достоверные из них могут обнаружиться как выше, так и ниже ГЭС.

Последовательности средних годовых значений стока слишком коротки для установления в них каких-либо периодических закономерностей. Поэтому обрабатываются длинные ряды из его месячных значений за 1971–1994 гг.

Ряды стока р. Или анализируются методом “Периодичностей” на наличие в них скрытых гармоник межгодовых и многолетних колебаний с длинами периодов не менее 18 месяцев. Более короткие периоды в настоящей работе не выявляются, поскольку структура колебаний внутригодового хода стока требует специального исследования. При анализе ряда на наличие в нем скрытых гармоник с длиной периода порядка года и менее его аппроксимацию синусоидальными функциями следует проводить с меньшим, чем в данной работе, шагом изменения периода.

Расчеты помесечных поверочных прогнозов проводятся на 1995 г. по различным схемам, включая выявленные синусоиды и их суммы. Принимая во внимание универсальный 12-месячный период колебаний природных процессов, в настоящей работе при расчетах помесечных поверочных прогнозов стока р. Или среди прочих схем используется повторяющаяся последовательность средних месячных значений его годового цикла. Последовательность получена расчетом средних значений стока каждого месяца за интервал времени 1971–1994 гг.

Будущее значение стока на год предсказывается посредством нахождения среднего значения прогнозов на все его месяцы. Результаты прогнозирования по месяцам и на 1995 г. год в целом

оцениваются при их сопоставлении с данными его наблюдений.

ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОВЕРОЧНЫХ ПРОГНОЗОВ

Согласно общим правилам, прогноз на какой-либо месяц года либо в целом на год считается оправдавшимся, если его ошибка Δ — разность фактического и предсказанного значений стока — по модулю меньше допустимой ошибки прогноза $\Delta_{\text{доп}}$. За допустимую ошибку прогноза часто принимается величина, равная 0.674 от среднего квадратического отклонения анализируемого временного ряда [2]. Оправдываемость помесечного прогноза на годовом поверочном интервале может быть оценена по количеству верных прогнозов на нем N .

Результаты прогноза стока на временном интервале также могут быть оценены с учетом суммы квадратов его ошибок $S_{\text{пр}}$ (суммы квадратов разностей наблюдаемых и фактических значений стока за каждый месяц поверочного года). Величиной, связанной с суммой квадратов ошибок прогноза, является его относительная ошибка dr , определяемая по формуле:

$$dr = \frac{0.674}{\Delta_{\text{доп}}} \sqrt{\frac{S_{\text{пр}}}{l}}, \quad (1)$$

где l — число значений стока поверочного интервала (в настоящей работе оно равно 12).

Корень от отношения суммы квадратов ошибок прогноза к числу значений поверочного интервала — это средняя квадратическая ошибка прогнозирования. Относительная ошибка прогнозирования равна отношению его средней квадратической ошибки к среднему квадратическому отклонению ряда.

Среднюю квадратическую ошибку можно считать допустимой, если она, как и ошибка на месяц или год, меньше 0.674 среднего квадратического отклонения временного ряда. Таким образом, средняя квадратическая ошибка прогноза на поверочном интервале меньше допустимой, если относительная ошибка не превышает 0.674.

Результаты прогноза по одной методике должны быть оценены как лучшие, чем по другой, если по первой из них оправдавшихся прогнозов больше, а их относительная ошибка меньше. Если по одной схеме оправдываемость прогнозов выше, но и относительная ошибка также больше, можно заключить, что результаты прогнозирования по ним оказались примерно одного качества.

Успешный долгосрочный прогноз стока должен быть не хуже оценки на будущее по среднему значению его временного ряда. При этом его относительная ошибка должна быть меньше 0.674.

Нехарактерно низкое для ряда стока выше плотины его значение за 1995 г. при стоке ниже нее близком к среднему дают основание считать вполне приемлемыми прогнозы, которые соответствуют только одному из этих двух критериев успешности, и обычно оцениваемых как удовлетворительные.

Средний месячный сток р. Или выше Капчагайской ГЭС за 1995 г. — $317.6 \text{ м}^3/\text{с}$ был меньше, чем любое из его годовых значений за период 1971–1994 гг. Метод “Периодичностей”, описывающий временной ряд синусоидой, либо суммой нескольких синусоид, как правило, не приводит к оценкам будущего стока, выходящим за диапазон значений его ряда. Поэтому прогнозы этого ряда по месяцам и на год в целом можно признать приемлемыми, если их результаты будут лучше оценок стока на будущее по его среднему значению, даже если при этом их средние квадратические ошибки помесечного прогнозирования и ошибки на год окажутся несколько больше допустимых.

Ниже плотины средний месячный сток за этот год, равный $384.7 \text{ м}^3/\text{с}$, был лишь немного меньше среднего значения временного ряда. Близость фактического стока за поверочный интервал к его среднему значению может быть обусловлена искусственным регулированием стока, призванным уменьшить негативное влияние снижения стока на экономику и жизнь людей. Для этого поста прогнозы по месяцам и на год можно рассматривать как приемлемые, если их средняя квадратическая ошибка и ошибка Δ оказались меньше допустимых. При этом, результаты могут быть и хуже оценок по среднему значению анализируемого ряда.

По критерию оправдываемости прогнозов можно полагать, что оценки будущего стока не хуже, чем удовлетворительные, если на поверочном интервале они оказались верными не менее чем в 50–55% случаев.

ВНУТРИГОДОВЫЕ И МНОГОЛЕТНИЕ КОЛЕБАНИЯ МЕСЯЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ СТОКА р. ИЛИ

В [6] на примере некоторых рек юга Африки показано, что помесечные прогнозы стока по последовательности месячных значений его годового хода, осредненных за период наблюдений, как правило, оказываются лучше его оценок на будущее по среднему значению временного ряда. В настоящем исследовании также формируются последовательности средних месячных значений стока, позволяющие проанализировать различия его годового цикла выше и ниже плотины.

