

Межгодовая изменчивость водообмена между Азовским морем и заливом Сиваш через пролив Тонкий

Е. С. Ерёмина^{1, *}, В. П. Евстигнеев^{2, 3}

¹ Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

² Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

³ Севастопольский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды,
Севастополь, Россия

*E-mail: shchurova88@gmail.com

Поступила в редакцию 13.04.2020 г., после доработки – 02.06.2020 г.

Цель. Целью настоящей работы стало изучение внутри- и межгодовой изменчивости составляющих водообмена между заливом Сиваш и Азовским морем через пролив Тонкий в современный климатический период на основе эмпирических схем пересчета с использованием данных гидрометеорологических наблюдений на близлежащих станциях.

Методы и результаты. На основе данных наблюдений за уровнем моря, направлением и скоростью ветра рассчитаны стоки азовских и сивашских вод в проливе Тонком за 1966–2013 гг. по двум методикам: Ю. Г. Слатинского (1969) и Л. Г. Раскина (1992). Установлено преобладание азовских течений над сивашскими по объему стоков, приводятся сезонная и многолетняя динамика стоков в проливе по среднемесячным и среднегодовым данным, данные об изменчивости ветрового режима в районе Генческа и уровне моря на станциях МГ Генческ и МГП Чонгарский мост.

Выводы. Расчеты показали, что среднегодовой приток азовских вод через пролив варьирует в широких пределах от 0,3 до 1,18 км³, отток сивашских вод в среднем за год составляет 0,26 км³. Разница между притоком и оттоком вод в проливе характеризуется высокой межгодовой изменчивостью, и в среднем за весь исследуемый период она составила 0,45 км³. В спектре составляющих водообмена между Сивашом и Азовским морем выделяются колебания с периодом ~ 4 года для оттока сивашских вод из залива, а для притока азовских вод в Сиваш – с периодами 3 года и 5–6 лет. Многолетняя изменчивость оттока сивашских вод с периодом 4 года обусловлена изменчивостью количества осадков над заливом Сиваш с тем же периодом.

Ключевые слова: водный баланс, водообмен, уровень моря, пролив Тонкий, Сиваш, Азовское море.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по темам № 0827-2019-0004 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей». Работа В. П. Евстигнеева поддержана фондом РФФИ в рамках проекта № 19-05-00803.

Для цитирования: Ерёмина Е. С., Евстигнеев В. П. Межгодовая изменчивость водообмена между Азовским морем и заливом Сиваш через пролив Тонкий // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 5. С. 532–544. doi:10.22449/0233-7584-2020-5-532-544

Inter-Annual Variability of Water Exchange between the Azov Sea and the Sivash Bay through the Tonky Strait

E. S. Eremina^{1, *}, V. P. Evstigneev^{2, 3}

¹ Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

² Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

³ Sevastopol Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Sevastopol, Russia

*e-mail: shchurova88@gmail.com

Purpose. The work is aimed at studying the components' intra- and inter-annual variability in the water exchange between the Sivash Bay and the Sea of Azov through the Tonky Strait at the current climatic period based on the empirical conversion schemes and using the hydrometeorological observation data obtained at the nearby stations.

Methods and Results. Using the data on the sea level, and the wind direction and speed, the runoffs of the Azov Sea and the Sivash Bay waters in the Tonky Strait during 1966–2013 are calculated by two methods developed by Slatinsky Yu.G. in 1969 and Raskin L.G. in 1992. Predominance of the Azov currents over the Sivash ones is revealed. Seasonal and long-term dynamics of the runoff values in the strait are given based on the monthly average and annual average data. The data on the wind regime variability in the Genicheskiy region, and the sea level at the Genicheskiy meteorological station and at the Chongarskiy bridge meteorological post are cited.

Conclusions. The calculations show that the average annual inflow of the Azov waters through the Tonky Strait varies within the wide range $0.3 \text{ km}^3 - 1.18 \text{ km}^3$, and the outflow of the Sivash waters constitutes on average 0.26 km^3 per year. Difference between the water inflow and outflow in the strait is characterized by high inter-annual variability. Over the whole period under study, it amounted on average up to 0.45 km^3 . In the components' spectrum of water exchange between the Sivash Bay and the Azov Sea, distinguished are the ~4 year fluctuations of the Sivash waters outflow from the bay, and the 3 and 5–6 year fluctuations of the Azov Sea waters inflow to the Sivash Bay. Multi-year variability of the Sivash water outflow with the 4 year periodicity is conditioned by the same precipitation amount periodicity over the Sivash Bay.

