

УДК 556.162.06(282.26)«44»

А.В. Бабкин, Д. Бутчарт-Кульманн, С.Е. Раинчик

**ВНУТРИГОДОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
МЕСЯЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ СТОКА РЕК
ЮЖНОАФРИКАНСКОГО РЕГИОНА**

Российский государственный гидрометеорологический университет, abav@mail.ru

A.V. Babkin, D. Butchart-Kuhlmann, S.E. Rainchik

**INTRA-ANNUAL VARIATIONS AND FORECASTING
OF SOUTHERN AFRICAN RIVER RUNOFF**

Данная статья посвящена анализу месячных значений стока шести речных бассейнов юга Африки. Выявлены периоды в его колебаниях длиной 12 и 6 месяцев. Проведены расчеты поверочных прогнозов стока с заблаговременностью 24 месяца. Их результаты оценены на новом независимом материале. Результаты исследования будут учтены при дальнейшем развитии программного комплекса «Система интегрального землепользования» (ILMS) института географии университета Фридриха Шиллера в Йене, а также использованы в учебном процессе РГГМУ.

Ключевые слова: речной сток, периодичности, годовой и полугодовой циклы, юг Африки.

The article is dedicated to the analysis of monthly values of runoff in six river basins in the region of southern Africa. The periods of its variations of 12 and 6 months were revealed. The training forecasts of runoff with the lead time of 24 months were computed. Its results were tested by the new independent data. The results of the research will be taken into the consideration for the development of the Integrated Land Management System (ILMS) software package of the Institute for Geography, Friedrich Schiller University, Jena, and applied in the educational process of RSHU.

Keywords: river runoff, periodicities, annual and half annual cycles, south of Africa.

Введение

Большая часть территории Южной Африки расположена в области засушливого климата. Водные ресурсы здесь существенно изменяются как от года к году в ходе их многолетних колебаний, так и по месяцам в их динамике годового цикла. Периоды засух, когда сток небольших рек практически отсутствует, сменяются дождливыми сезонами, во время которых формирующиеся воды наполняют русла рек и котловины озер. Согласно прогнозу Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC), к середине XXI в. засушливые условия в этом регионе могут стать для местного населения еще менее благоприятными [8].

Колебания речного стока влияют на многие отрасли современного производства, связанные с использованием водных ресурсов, включая сельское хозяйство, водный транспорт, туризм, а также промышленное и коммунальное водопотребление [5]. Поэтому для социально-экономического развития этого региона весьма актуален анализ структуры колебаний его речного стока, который может улучшить результаты его прогнозирования на будущее.

Целью данного исследования является анализ и моделирование месячных значений стока шести речных бассейнов юга Африки, выявление в них объективно существующих периодов колебаний (гармоник), а также использование полученных закономерностей для его долгосрочного прогнозирования и оценки результатов прогнозов на новом независимом материале.

В настоящее время внутригодовые колебания стока рек Южной Африки (и других регионов Земного шара) обычно представляются в виде одного периода за 12-месячный интервал, который отличается от синусоидальной функции вследствие влияния климатических факторов и местных условий формирования стока. В данной работе внутригодовые колебания стока рек Южной Африки представлены, по существу, комбинацией двух гармоник с периодами 6 и 12 месяцев.

Результаты прогнозов оценены с использованием двух основных критериев, принятых в практике долгосрочных гидрологических прогнозов.

Принципы оценки результатов долгосрочного прогнозирования речного стока

Прогноз речного стока на месяц можно считать оправдавшимся, если разность между его предсказанным и фактическим значениями не больше допустимой ошибки прогноза Δ , равной 0,674 от среднего квадратического отклонения его временного ряда σ [1]. Прогноз на временном интервале оценивается посредством числа оправдавшихся месячных прогнозов. При оценке результатов прогнозирования используется также их относительная ошибка.

Чем больше число оправдавшихся прогнозов и меньше их относительная ошибка, тем лучше результаты прогнозирования на заданном временном интервале. Успешный долгосрочный прогноз речного стока должен быть не хуже его предсказания по среднему значению временного ряда.

Временные ряды стока рек Южной Африки

Непрерывные ряды месячных значений стока рек Южной Африки были получены из информационной системы Научного пользовательского центра по изменению климата и адаптивному землепользованию юга Африки (SASSCAL-IS; <http://leutra.geogr.uni-jena.de/sasscalRBIS>). Эта информационная система содержит базу данных о компонентах природной среды Южной Африки и пакет программ «Система интегрального землепользования» (ILMS) для анализа, моделирования и описания местных природных процессов [6, 7].