На рис. 1 представлены результаты расчетов средних значений за каждый месяц значений стока за 1971–1994 гг. У обоих постов наибольший из

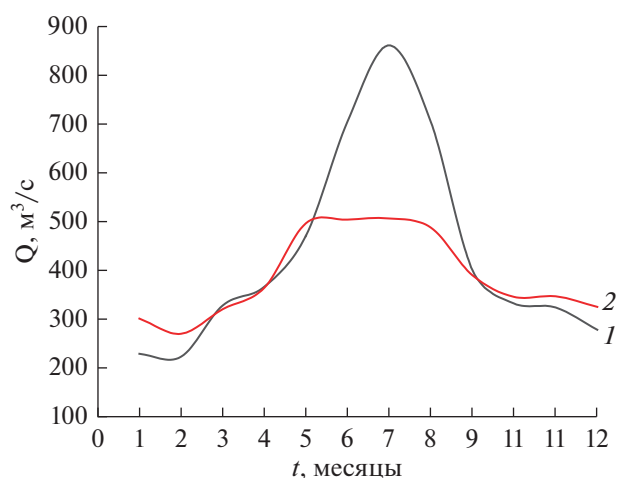


Рис. 1. Повторяющиеся последовательности средних за период 1971–1994 гг. месячных значений стока р. Или у постов, расположенных 164 км выше (1) и 37 км ниже (2) Капчагайской плотины.

всех месяцев сток отмечается в июле, а наименьший — в феврале. Максимум стока у поста, расположенного выше Капчагайской плотины, хорошо выражен. Он существенно, примерно на $160.0 \text{ м}^3/\text{с}$, больше, чем значения стока за соседние месяцы. У стока ниже Капчагайской ГЭС нет явного летнего максимума. Его значения за май, июнь, июль и август примерно одинаковы.

На рис. 2 показаны месячные колебания стока р. Или выше и ниже Капчагайской ГЭС, включая интервал поверочного прогноза. Первое значение на этих графиках — это сток января 1971 г. На июль приходятся экстремально высокие месячные значения стока 1973, 1987 и 1988 г. у поста выше Капчагайской ГЭС, составившие 1300.0, 1490.0 и $1600.0 \text{ м}^3/\text{с}$ соответственно. Самое низкое значение стока — $86.8 \text{ м}^3/\text{с}$ — зафиксировано в феврале 1975 г. в этом же створе.

Средние значения стока р. Или за 1971–1994 гг. у постов, расположенных выше и ниже Капчагайской ГЭС, оказались равными 440.6 и $393.3 \text{ м}^3/\text{с}$, а средние квадратические отклонения его месячных рядов — 236.8 и $126.7 \text{ м}^3/\text{с}$ соответственно. Допустимые ошибки помесечного прогнозирования, таким образом, оказались равными соответственно 159.6 и $85.4 \text{ м}^3/\text{с}$.

У погодичных рядов стока этих постов средние квадратические отклонения соответственно составили 73.0 и $63.8 \text{ м}^3/\text{с}$, а допустимые ошибки их прогнозов оказались равными 49.2 и $43.0 \text{ м}^3/\text{с}$.

Среднее значение стока у поста, расположенного 164 км выше Капчагайской ГЭС, больше среднего значения стока в створе 37 км ниже плотины. Средний сток р. Или выше Капчагайской ГЭС больше, чем ниже нее в марте, апреле и в