Keywords: water balance, water exchange, sea level, Tonky Strait, Sivash, Sea of Azov.

Acknowledgements: the work was carried out within the framework of the state task on theme No. 0827-2019-0004 «Complex interdisciplinary studies of oceanological processes that determine functioning and evolution of ecosystems of the coastal zones of the Black and Azov seas». The investigation of V. P. Evstigneev was supported by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of project No. 19-05-00803.

For citation: Eremina, E.S. and Evstigneev, V.P., 2020. Inter-Annual Variability of Water Exchange between the Azov Sea and the Sivash Bay through the Tonky Strait. *Physical Oceanography*, [e-journal] 27(5), pp. 489-500. doi:10.22449/1573-160X-2020-5-489-500

Введение

Шельфовые зоны, устьевые области, заливы, бухты вызывают большой научный интерес у исследователей в связи с тем, что функционирующие в них экосистемы являются наиболее продуктивными и наиболее чувствительными к климатическим изменениям и антропогенному прессу [1–2]. Особый интерес представляют гидроэкологические исследования гиперсоленых водных объектов, в том числе эстуариев с ограниченным водообменом с морем [3–5]. Как правило, такой режим водных объектов формируется в аридных зонах жаркого климата [3]. Однако гиперсоленые водные объекты (озера, эстуарии, заливы) существуют и в регионах с умеренным климатом. Условия формирования высокого уровня солености в них меняются либо с сезонами,

что характерно для эстуариев Средиземного моря [6], либо на протяжении всего года вследствие ослабленного поступления распресненных вод из прилегающего моря или источников пресной воды (реки).

Именно второй тип механизма формирования гиперхалинного режима вместе с мелководностью характерен для залива лагунного типа Сиваш. Одной из приходных статей его баланса до 2014 г. было поступление дренажно-сбросных вод с полей сельскохозяйственных угодий в объеме примерно 630 млн м³ в год [7–8], обусловленное функционированием Северо-Крымского канала (СКК), построенного в 1971 г. После перекрытия СКК в 2014 г. и, как следствие, изменения режима поступления пресных вод, происходит глобальная перестройка экосистемы в Сиваше. Такая трансформация протекает на фоне естественной изменчивости основных составляющих водного баланса, одной из которых является водообмен с Азовским морем.

Акватория залива Сиваш входит в перечень водно-болотных угодий международного значения, является уникальным биотопом и отличается высоким биоразнообразием. Благодаря высокой минерализации вод Сиваша и неисчерпаемым запасам солей, регион имеет перспективы для развития химической промышленности: в 60-е гг. Южный Сиваш рассматривался как мощная сырьевая база для производства рапной окиси магния и брома. Регион Сиваша обладает и значительным бальнеологическим потенциалом: утверждены запасы йодобромных и сульфидных минеральных вод, в заливах находятся источники ценной иловой сульфидной грязи. Ресурсы залива Сиваш определяются особенным водным балансом, а изменчивость составляющих баланса влияет на устоявшееся природное равновесие.

Исследование протекающих в заливе Сиваш в современных условиях процессов, включая метаморфизацию вод залива, имеет практическое значение и представляет научный интерес. Кроме того, изменчивость водного и солевого баланса этого водоема потенциально может быть параметризована простыми математическими моделями вследствие его мелководности и полужамкнутости.

Обмен водами между заливом и морем осуществляется через пролив Генический, а также путем просачивания азовских вод через тело Арабатской Стрелки. В работе [9] приводится анализ спутниковых снимков района Восточного Сиваша, где в ряде случаев были выявлены особенности как температуры, так и оптических свойств воды вдоль Арабатской Стрелки. Причем аномалии температуры, как правило, проявлялись в виде локальных областей (направленных от берега струй), в оптическом диапазоне в этом районе наблюдаются зоны с пониженным рассеянием (мутностью). По данным А. М. Понизовского [10], поступление азовоморских вод путем фильтрации через бар незначительно: для Южного Сиваша – 7360 м³ в сутки, или 115 тыс. м³ в год.