Для анализа, моделирования и поверочного прогнозирования стока рек были отобраны их наиболее длинные ряды из SASSCAL-IS. Они представляют информацию по колебаниям стока в двух различных речных бассейнах: бассейна реки Берг в Западно-Капской провинции ЮАР и бассейна реки Окаванго — трансграничного водосбора территорий Анголы, Намибии и Ботсваны.

Характеристики временных рядов представлены в табл. 1. В первом столбце таблицы каждому временному ряду стока присвоен индекс. Названия временных рядов, включая названия рек и гидростворов, представлены во втором столбце. В третьем столбце указаны идентификационные индексы временных рядов, как они обозначены в информационной системе SASSCAL-IS. Для сопоставления

и обобщения результатов прогнозов исследуемых рядов их будущие значения рассчитаны на один и тот же поверочный интервал. Анализируемые интервалы временных рядов представлены в четвертом столбце. Они завершаются 1995 годом, поскольку временной ряд стока реки Кубанго — ст. Мукве — заканчивается раньше других, в середине 1998 г. Интервал поверочного прогноза 1996–1997 гг. обеспечивает наибольшую продолжительность анализируемых временных рядов.

В последних трех столбцах табл. 1 приведены данные о средних за анализируемый интервал значениях речного стока Q_m , его средних квадратических отклонениях σ и допустимых ошибках прогнозов Δ . Самые большие величины среднего значения, среднего квадратического отклонения и допустимой ошибки прогноза оказались у реки Кубанго — ст. Мукве. Указанные характеристики реки Окаванго — ст. Рунду — меньше, чем у реки Кубанго.

Таблица 1

Сведения о характеристиках стока рек в гидрологических створах Южной Африки

№ п/п	Река — створ	Идентификатор SASSCAL-IS	Анализируемый интервал	Q_m , м ³ /с	σ , м ³ /с	Δ , м ³ /с
1	Берг — ст. Бергривершок	G1H004	07.1954–12.1995	6,03	8,53	5,75
2	Кубанго — ст. Мукве	627599	10.1949–12.1995	309,6	178,4	120,3
3	Франсхук — ст. Ле Муиле	G1H003	03.1957–12.1995	0,703	0,914	0,616
4	Окаванго — ст. Рунду	680180	10.1945–12.1995	168,0	156,6	105,6
5	Малый Берг — ст. Нейуклуф	G1H066	07.1951–12.1995	0,919	1,426	0,961
6	Войвлей Дам Канал — ст. Вогел Валлидж	G1H065	11.1951–12.1995	0,751	0,824	0,556

Среднее значение стока реки Берг в створе Бергривершок, его среднее квадратическое отклонение и допустимая ошибка прогноза значительно меньше этих характеристик для рек Кубанго и Окаванго. Средние значения, средние квадратические отклонения и допустимые ошибки прогноза стока рек Франсхук — ст. Ле Муиле, Малый Берг — ст. Нейуклуф и Войвлей Дам Канал — ст. Вогел Валлидж меньше по сравнению с рекой Берг — ст. Бергривершок. Наименьшее среднее значение стока было получено для реки Франсхук, а наибольшее из этих трех временных рядов — для реки Малый Берг. Среднее квадратическое отклонение и допустимая ошибка прогноза наименьшие для реки Войвлей Дам Канал, а наибольшие — для реки Малый Берг.

Методы исследований

Сток шести речных бассейнов юга Африки проанализирован методом «Периодичностей» [2, 4]. Этот метод основан на аппроксимации временных рядов синусоидальными функциями последовательно с пошаговым изменением периода. Амплитуда и фаза аппроксимирующей синусоиды, и дополнительная константа, около которой она колеблется, рассчитываются методом наименьших квадратов [2, 3].

Использование метода наименьших квадратов способствует выявлению действительно существующих периодов в колебаниях природных процессов, связанных с закономерностями их развития, в отличие от гармонического анализа

Дж. Фурье, рассматривающего лишь периоды, пропорциональные длине ряда. Поэтому, если периоды временного ряда не пропорциональны его длине, по методу Дж. Фурье они могут быть определены со значительными ошибками.