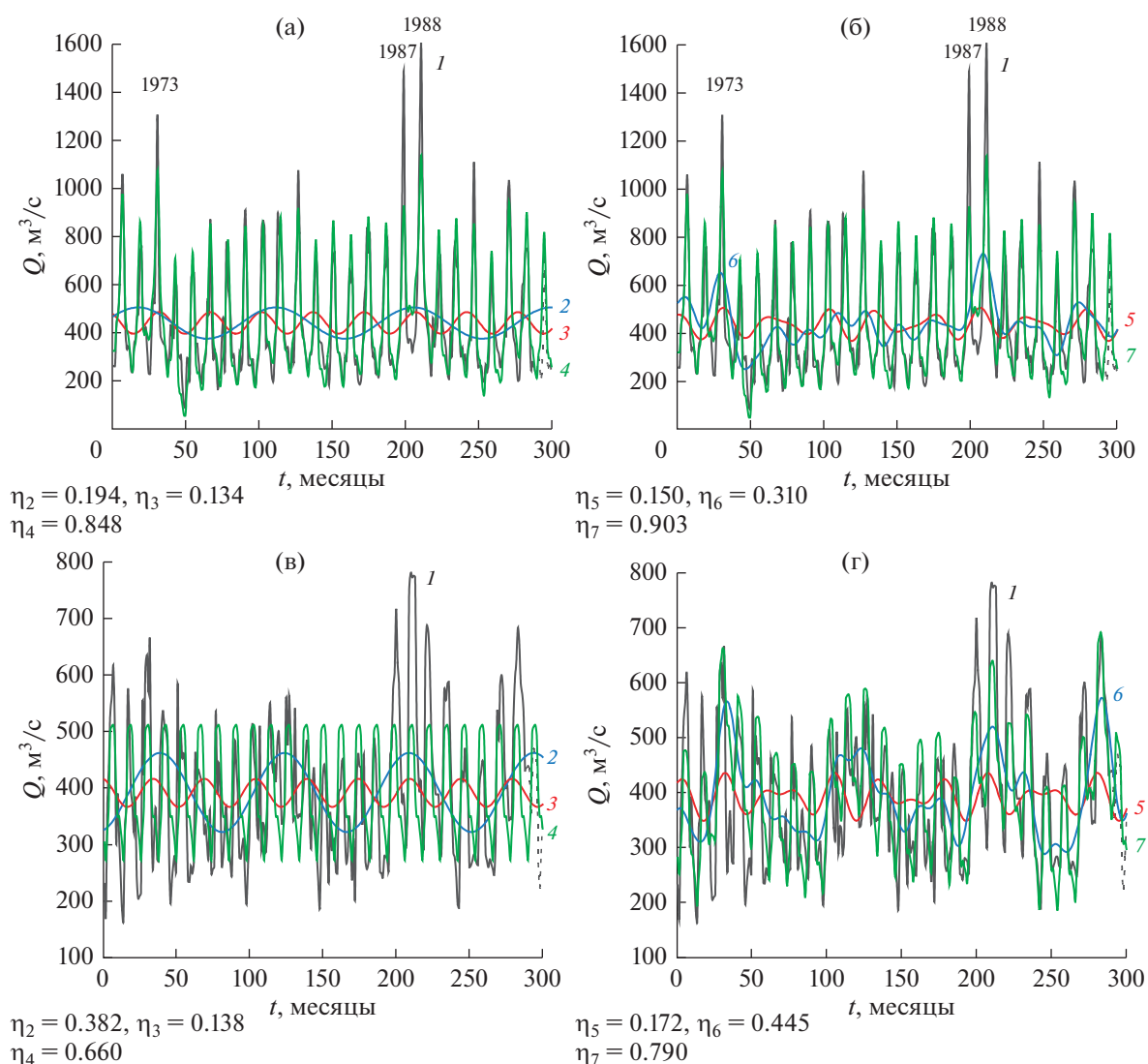


Рис. 2. Колебания стока р. Или у постов, расположенных 164 км выше (а, б) и 37 км ниже (в, г) Капчагайской плотины: 1 – временные ряды (пунктиром выделен интервал поверочного прогноза – 12 мес. 1995 г.), 2 – аппроксимирующая синусоида с наибольшей корреляцией с рядом стока, 3 – синусоида с наибольшей корреляцией с рядом из тех, чьи периоды выявлены в колебаниях стока у обоих постов, 4 – повторяющаяся последовательность осредненных за 1971–1994 гг. средних месячных значений стока его годового цикла, 5 – сумма синусоид с периодами, выявленными в колебаниях обоих рядов, 6 – сумма всех выявленных синусоид, 7 – сумма значений кривых 4 и 6.

июне–сентябре. В мае и в октябре–феврале средний сток у поста ниже Капчагайской плотины больше, чем выше нее.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ, моделирование и поверочное прогнозирование временных рядов стока р. Или выше и ниже Капчагайской ГЭС проведены методом “Периодичностей”, который основан на их аппроксимации синусоидальными функциями последовательно с пошаговым изменением периода [3]. Для каждого периода методом наименьших квадратов [10] рассчитываются амплитуда, фаза и

дополнительное слагаемое наилучшей аппроксимирующей синусоиды, около которого она колеблется, а также сумма ее квадратов разностей со значениями соответствующего ряда [5, 13].

В зависимости от периода аппроксимации у отдельных периодов будут отмечаться минимумы сумм квадратических разностей значений ряда и аппроксимирующих его синусоид. Такой минимум может быть признаком того, что рассматриваемая синусоида является периодичностью.

При сложении периодичностей корреляция их суммы и значений ряда должна последовательно возрастать [4]. Тогда суммы периодичностей бу-

дут отражать основные особенности колебаний рядов.

В табл. 1 представлены результаты аппроксимации рядов месячных значений стока р. Или у постов, расположенных 164 км выше и 37 км ниже Капчагайской плотины. Расчеты проведены в диапазоне периодов колебаний от 18 до 288 мес. — продолжительности анализируемого интервала ряда, с шагом изменения периода один месяц.

В этой таблице характеристики синусоид, аппроксимирующих ряд стока р. Или выше Капчагайской плотины, обозначены индексом H , а ниже нее — индексом L . В первом столбце приводятся периоды аппроксимации T , во втором и шестом столбцах — дополнительные слагаемые Q_0 , около которых колеблются аппроксимирующие синусоиды.

В третьем и седьмом столбцах представлены результаты расчетов амплитуд наилучших аппроксимирующих синусоид $\delta Q/2$, а в четвертом и восьмом столбцах — их фаз ϕ . В пятом и девятом столбцах таблицы указаны суммы квадратических разностей этих синусоид и значений рядов S_Q .

Для уменьшения объема вычислений при обработке этих рядов, каждое их значение делилось на 100. Приведенные в табл. 1 дополнительные слагаемые и амплитуды наилучших аппроксимирующих синусоид в 100 раз меньше их истинных величин, а суммы их квадратических разностей со значениями рядов — в 10000 раз меньше.

Характеристики наилучших аппроксимирующих синусоид в порядке увеличения периода на 1 мес. представлены для его длин по 40 мес. включительно. Те из них, у которых отмечается локальный минимум сумм квадратических разностей со значениями ряда, выделены курсивом.

Далее в таблице также курсивом приводятся параметры синусоид с минимумами сумм квадратов разностей со значениями соответствующих рядов, чьи периоды превышают 40 мес. В нижней части выявленные периоды представлены в порядке убывания корреляционного отношения их синусоид с соответствующими рядами η .

У ряда стока р. Или выше Капчагайской плотины периоды минимумов сумм квадратических разностей наилучших аппроксимирующих синусоид имеют длину 94, 35, 30, 245, 20, 64, 49, 42 и 25 мес. Ниже Капчагайской ГЭС минимумы сумм квадратических разностей ряда стока и аппроксимирующих его синусоид отмечаются у периодов, равных 85, 59, 35, 41, 51, 25, 18, 28, 23, 21 и 31 мес.

Самая высокая корреляция с рядом стока у поста выше Капчагайской плотины оказалась у синусоиды с периодом 94 мес. Она равна 0.194. Корреляция со стоком ниже Капчагайской ГЭС самая

высокая у 85-месячной синусоиды. Ее значение составило 0.382.