Генический пролив в настоящее время подразделяется на два рукава – проливы Тонкий и Промойна. Через пролив Промойна водообмен до 1970 г. почти отсутствовал, в настоящее время поступление вод через него, предположительно, незначительно из-за его мелководности и особенностей морфометрического строения [11]. Однако оценить реальный водообмен в проливе невозможно, так как отсутствуют натурные данные измерений в русле.

В основном водообмен между Азовским морем и заливом Сиваш осуществляется через пролив Тонкий, длина которого около 5 км, ширина – от 70 до 180 м, глубина – до 5 м (при выходе из пролива в Сиваш глубина меньше 1 м). Динамика водообмена в проливе зависит от множества факторов: уровня Азовского моря в районе пролива, направления, скорости и продолжительности ветров, изменения уровня самого залива.

Существует немного работ по оценкам водообмена через пролив Тонкий [11–13]. В настоящее время водообмен между Сивашом и Азовским морем изучается на основе обобщения эпизодических измерений течений и расходов в проливе Тонком на разрезе у станции МГ Геническ (см., например, [11]). Результаты такого исследования могут иметь известные ограничения с точки зрения репрезентативности обобщенных гидрологических показателей для разных сезонов года. В силу условий, ограничивающих проведение гидрометрических работ в проливе (наличие льда, штормовые условия и т. п.), количество измерений от сезона к сезону распределено неравномерно. Так, по данным из работы [11], при обобщении результатов исследований за 1939–2008 гг. общее количество измерений в зимний период составило на порядок меньшую величину, чем, например, в летний и осенний сезоны.

Вопрос репрезентативности режимных оценок, полученных на основе данных только эпизодических измерений, актуален и при исследовании межгодовой изменчивости водообмена через пролив. Так, наиболее обеспеченным данными является период 1964–1981 гг., при этом с 1975 г. наблюдения в зимний сезон отсутствовали, а после 1990 г. они стали чрезвычайно малочисленны [11]. Однако режимная оценка изменений величины водообмена залива Сиваш с Азовским морем на внутри- и межгодовом масштабах должна выполняться на основе однородных рядов данных, например метеорологических, с использованием которых может осуществляться перерасчет поступления воды через пролив Тонкий.

В работах Ю. Г. Слатинского, Л. Г. Раскина [12, 13] приводятся подобные методики расчета, разработанные на основе данных параллельных гидрометрических измерений и стандартных гидрометеорологических наблюдений на станциях МГ Геническ и/или МГП Чонгарский мост.

Цель работы – изучение внутри- и межгодовой изменчивости составляющих водообмена между заливом Сиваш и Азовским морем через пролив Тонкий в современный климатический период на основе эмпирических схем пересчета с использованием данных гидрометеорологических наблюдений на близлежащих станциях.

Материалы и методы исследования

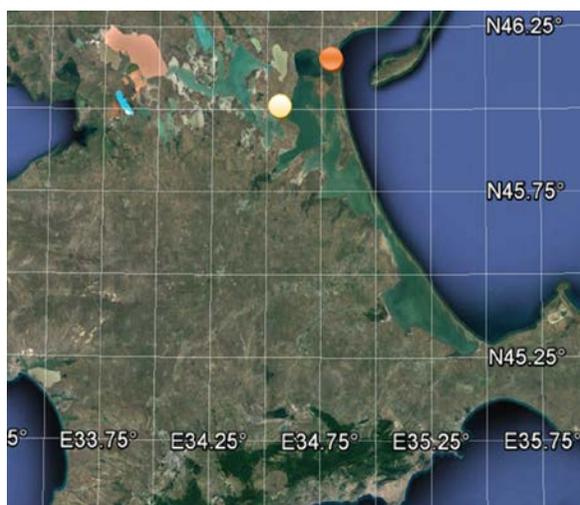
В данной работе был проведен анализ расходов воды в проливе Тонком в 1966–2013 гг., рассчитанных по данным наблюдений за уровнем моря, направлением и скоростью ветра на морских береговых станциях МГ Геническ и МГП Чонгарский мост в заливе Сиваш (рис. 1).