Сумма квадратов разностей наилучшей аппроксимирующей синусоиды и значений временного ряда рассчитывается для каждого периода. В зависимости от периода аппроксимации у определенных его значений могут отмечаться минимумы этой суммы, которые свидетельствуют о признаках наличия периодичностей [2].

Надежные гармоники, которые могут быть использованы для прогнозирования стока, должны быть с периодами, выявленными не у одного ряда, а в значительном числе временных рядов анализируемой группы. Их синусоиды также должны характеризоваться высокой корреляцией с анализируемыми рядами стока. В настоящей работе для прогнозов использовались синусоиды с наибольшей корреляцией с анализируемыми рядами с периодами, выявленными во всех рядах стока.

Выявленные периодичности надежны, если при их последовательном сложении корреляция их суммы и временного ряда стока соответственно увеличивается. Сумма синусоид не должна использоваться при прогнозировании, если ее корреляция с временным рядом ниже, чем какой-либо синусоиды из ее составляющих.

В дополнение к прогнозированию по синусоидам и их суммам речной сток на будущее определялся также по методу среднего многолетнего значения за месячные интервалы времени для выявленных методом «Периодичностей» периодов. Последовательность значений стока за месячные интервалы времени, осредненных по циклам, выявленным методом «Периодичностей», отражает индивидуальные особенности соответствующего временного ряда.

Результаты анализа временных рядов

В результате проведенных исследований были рассчитаны параметры наилучших аппроксимирующих синусоид шести рядов стока рек Южной Африки. Минимумы сумм квадратов разностей стока рек Кубанго и Окованго с аппроксимирующими их синусоидами выявлены для одинаковых периодов, длиной 4, 6, 8, 12, 18 и 23 месяца. Кроме того, рассматриваемые минимумы для стока р. Кубанго установлены также для периодов, длиной 15 и 20 месяцев, а для р. Окованго — для 10-, 14- и 21-месячных периодов.

Периоды с минимумами сумм квадратов разностей значений временных рядов и синусоид их аппроксимации представлены в табл. 2. Верхняя строка указывает здесь периоды аппроксимации, а первый столбец — реки со створами, обозначенные теми же индексами, что и табл. 1. Периоды, у которых установлен минимум значения сумм квадратов разностей временного ряда и его аппроксимации, отмечены знаком плюс.

Из табл. 2 видно, что периоды длиной 6 и 12 месяцев были выявлены во всех временных рядах. Периоды, длиной 4 месяца и 23 месяца, были выявлены 4 раза, а 18- и 21-месячные периоды — три раза. Таким образом, только 6- и 12-месячные периоды оказались выявленными во всех шести временных рядах. Корреляция их синусоид с соответствующими временными рядами, особенно 12-месячной, выше, чем корреляция с этими рядами синусоид с любыми другими установленными

В предпоследней и последней строках табл. 3 приведены суммы и доли от 1 оправдавшихся прогнозов по всем рассматриваемым рядам для каждой схемы прогноза. Суммы и средние значения относительных ошибок прогнозирования представлены в нижних строках табл. 4. Видно, что результаты прогнозирования от схемы I к схеме IV последовательно улучшаются: количество оправдавшихся прогнозов увеличивается, а их средняя относительная ошибка уменьшается. Результаты прогнозов, рассчитанные по синусоиде с периодом 6 месяцев, оказались лучше, чем по средним значениям временных рядов, а по синусоиде с 12-месячным периодом — лучше, чем по 6-месячной гармонике. Прогнозы по сумме синусоид с периодами 6 и 12 месяцев получились лучше, чем по каждой отдельной ее синусоиде.

Таблица 4

Относительная ошибка прогнозов стока рек юга Африки

Река — створ	I	II	III	IV	V	VI
1	0,471	0,453	0,462	0,445	0,445	0,426
2	0,844	0,828	0,773	0,756	0,827	0,750
3	0,813	0,794	0,518	0,487	0,788	0,463
4	0,662	0,646	0,602	0,585	0,644	0,576
5	0,791	0,729	0,606	0,523	0,729	0,515
6	0,738	0,736	0,659	0,658	0,723	0,674
Итого	4,318	4,187	3,620	3,453	4,156	3,404
Среднее	0,720	0,698	0,603	0,576	0,693	0,567

Прогнозы стока, рассчитанные по повторяющейся последовательности его значений 6-месячного цикла, оказались лучше, чем по синусоиде с этим периодом. Самые лучшие прогнозы получены по повторяющейся последовательности средних месячных значений годового цикла.