Выявленные синусоиды складывались в порядке уменьшения их корреляции с соответствующим временным рядом. При сложении синусоид временного ряда стока выше плотины корреляция их суммы с ним последовательно увеличивалась. Корреляция суммы всех девяти выявленных синусоид с этим рядом составила 0.310.

Корреляция суммы соответствующих синусоид и значений ряда стока ниже плотины непрерывно увеличивалась при сложении первых девяти гармоник, достигнув величины 0.445. При добавлении в эту сумму соответственно синусоид с периодами 21 и 31 мес. ее корреляция оказалась несколько меньше этого наибольшего значения.

Таким образом, в колебаниях стока р. Или выше и ниже плотины установлено по девять синусоид, которые могут быть охарактеризованы как периодичности. Из них гармоники с периодами, длиной 35 и 25 мес., выявлены у обоих рядов.

СХЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТОКА р. ИЛИ У ПОСТОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ ВЫШЕ И НИЖЕ КАПЧАГАЙСКОЙ ГЭС

На рис. 2 помимо месячных колебаний стока р. Или на графики нанесены линии, иллюстрирующие методики, по которым рассчитывались прогнозы: 2 — синусоиды с периодами 94 и 85 мес., у которых корреляция с соответствующим рядом наибольшая, 3 — синусоида с периодом 35 мес., у которой наибольшая корреляция с рядами из гармоник, чьи периоды выявлены в колебаниях стока у обоих постов, 4 — повторяющаяся последовательность средних месячных значений стока его годового цикла.

Цифрой 5 обозначены суммы гармоник с периодами 35 и 25 мес., соответственно выявленных в колебаниях стока выше и ниже Капчагайской плотины, 6 — суммы из девяти гармоник (всех выявленных синусоид). Под цифрой 7 на рисунке приводятся соответственно суммы сумм синусоид, проиллюстрированных кривой 6, и повторяющихся последовательностей месячных значений стока, представленных линией 4.

В левом нижнем углу графиков указаны результаты расчетов корреляции этих моделей с соответствующими временными рядами. Корреляция на рисунках представлена теми же номерами, которыми на них обозначены схемы прогнозирования.

Корреляция синусоиды с периодом 35 мес. и стока р. Или выше Капчагайской плотины составила 0.134, а ниже нее — 0.138. У последовательностей средних месячных значений стока годового цикла корреляция с соответствующими рядами

Таблица 1. Синусоидальная аппроксимация временных рядов стока р. Или выше и ниже Капчагайской ГЭС

T , месяц	Q_{0H} , 100 м ³ /с	$\delta Q_H/2$, 100 м ³ /с	Φ_H , радиан	S_{QH} , (100 м ³ /с) ²	Q_{0L} , 100 м ³ /с	$\delta Q_L/2$, 100 м ³ /с	Φ_L , радиан	S_{QL} , (100 м ³ /с) ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9
18.0	4.406	0.187	-0.3710	1609.2	3.933	0.154	-1.4008	458.89
19.0	4.403	0.227	2.9582	1606.8	3.934	0.138	1.3529	459.57
20.0	4.406	0.299	-1.4663	1601.5	3.932	0.034	-0.1306	462.14
21.0	4.404	0.133	2.6034	1611.7	3.932	0.092	1.0465	461.11
22.0	4.406	0.111	2.6137	1612.5	3.933	0.050	2.5085	461.95
23.0	4.403	0.120	2.4678	1612.2	3.931	0.093	3.0301	461.07
24.0	4.406	0.224	1.5575	1607.0	3.933	0.077	0.5783	461.47
25.0	4.399	0.239	-0.0022	1606.1	3.928	0.201	-0.0898	456.52
26.0	4.404	0.233	3.8318	1606.4	3.932	0.099	-1.3878	460.91
27.0	4.406	0.126	0.8619	1612.0	3.931	0.091	-1.1351	461.14
28.0	4.404	0.138	1.3127	1611.6	3.930	0.147	2.2338	459.16
29.0	4.406	0.358	3.6146	1595.7	3.934	0.083	4.5001	461.33
30.0	4.409	0.406	-0.6911	1590.4	3.932	0.069	-1.2546	461.63
31.0	4.409	0.281	0.9972	1603.0	3.932	0.088	-0.0032	461.20
32.0	4.406	0.181	3.1162	1609.6	3.933	0.040	1.8581	462.08
33.0	4.400	0.324	4.4531	1599.1	3.930	0.112	3.9703	460.52
34.0	4.399	0.441	-1.4308	1586.4	3.927	0.206	4.4187	456.20
35.0	4.403	0.452	-1.4997	1585.3	3.930	0.247	4.4174	453.58
36.0	4.406	0.363	4.3884	1595.3	3.933	0.223	4.1068	455.16
37.0	4.404	0.241	3.8356	1605.7	3.933	0.166	3.7082	458.25
38.0	4.400	0.162	3.3260	1610.5	3.928	0.149	3.3249	459.13
39.0	4.399	0.168	2.6893	1610.2	3.926	0.183	2.5214	457.45
40.0	4.401	0.216	1.4443	1607.5	3.928	0.222	1.1905	455.09
42.0	4.409	0.266	3.9272	1604.1	—	—	—	—
49.0	4.400	0.272	2.7041	1603.8	—	—	—	—
51.0	—	—	—	—	3.922	0.235	1.4953	454.48
59.0	—	—	—	—	3.934	0.295	3.5987	449.57
64.0	4.385	0.294	2.1860	1601.9	—	—	—	—
85.0	—	—	—	—	3.936	0.695	0.1734	394.85
94.0	4.398	0.652	2.6593	1553.5	—	—	—	—
245.0	4.398	0.427	1.9424	1591.1	—	—	—	—
—	T , месяц	—	—	η	T , месяц	—	—	η
—	94.0	—	—	0.194	85.0	—	—	0.382
—	35.0	—	—	0.134	59.0	—	—	0.166
—	30.0	—	—	0.122	35.0	—	—	0.138
—	245.0	—	—	0.120	41.0	—	—	0.133
—	20.0	—	—	0.089	51.0	—	—	0.130
—	64.0	—	—	0.087	25.0	—	—	0.112
—	49.0	—	—	0.080	18.0	—	—	0.086
—	42.0	—	—	0.079	28.0	—	—	0.083
—	25.0	—	—	0.071	23.0	—	—	0.052
—	—	—	—	—	21.0	—	—	0.051
—	—	—	—	—	31.0	—	—	0.049