Расчет расходов азовских и сивашских вод через пролив Тонкий осуществлялся по двум методикам: Ю. Г. Слатинского [12] и Л. Г. Раскина [13]. Метод Ю. Г. Слатинского (МС) был разработан до начала работы СКК для расчета водообмена в проливе Тонком. Так, на основе большого количества

данных измерений, выполненных в 1961–1964 гг., была установлена зависимость направления и скоростей течений в проливе Тонком от высоты уровня стояния воды в Геническе при различных ветровых режимах. Были построены эмпирические кривые связи для разных ветровых условий:

$$Q = f(H), \quad (1)$$

где Q – расход воды через поперечное сечение пролива, м³/сек; H – высота уровня в Геническе, см. Полученные по этой методике срочные расходы воды приводятся к среднесуточному показателю и пересчитываются в объемные единицы стока. Главным недостатком методики является отсутствие параметризации влияния СКК на водообмен в проливе. Это влияние проявилось в уменьшении разности уровней Азовского моря и залива Сиваш.



Р и с. 1. Карта-схема залива Сиваш с расположением станций МГ Геническ (красный кружок) и МГП Чонгарский мост (желтый кружок)

F i g. 1. Map-scheme of the Sivash Bay showing locations of the Genichesk MS (red circle) and the Chongarsky bridge MP (yellow circle) stations

Для устранения указанного недостатка на основании данных, полученных в ходе экспедиций СОГОИНа в проливе Тонком в 1986–1988 гг. (период активной эксплуатации канала), Л. Г. Раскин разработал методику (МР), учитывающую перепад уровней между заливом Сиваш и проливом Тонким (на входе со стороны Азовского моря) [13]. На основе этой методики он изучил механизм формирования течений в проливе, установил связь между измеренной средней скоростью течения на центральной вертикали гидроствора и средней скоростью течения по всему живому сечению пролива в этом же створе. Средняя скорость течения по живому сечению пролива вычислялась как результат деления мгновенного расхода на площадь сечения гидроствора, подробнее измерения и методика описаны в работе [13]. Эмпирическое уравнение связи, полученное в результате исследований, имеет вид

$$V_{cp} = 0,014 + 0,76V_{ц}, \quad (2)$$

где V_{cp} – средняя скорость течения на гидростворе, м/с; $V_{ц}$ – средняя скорость течения на центральной вертикали, м/с.

Для расчета водообмена с учетом возможных изменений в пресной составляющей водного баланса Сиваша был проведен корреляционный анализ между скоростями течений в проливе, полученными по натурным данным, разностью уровней моря на гидрометеорологической станции МГ Геническ и на посту МГП Чонгарский мост в заливе и проекцией скорости ветра на ось пролива. В результате этого исследования Л. Г. Раскиным была получена значимая регрессионная зависимость в виде уравнения

$$V_{ц} = (1,1\Delta H + 2,53W - 1,42)10^{-2}, \quad (3)$$

где ΔH – разница уровней на МГ Геническ и на посту Чонгарский мост, см; W – проекция вектора скорости ветра на ось пролива, м/с.

С использованием уравнений (1), (2) и (3) применительно к данным наблюдений на двух пунктах, в настоящей работе были рассчитаны величина и направление водообмена в проливе Тонком за 1966–2013 гг. Величина водообмена выражена в кубических километрах. Для пересчета средней скорости течений в объем стока требуется знать площадь сечения на гидростворе, которая, в свою очередь, зависит от уровня моря в проливе. Согласно [13, с. 27], изменение площади сечения S в зависимости от изменения уровня в Геническе H можно представить в виде

$$S = 265 + 0,675(H - 470).$$

В работе дана климатологическая оценка водообмена с учетом данной зависимости, а также оценка сопутствующих условий гидрометеорологического режима, на фоне которых меняется интенсивность водообмена.