На рис. 1 представлены заключительный отрезок временного ряда стока реки Кубанго, последовательности месячных значений стока, осредненных за годовой и полугодовой периоды, и разность этих последовательностей. Корреляция временного ряда и повторяющейся последовательности среднемесячных значений годового периода равна 0,80, а его корреляция с последовательностью значений полугодического периода — 0,20. Корреляция разности этих последовательностей и значений временного ряда равна 0,77.

Видно, что кривая месячных значений стока полугодического цикла и кривая ее вычитания из повторяющейся последовательности месячных значений стока годового периода похожи на синусоиды. Корреляция повторяющейся последовательности значений стока, осредненных за месячные интервалы времени полугодического периода, и ее наилучшей аппроксимирующей синусоиды составила 0,98. Корреляция между разностью последовательностей месячных значений стока его годового и полугодического периодов и наилучшей синусоидой ее аппроксимации равна 0,99.

На рис. 2 нанесены значения ошибок поверочного прогноза стока реки Кубанго, рассчитанного по повторяющейся последовательности среднемесячных

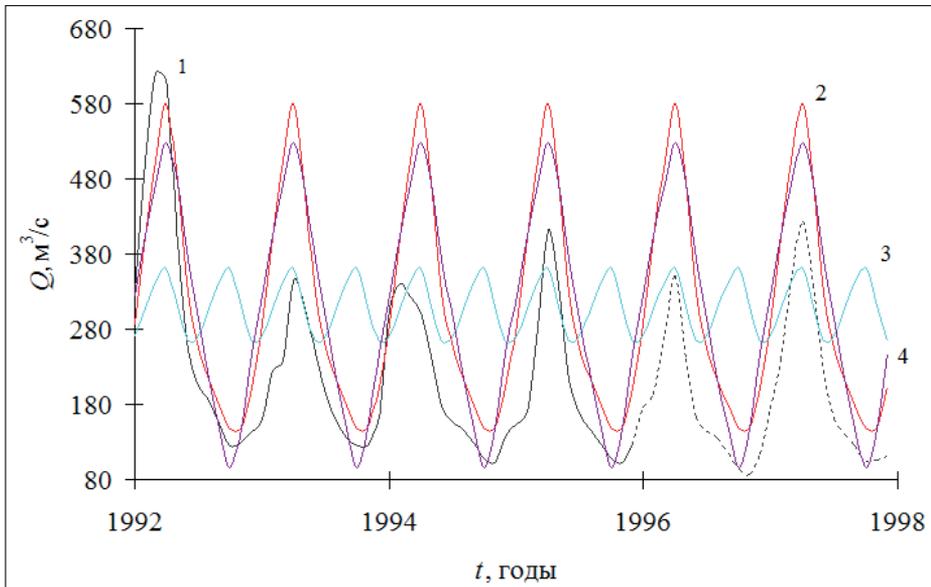


Рис. 1. Месячные колебания стока реки Кубанго — ст. Мукве: 1 — значения временных рядов (пунктирная линия — интервал поверочного прогноза 1996–1997 гг.); 2 — среднемесячные значения стока годового цикла; 3 — месячные значения стока, осредненные за полугодовой период; 4 — разность кривых 2 и 3 (прибавлено среднее от шести значений полугодического цикла, равное 309,5 м³/с)