Примечание: амплитуды и дополнительные слагаемые синусоид в 100 раз меньше их истинных величин, суммы квадратических разностей со значениями рядов — в 10000 раз меньше.

выше и ниже Капчагайской ГЭС оказалась равной 0.848 и 0.660.

Корреляция сумм синусоид с периодами 35 и 25 мес. и рядов стока выше и ниже Капчагайской плотины равна соответственно 0.150 и 0.172. Ее величина с рядом стока суммы соответствующих девяти синусоид и повторяющейся последовательности его средних месячных значений у поста, расположенного выше Капчагайской ГЭС, составила 0.903. Ниже плотины у суммы всех выявленных синусоид и повторяющейся последовательности средних месячных значений стока его годового цикла корреляция с соответствующим рядом оказалась равной 0.790.

Повторяющаяся последовательность средних месячных значений стока и ее сумма с девятью синусоидами более длинных периодов выше плотины описывают соответственно все максимумы месячных колебаний стока р. Или и практически все его минимумы, за исключением 148-го мес. ряда, когда минимум стока 1983 г. пришелся не на февраль, а на апрель.

Выше Капчагайской ГЭС практически все максимумы ряда месячных значений стока узкие и вытянутые, а ниже нее встречаются как узкие и вытянутые, так и плоские и пологие максимумы. Так как высокие значения стока р. Или ниже плотины в разные годы имеют разную форму, они хуже воспроизводятся однотипными максимумами соответствующей повторяющейся последовательности средних месячных значений стока.

Минимумы колебаний стока ниже плотины и повторяющейся последовательности его средних месячных значений приходятся на разные месяцы в большем числе случаев, чем выше нее. Поэтому повторяющаяся последовательность средних месячных значений годового цикла и ее сумма с девятью синусоидами с более длинными периодами соответственно более точно описывают ряд стока выше плотины.

Суммы из девяти синусоид с периодами более 1.5 лет и из двух их гармоник, выявленных в обоих рядах стока, лучше описывают его колебания у поста, расположенного ниже плотины, чем выше нее. Эти модели воспроизводят чередование групп значений повышенного и пониженного стока, которое более отчетливо проявляется в его временном ряду ниже Капчагайской ГЭС.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗОВ

Результаты помесечных поверочных прогнозов стока р. Или представлены в табл. 2 и 3. В табл. 2 приводится число оправдавшихся прогнозов, в табл. 3 — относительная ошибка прогнозирования. Цифрами в первой строке этих таблиц обозначены схемы прогнозирования в том порядке, в каком расчеты по ним представлены на

Таблица 2. Оправдываемость помесечных прогнозов на 1995 г. стока р. Или у постов, расположенных 164 км выше и 37 км ниже Капчагайской ГЭС

	1	2	3	4	5	6	7
N_H	3	1	7	9	8	6	10
N_L	9	7	9	7	7	9	11

Таблица 3. Относительная ошибка помесечных прогнозов на 1995 г. стока р. Или у постов, расположенных 164 км выше и 37 км ниже Капчагайской ГЭС

	1	2	3	4	5	6	7
dr_H	0.788	0.967	0.709	0.699	0.689	0.729	0.569
dr_L	0.643	0.873	0.627	0.734	0.670	0.571	0.433

рис. 2. Под цифрой 1 приводятся результаты оценки будущего стока по средним значениям его рядов за анализируемый интервал.

Лучшие результаты помесечных прогнозов стока р. Или выше Капчагайской ГЭС получились по сумме всех выявленных синусоид и повторяющейся последовательности средних месячных значений стока. По этой схеме оправдалось 10 прогнозов, а относительная ошибка прогнозирования оказалась равной 0.569.

Хуже оказались прогнозы по сумме всех синусоид с периодами, выявленными в колебаниях стока ниже и выше плотины, и по последовательности средних месячных значений стока. Результаты прогнозов по этим методикам оказались примерно одного качества. По сумме гармоник с периодами 25 и 35 мес. оказались верными 8 прогнозов, а относительная ошибка прогнозирования составила 0.689. Относительная ошибка по последовательности средних месячных значений стока составила 0.699, и 9 прогнозов оправдались.

При оценке будущего стока по синусоиде с наибольшей корреляцией с рядом из тех, чьи периоды выявлены в его колебаниях выше и ниже плотины, 7 прогнозов оказались верными, а относительная ошибка прогнозирования составила 0.709. По сумме всех выявленных синусоид оправдалось 6 прогнозов, а относительная ошибка оказалась равной 0.729. Этот результат хуже, чем по синусоиде с периодом 35 мес.

Прогноз стока по сумме всех выявленных синусоид получился лучше, чем его оценка на будущее по среднему значению. По среднему значению оправдалось 3 прогноза, а их относительная ошибка составила 0.788. Самыми худшими получились результаты по синусоиде с наибольшей корреляцией со значениями ряда: оправдался только 1 прогноз, а относительная ошибка прогнозирования равна 0.967.