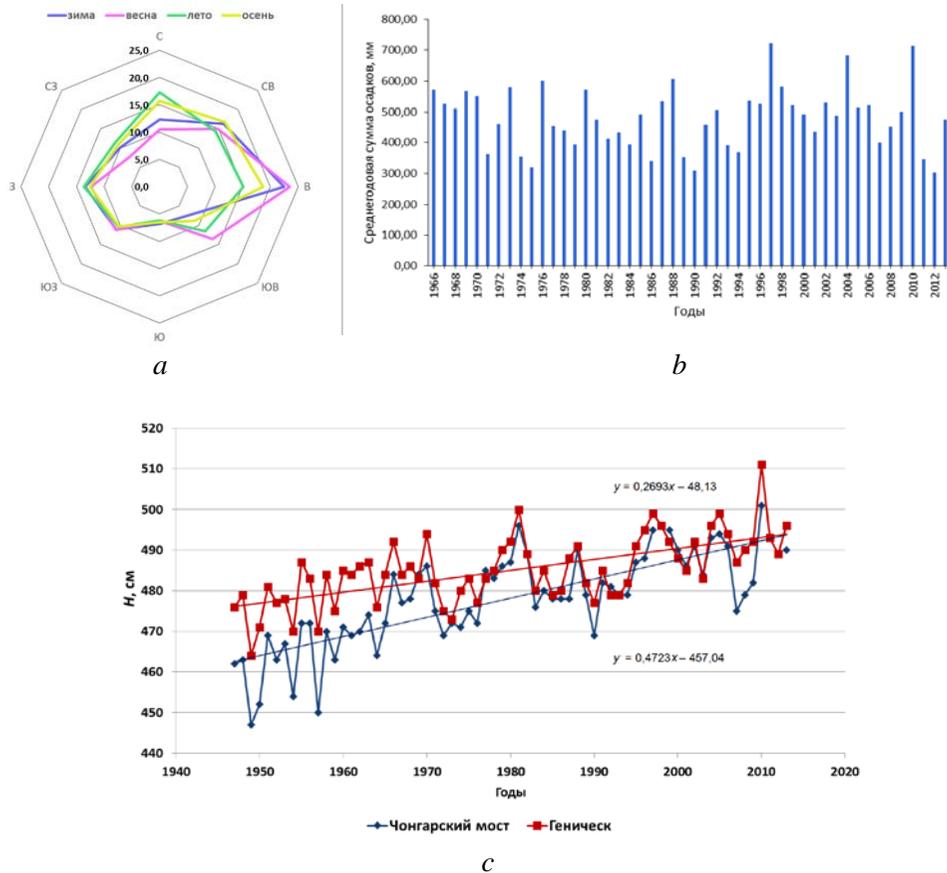
Характеристика гидрометеорологического режима в районе залива Сиваш

Азовское море расположено в южной части умеренного пояса, и его климат формируется под влиянием крупномасштабных синоптических процессов: развитие отрога Сибирского антициклона в холодный период года и Азовского антициклона летом [14]. Ветровые условия в районе залива Сиваш в общем соответствуют режиму всего Азовского бассейна. Режим характеризуется преобладанием ветров восточной четверти, особенно в холодный период (с октября по апрель). Более детальный анализ ветрового режима выполнен по данным станции Геническ за 1966–2013 гг. Согласно результатам этого анализа, общие тенденции распределения характеристик ветра следующие.

Среднегодовая повторяемость преобладающих восточных ветров составляет 20 %, западных – 13 %, летом восточные и западные ветры наблюдаются с почти одинаковой частотой – 15 и 13 % соответственно (рис. 2, а). В холодный период года восточные ветры имеют наибольшую повторяемость, которая достигает 23,5 %.

Скорость ветра в районе Геническа имеет выраженный годовой ход, максимум ветровой активности приходится на ноябрь – март, минимум – на летний сезон, когда увеличивается повторяемость штилей и слабых ветров скоростью до 5 м/с. В 1966–2013 гг. штили встречались в 15,3 % случаев в среднем

за год, повторяемость ветров скоростью до 5 м/с составляла 62,2 %, на долю умеренных ветров (6–11 м/с) суммарно приходилось 18,3 %, сильные и штормовые ветры были характерны в основном для зимних месяцев и встречались с повторяемостью 4,1 %.



Р и с. 2. Характеристика гидрометеорологического режима в районе пролива Тонкого по данным МГ Геническ и МГП Чонгарский мост за 1966–2013 гг.: сезонная повторяемость направлений ветра на МГ Геническ (а); график хода годового количества осадков над заливом Сиваш по данным [16] (b); многолетний ход среднегодовых значений уровня моря на МГ Геническ и МГП Чонгарский мост за 1947–2013 гг. (c)

Fig. 2. Hydrometeorological regime characteristic in the Tonky Strait region based on the data from the Genichesk MS and the Chongarsky bridge MP for 1966–2013: seasonal repeatability of the wind directions at the Genichesk MS (a); graph of variation of the annual precipitation amount over the Sivash Bay based on [16] (b); multi-year variation of the sea level average annual values at the Genichesk MS and the Chongarsky bridge MP for 1947–2013 (c)

В многолетнем ходе уровня на станциях побережья Азовского моря выделяют колебания с периодами 2–3 года и 25–30 лет [15]. Сезонная динамика уровня Азовского моря определяется внутригодовой изменчивостью составляющих водного баланса и ветровыми условиями. Максимумы в годовом ходе среднемесячных значений уровня моря (486–493 см на станции в Геническе) наблюдаются в марте – июне, когда сток рек максимален. С июня по ок-

тябрь уровень моря снижается вследствие сокращения атмосферных осадков, речного стока и увеличения испарения, к октябрю среднемесячные значения уровня опускаются до 471 см. С увеличением вклада составляющих баланса пресных вод – атмосферных осадков и нагонных процессов – уровень моря в Геническе увеличивается с ноября до мая.