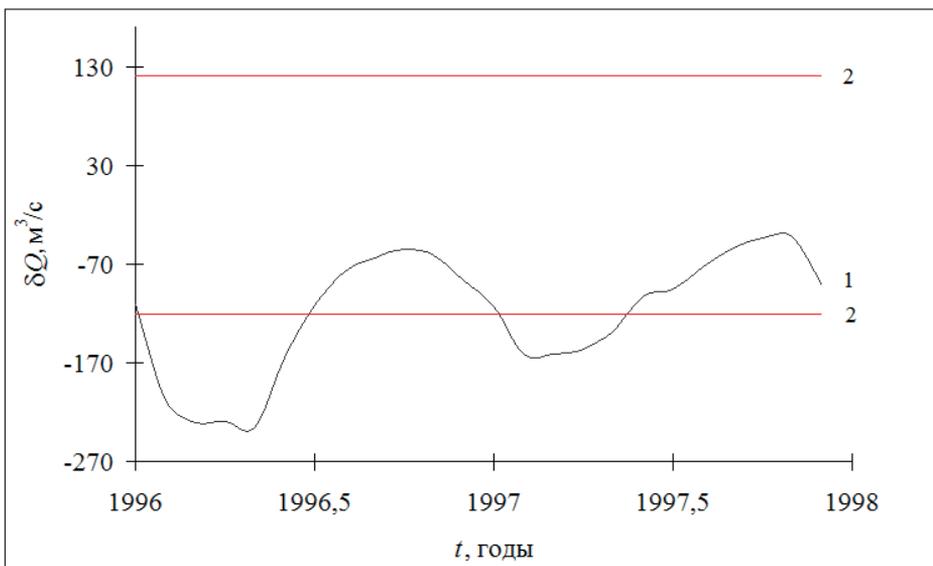


Рис. 2. Ошибка прогноза стока реки Кубанго — ст. Мукве: 1 — разность между фактическим стоком и повторяющейся последовательностью его среднемесячных значений годового цикла; 2 — границы допустимой ошибки прогнозирования

значений его годового цикла, а также границы допустимой ошибки прогнозирования. Видно, что наибольшие ошибки прогнозов получились за весенние месяцы, когда значения стока в его годовом ходе самые большие.

Прогнозы не оправдались с февраля по июнь 1996 г. и с февраля по май 1997 г. Низкие результаты прогнозов за весенние месяцы объясняются тем, что 1996 и 1997 гг. в стоке реки Кубанго оказались весьма маловодными. Среднее значение стока на поверочном интервале — $190,8 \text{ м}^3/\text{с}$ существенно ниже его значения анализируемого ряда. Прогностические выражения, составленные на основе анализа ряда с высокими его значениями, привели к завышенным прогнозным оценкам.

Обсуждение результатов

Колебания стока рек юга Африки представлены суммой гармоник с периодами 6 и 12 месяцев. Эти гармоники были выявлены при анализе временных рядов стока методом «Периодичностей», а также было установлено, что повторяющаяся последовательность месячных значений стока, осредненных за полугодовой интервал времени, близка к синусоиде. Разность между повторяющимися последовательностями значений стока за месячные интервалы времени годового и полугодового периодов весьма близка к гармонике.

Тем не менее, несмотря на высокую корреляцию с синусоидой, повторяющаяся последовательность месячных значений стока, осредненных за полугодовой цикл, и разность с ней последовательности месячных значений стока годового цикла, не вполне являются гармониками. Они лучше отражают индивидуальные особенности колебаний временного ряда и их корреляция с ним выше, чем у стандартных синусоид.

Синусоиды с периодами 12 и 6 месяцев проходят свои максимальные значения примерно в то же самое время (максимумы 6-месячных гармоник опережают максимумы 12-месячных на несколько дней), и минимумы 12-месячной синусоиды по времени приходятся на следующие максимумы 6-месячной. Сумма максимумов этих синусоид отражает важную особенность временного ряда — узкие, вытянутые пики высоких значений стока, сумма минимума синусоиды с периодом 12 месяцев и максимума 6-месячной гармоники хорошо описывают широкий интервал времени низких значений стока. Так как максимум 6-месячной синусоиды наступает незадолго до минимума 12-месячной, их сложение описывает более медленное уменьшение стока с июня по октябрь (у рек Кубанго и Окаванго) и более резкий его рост в последующие месяцы.

Результаты прогнозов, рассчитанные по синусоидам с периодами 6 и 12 месяцев, по их сумме и по последовательностям месячных значений стока, осредненных за годовой и полугодовой периоды, оказались лучше, чем по среднему значению. Самые лучшие результаты прогнозирования по всем временным рядам стока и всем рассмотренным схемам были получены по повторяющейся последовательности среднемесячных значений стока его годового периода. Результаты прогнозов по последовательности значений стока за месячные интервалы времени, осредненных за полугодовой период, оказались лучше, чем по синусоиде с 6-месячным периодом, поскольку эта последовательность лучше воспроизводит особенности колебаний стока по сравнению с обычной синусоидой.

Таким образом, внутригодовые колебания стока на юге Африки хорошо описываются с использованием гармоник с периодами 6 и 12 месяцев. Период, продолжительностью 12 месяцев, является календарным астрономическим периодом. Цикл, продолжительностью 6 месяцев, гипотетически может быть связан с сезонными сдвигами поясов высокого и низкого атмосферного давления. Так, пояса низкого давления, приближение которых обуславливает увеличение атмосферных осадков, сдвигаются по направлению региона Южной Африки зимой и летом от экватора и регионов умеренного климата соответственно. Поскольку движение поясов атмосферного давления глобально, можно предположить, что 6-месячный цикл может быть выявлен в колебаниях стока рек в различных районах мира.