Таблица 4. Ошибка прогноза на 1995 г. стока р. Или у постов, расположенных 164 км выше и 37 км ниже Капчагайской ГЭС, м³/с

	1	2	3	4	5	6	7
Δ_H	–123.0	–181.3	–85.4	–123.0	–68.9	–87.9	–87.9
Δ_L	–8.6	–75.9	10.8	–8.6	24.1	–11.2	–11.2

У поста, расположенного ниже плотины, как и выше нее, самый лучший прогноз стока получился по сумме всех выявленных синусоид и повторяющейся последовательности средних месячных значений его годового цикла, а самый худший – по синусоиде с наибольшей корреляцией с рядом. По этим схемам соответственно оправдалось 11 и 7 прогнозов, а относительная ошибка прогнозирования оказалась равной 0.433 и 0.873.

Хуже, чем по сумме всех девяти синусоид и повторяющейся последовательности средних месячных значений стока, получился прогноз по сумме всех выявленных синусоид. По этой методике оправдалось 9 прогнозов, а ее относительная ошибка составила 0.571. При прогнозе по синусоиде с наибольшей корреляцией с рядом из тех, чей период выявлен в колебаниях стока выше и ниже плотины, также оказались верными 9 прогнозов, но относительная ошибка по этой схеме составила 0.627. Результат по ней хуже, чем по сумме всех синусоид.

По среднему значению, как и по гармонике с периодом 35 мес., оправдалось 9 прогнозов, а относительная ошибка прогнозирования, равная – 0.643, больше, чем по этой синусоиде. Поэтому прогнозы по среднему значению ряда хуже, чем по синусоиде с наибольшей корреляцией с ним из тех, периоды которых установлены в колебаниях стока у обоих постов.

По сумме синусоид с периодами 35 и 25 мес., выявленных в колебаниях стока выше и ниже плотины, оправдалось 7 прогнозов. Относительная ошибка прогнозирования составила 0.670. Результаты прогноза по сумме этих синусоид хуже, чем по среднему значению ряда. По последовательности средних месячных значений стока его годового цикла также 7 прогнозов оказались верными, а относительная ошибка прогнозирования составила 0.734. Этот результат хуже оценки будущего стока по сумме синусоид с периодами 35 и 25 мес.

Результаты прогноза годового значения стока 1995 г. могут быть оценены сопоставлением его ошибки Δ с допустимой ошибкой прогноза $\Delta_{\text{доп}}$ и ошибкой оценки будущего стока по среднему значению его ряда. Ошибка годового прогноза стока р. Или выше и ниже Капчагайской ГЭС приводится в табл. 4. Теми же цифрами, что и в табл. 2 и 3, в верхней ее строке обозначены мето-

дики прогнозирования. Поскольку среднее значение последовательности средних месячных значений стока его годового цикла равно среднему значению ряда, результаты прогнозов по ней те же, что и по среднему значению.

Результаты прогнозов по сумме девяти выявленных синусоид и повторяющейся последовательности средних месячных значений стока те же, что и по сумме всех выявленных синусоид. Там, где предсказанное значение стока оказывалось больше фактического, ошибка прогноза отрицательна.

При прогнозировании стока на 1995 г. выше плотины самый лучший результат получен по сумме синусоид с периодами 35 и 25 мес., выявленными в его колебаниях обоих рядов. Несколько хуже оказался прогноз по синусоиде с периодом 35 мес. Далее, в порядке ухудшения результата, следуют прогнозы по сумме всех девяти синусоид, по среднему значению и по синусоиде с наибольшей корреляцией с рядом стока.

Ниже плотины лучшим оказался прогноз по среднему значению ряда, а худшим, как и выше нее – по синусоиде, у которой самая высокая корреляция с ним. Хуже, чем по среднему значению, получились прогнозы по синусоиде с наибольшей корреляцией с рядом из тех, чьи периоды выявлены в колебаниях стока у обоих постов, по сумме всех выявленных синусоид, и по сумме синусоид с периодами, установленными в колебаниях стока выше и ниже плотины.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты прогнозов стока р. Или выше Капчагайской ГЭС по месяцам на 1995 г. по всем использованным схемам, кроме синусоиды с наибольшей корреляцией с рядом, оказались лучше, чем по среднему значению. Поэтому, принимая во внимание экстремально низкий сток этого года, их можно оценить, как не хуже, чем удовлетворительные и вполне приемлемые.

Результаты прогнозирования стока ниже плотины, с учетом того, что его значение 1995 г. было близко к среднему, могут оцениваться как не хуже, чем удовлетворительные, если их относительная ошибка меньше 0.674. Приемлемыми могут считаться прогнозы по сумме всех выявленных синусоид и повторяющейся последовательности средних месячных значений стока и по сумме всех девяти выявленных синусоид. Приемлемые прогнозы также получены по гармонике с наибольшей корреляцией с рядом из тех, чьи периоды выявлены у обоих постов, и по сумме всех синусоид с периодами, присутствующими в колебаниях стока выше и ниже плотины.

Прогнозы стока, которые лучше, чем по среднему значению ряда, чья относительная ошибка

меньше 0.674, и при этом отмечается высокая оправдываемость, следует оценить как успешные. У створа выше плотины к таким прогнозам можно отнести оценку будущего стока по сумме девяти выявленных синусоид и последовательности средних месячных значений стока его годового цикла. Ниже плотины, помимо этой схемы, весьма удачными оказались помесечные прогнозы по сумме всех выявленных синусоид и по синусоиде с наибольшей корреляцией с рядом из тех, чьи периоды выявлены в колебаниях стока обоих рядов.

Выше плотины годовые прогнозы на 1995 г. получились лучше, чем по среднему значению, а ниже нее ошибка оказалась меньше допустимой по всем схемам, кроме расчетов будущего стока по синусоиде с наибольшей корреляцией с соответствующим рядом. С учетом особенностей значения стока обоих рядов 1995 г. эти результаты соответствуют критериям приемлемого прогноза.

Следует также подчеркнуть, что средний месячный сток р. Или 1994 г. выше и ниже Капчагайской ГЭС — 450.3 и 518.4 м³/с соответственно был больше его среднего значения за 1971–1994 гг. Все методики прогнозов, кроме синусоид с наибольшей корреляцией с рядами, позволили получить важную информацию о будущем состоянии стока, указав на то, что он в 1995 г. будет меньше, чем в предыдущий год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что корреляция повторяющейся последовательности средних месячных значений стока его годового цикла с соответствующим рядом наблюдений выше Капчагайской ГЭС больше, чем ниже плотины. Помесечный прогноз стока по этой повторяющейся последовательности выше плотины оказался лучше, чем ниже нее.

Корреляция с соответствующими рядами отдельных синусоид с периодами 25 и 35 мес., выявленными у обоих створов, их сумм, а также сумм всех девяти синусоид больше в колебаниях стока ниже плотины. Прогнозы стока по сумме девяти синусоид и по синусоиде с наибольшей корреляцией с рядом из тех, период которых выявлен в обоих рядах, ниже плотины получились лучше, чем выше нее. Прогнозы стока выше и ниже плотины по сумме синусоид с периодами, выявленными в его колебаниях у обоих рядов, можно оценить как примерно одного качества.

Это может свидетельствовать о том, что регулирование стока р. Или Капчагайской ГЭС и водохранилищем, помимо некоторого уменьшения его среднего многолетнего значения, ведет к сглаживанию и нарушению ритмичности годовых колебаний. Многолетние колебания проявляются более рельефно ниже плотины.

В целом, учитывая, что сток 1995 г. выше плотины был экстремально низким, а ниже — близким к среднему значению его временного ряда, результаты помесечных и годовых прогнозов по большинству использованных схем оказались не хуже, чем удовлетворительные и вполне приемлемые. Некоторые из них можно оценить как весьма успешные.

Как неудачные могут быть охарактеризованы прогнозы стока выше и ниже плотины по месяцам и на 1995 г. в целом по отдельным синусоидам с наибольшей корреляцией с соответствующими рядами. Также не вполне успешным получился помесечный прогноз стока ниже плотины по повторяющейся последовательности средних месячных значений его годового цикла.

Следует отметить целесообразность применения при прогнозировании синусоид, период которых был выявлен в колебаниях стока выше и ниже плотины, поскольку их обнаружение в обоих рядах, несмотря на регулирующее влияние Капчагайской ГЭС, может быть физическим подтверждением их достоверности.

Помесечный и годовой прогнозы по сумме синусоид, чьи периоды длиной 35 и 25 мес. оказались выявленными в колебаниях стока обоих рядов, получились лучше, чем по одной ее синусоиде с наибольшей корреляцией с рядом в колебаниях стока выше плотины. Результаты прогноза по ней по месяцам оказались лучшими среди схем, использующих только синусоиды с периодами, большими 1.5 мес., а на год — самыми лучшими из всех методик. Прогноз стока ниже плотины по сумме этих синусоид оказался несколько хуже. Тем не менее его результаты по месяцам и по этой схеме можно считать вполне удовлетворительными. Их относительная ошибка меньше 0.674, и они оказались лучше, чем прогноз по повторяющейся последовательности средних месячных значений стока его годового цикла. Прогноз стока по сумме этих синусоид на год можно оценить как приемлемый, поскольку его ошибка существенно меньше допустимой ошибки прогнозирования.

Более точные и полезные для практики прогнозы стока ниже плотины могут составляться посредством корректировки прогнозов стока выше нее с учетом физико-географических факторов, определяющих сток, и сценариев его регулирования самой Капчагайской ГЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абишев И.А., Медеу А.А., Мальковский И.М., Толубаева Л.С. Водные ресурсы Казахстана и их использование: Материалы международной научно-практической конференции “Водные ресурсы Центральной Азии и их использование”. Кн. 1. Алматы: Нурай Принт Сервис, 2016. С. 9–18.

2. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 419 с.
3. Бабкин А.В. Усовершенствованная модель оценки периодичности изменений уровня и элементов водного баланса Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 2005. № 11. С. 63–73.
4. Бабкин А.В. Методика прогноза уровня воды Ладожского озера с большой заблаговременностью // Метеорология и гидрология. 2007. № 6. С. 73–83.
5. Бабкин А.В., Семейкин Н.И. Многолетние колебания и долгосрочное прогнозирование годового стока р. Нева // Изв. РГО. 2014. Т. 146. № 1. С. 43–48.
6. Бабкин А.В., Бутчарт-Кульманн Д., Раинчик С.Е. Внутригодовые колебания и прогнозирование месячных значений стока рек Южноафриканского региона // Уч. записки Рос. гос. гидрометеорол. ун-та. 2017. № 47. С. 25–34.
7. Достай Ж.Д. Управление гидроэкосистемой бассейна озера Балкаш. Алматы: Print-S, 2009. 236 с.
8. Достай Ж.Д., Турсунова А.А. Проблемы казахско-китайских межгосударственных водных отношений: оценка состояния и пути решения // Днепрпетровский науч. вестн. 2010. № 1. С. 40–50.
9. Кузьмин В.А., Гаврилов И.С., Еремина С.В., Шеманев К.В. Оценка влияния антропогенных и климатических изменений на формирование стока // Уч. записки Рос. гос. гидрометеорол. ун-та. 2013. № 29. С. 36–42.
10. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962. 350 с.
11. Медеу А.А., Мальковский И.М., Толеубаева Л.С., Алимкулов С.К. Водная безопасность Республики Казахстан: проблемы устойчивого водообеспечения. Алматы: Нурай Принт Сервис, 2015. 582 с.
12. Фролов А.В., Георгиевский В.Ю. Изменения водных ресурсов в условиях потепления климата и их влияние на приток к крупным водохранилищам России // Метеорология и гидрология. 2018. Т. 43. № 6. С. 390–396.
13. Madibekov A.S., Babkin A.V., Musakulkyzy A., Cherednichenko A.V. Latent fluctuation periods and long-term forecasting of Markakol Lake level // IOP Conf. Series: Earth and Environ. Sci. 2017. V. 107. № 1. P. 012035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/107/1/012035>