Наличие 6-месячного цикла в колебаниях стока может быть связано и с движением только одного пояса низкого давления, если изменение его широты описывать формулой в виде дроби, включающей синусоиду с периодом 12 месяцев в знаменателе. Такая функция должна описывать увеличение осадков при приближении пояса низкого давления. Расчеты по ней отразят узкие вытянутые пики высоких значений стока и более длинные интервалы его пониженных значений. Они будут близки к сумме синусоид с периодами 6 и 12 месяцев.

Заключение

Анализ шести временных рядов месячных значений стока рек Южной Африки выявил присутствие в них гармоник с периодами 12 и 6 месяцев. Близость по времени максимумов этих синусоид точно воспроизводит узкие вытянутые пики высоких значений годовых колебаний стока, а совпадение по времени минимумов 12-месячной гармоник и максимумов 6-месячной — более длинный интервал его низких значений. Так как экстремум 6-месячной гармоник несколько опережает соответствующий экстремум 12-месячной, понижение стока к его минимуму более пологое, чем его рост к пику.

Присутствие 6-месячной гармоник, выявленной методом «Периодичностей», по существу, подтверждается близкой к синусоиде повторяющейся последовательностью значений стока за месячные интервалы времени, осредненных за полугодовой период. Разность последовательностей месячных значений стока, осредненных, соответственно, за годовой и полугодовой интервалы времени, весьма схожа с синусоидой с периодом 12 месяцев.

Из всех использованных схем прогнозирования стока самые лучшие результаты получены по повторяющейся последовательности месячных значений его внутригодового хода. За этой схемой, в порядке ухудшения результатов, следуют прогнозы по сумме гармоник с периодами 12 и 6 месяцев, по синусоиде — с периодом 12 месяцев, по последовательности осредненных за полугодовой интервал значений стока за месячные интервалы времени, по синусоиде, с периодом 6 месяцев. Самые плохие результаты прогнозирования оказались по средним значениям временных рядов.

В последующем предполагается для анализа и прогнозирования стока рек Южной Африки использовать и другие методы.

Исследование выполнено в рамках программы обмена аспирантами Российского государственного гидрометеорологического университета при поддержке стипендией Eranet-Plus. Грант присужден Даниелю Бутчарту-Кульманну на 10 месяцев (сентябрь 2015 — июнь 2016, соглашение по гранту Nr. 2012-2734/001-001-ЕМА2).

Литература

1. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. — Л.: Гидрометеоздат, 1974. — 419 с.
2. Бабкин А.В. Усовершенствованная модель оценки периодичности изменений уровня и элементов водного баланса Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 2005. № 11. — С. 63–73.
3. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов. — М.: Наука, 1962. — 350 с.
4. Babkin A.V. Butchart-Kuhlmann D., Göhmann H., Meinhardt M. Hidden periodicities and long range prediction of river runoff in Northern and Western Europe // Materials of scientific seminar of Fellowship holders “Mikhail Lomonosov III” and “Immanuel Kant III” of 2014/2015. — Published by the Moscow Office of DAAD, 2015, 24–27.
5. Conway D., Archer van Garderen E., Deryng D., Dorling S., Krueger T., Landman W., Lankford B., Lebek K., Osborn T., Ringer C., Thurlow J., Zhu T. and Dalin C., 2015. Climate and southern Africa’s water-energy-food nexus. In *Nature Climate Change*, 5 (9). PP. 837–846.
6. Steudel T., Göhmann H., Flügel W.-A., Helmschrot J., 2013. Assessment of hydrological dynamics in the upper Okavango River Basins. In *Biodiversity & Ecology* 5: 247–261. DOI: 10.7809/b-e.00279.
7. Zander F., Kralisch S., Busch C., Flügel W.-A. (2011). RBIS — An Environmental Information System for Integrated Landscape Management // Environmental Software Systems. Frameworks of eEnvironment IFIP Advances in Information and Communication Technology (J. Hrebicek, G. Schimak & R. Denzer, eds.). Vol. 359, 349–356. Springer Boston. dx.doi.org/10.1007/978-3-642-22285-6_38.
8. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007. Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/ch9s9-4-1.html