Regularities of Monthly Variations of the Ili River Runoff and Its Forecasting

A. V. Babkin^{1,2,#}, V. I. Babkin^{2,##}, A. S. Madibekov^{3,###},
A. Mussakulkyzy³, and A. V. Cherednichenko^{4,####}

¹Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

²State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

³Institute of Geography, Almaty, Kazakhstan

⁴Scientific Research Institute of Biology And Biotechnology Problems of the Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

[#]e-mail: Abav@mail.ru

^{##}e-mail: Vladimir-babkin@mail.ru

^{###}e-mail: Madibekov@mail.ru

^{####}e-mail: Geliograf@mail.ru

Analysis of fluctuations in the time series of Ili River runoff monthly values for 1971–1994 was carried out using the method of “Periodicities” on the posts located 164 km upper and 37 km lower Kapchagayskaya Dam. The analysis revealed in fluctuations of each of them nine harmonics with the periods’ length larger than 1.5 years. The revealed sinusoids and repeating successions of runoff annual cycle’s mean monthly values were applied in different runoff prediction schemes for months and totally for 1995. Training forecasts’ results were estimated by the new independent data. Runoff regulation by the reservoir causes some reduction of its mean value, smoothing and losing its annual cycle rhythm. Long term periods are revealed more distinctly in the runoff variation lower the dam. In spite Kapchagayskaya Dam influence the harmonics with the same periods of 25 and 35 months were revealed in both time series among other sinusoids. Possibly they are more reliable, and it is more expedient to apply them for future runoff estimation comparing with sinusoids whose periods were proved only in one of time series. The Ili River runoff in 1995 upper the dam was extreme small. Lower the dam the runoff was close to the mean value of its time series. By the majority of applied predictions’ schemes results for the runoff upper the dam were better its estimations for future by the mean value of time series. Forecast’s mistake lower the dam was smaller than its acceptable value. Therefore, the forecasts computed by these schemes for months and for the annum at total could be estimated as satisfactory and quite acceptable.

Keywords: river runoff, Kapchagayskaya Dam, hidden harmonics, forecast

REFERENCES

1. Abishev I.A., Medeu A.A., Mal'kovskii I.M., Toleubaeva L.S. Water resources of Kazakhstan and their use. In *Materialy mezhd. nauchn.-prakticheskoi konf. "Vodnye resursy tsentral'noi Azii i ikh ispol'zovanie"* [Proc. Int. Sci.-Appl. Conf. "Water Resources of Central Asia and their Use"]. Almaty: Nurai Print Servis Publ., 2016, vol. 1, pp. 9–18. (In Russ.).
2. Apollov B.A., Kalinin G.P., Komarov V.D. *Kurs gidrologicheskikh prognozov* [Manual for Hydrological Forecasting]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1974. 419 p.
3. Babkin A.V. An improved model of assessment of periodic changes in Caspian Sea level and water balance components. *Meteorologiya i Gidrologiya*, 2005, no. 11, pp. 63–73. (In Russ.).
4. Babkin A.V. Forecast of the level of Ladoga Lake with large lead time. *Meteorologiya i Gidrologiya*, 2007, no. 6, pp. 73–83. (In Russ.).
5. Babkin A.V., Semeikin N.I. Long-term variations and long-range forecast of the runoff of the Neva River. *Izv. Russ. Geogr. O—va*, 2014, vol. 146, no. 1, pp. 43–48. (In Russ.).
6. Babkin A.V., Butchart-Kuhlmann D., Rainchik S.E. Intra-annual variations and forecasting of southern African river runoff. *Uch. Zap. Ross. Gos. Gidrometeorol. Univ.*, 2017, no. 47, pp. 25–34. (In Russ.).
7. Dostai Zh.D. *Upravlenie gidroekosistemoi basseina ozera Balkash* [Management of Hydrological and Ecological Systems of the Basin of Balkhash Lake]. Almaty: Print-S Publ., 2009. 236 p.
8. Dostai Zh.D., Tursunova A.A. Problems of the Kazakh-Chinese water relations: assessment of the state and solutions. *Dnepropetrovskii Nauchn. Vestn.*, 2010, no. 1, pp. 40–50. (In Russ.).
9. Kuz'min V.A., Gavrilov I.S., Eremina S.V., Shemanaev K.V. Assessing the climatic and anthropogenic impacts on runoff generation. *Uch. Zap. Ross. Gos. Gidrometeorol. Univ.*, 2013, no. 29, pp. 36–42. (In Russ.).
10. Linnik Yu.V. *Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoi teorii obrabotki nablyudenii* [Method of the Least Squares and the bases of theory of mathematical and statistical processing of data of observations]. Moscow: Fizmatlit Publ., 1962. 350 p.
11. Medeu A.A., Malkovskii I.M., Toleubaeva L.S., Alimkulov S.K. *Vodnaya bezopasnost' Respubliki Kazakhstan: problemy ustoychivogo vodoobespecheniya* [Water Security of the Republic of Kazakhstan: Problems of Sustainable Water Supply]. Almaty: Nurai Print Servis Publ., 2015. 582 p.
12. Frolov A.V., Georgiyevskii V.Y. Changes in water resources under conditions of climate warming and their impact on water inflow to Russian large reservoirs. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, no. 6, pp. 390–396.
13. Madibekov A.S., Babkin A.V., Musakulkyzy A., Cherednichenko A.V. Latent fluctuation periods and long-term forecasting of Markakol Lake level. In *IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci.*, 2017, vol. 107, no. 1, pp. 012035. doi: 10.1088/1755-1315/107/1/012035