Синоптические колебания уровня определяются стонно-нагонными процессами и характеризуются значительными амплитудами: на станции в Геническе возникают подъемы уровня, более чем на 2 м превышающие средне-многолетние значения [15].

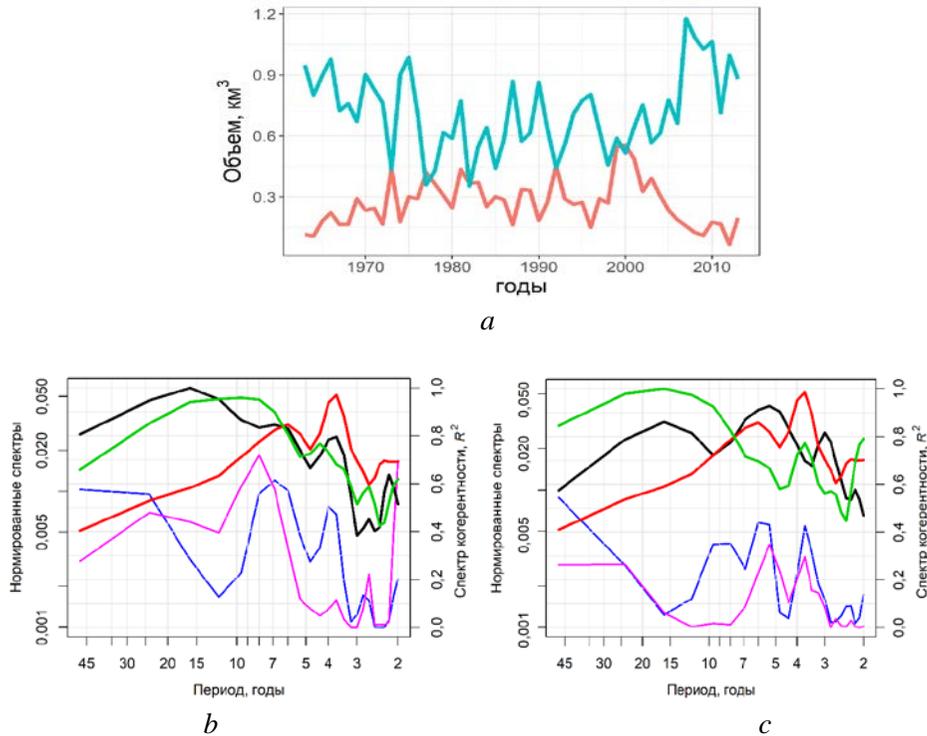
До 1969 г. разница уровней моря в заливе Сиваш и в районе Геническа была более или менее стабильная и составляла в среднем 13,5 см. С началом работы канала и поступлением больших объемов пресных вод с сельскохозяйственных угодий уровень воды на МГП Чонгарский мост значительно вырос, а перепад уровней сократился в среднем до 3,8 см. В отдельные годы уровень на МГП Чонгарский мост превышал уровень на МГ Геническ (рис. 2, *c*). В целом на обеих станциях наблюдалась тенденция к росту уровня воды.

Разница уровней моря на концах пролива Тонкого, а значит, и интенсивность водообмена между двумя бассейнами находятся в зависимости от поступления воды в залив Сиваш с атмосферными осадками. Режим осадков над заливом Сиваш в 1966–2010 гг. подробно рассмотрен в работе [16]. Объем поступающей с осадками воды имеет выраженный сезонный ход и максимален в теплое полугодие с мая по август, достигая в среднем объемов 0,14–0,18 км³/мес. Минимальные суммы осадков приходятся на холодный период года с минимумами в апреле (0,1 км³/мес) и октябре (0,09 км³/мес). Средне-многолетнее значение годового объема осадков, выпадающих на поверхность залива, составило 1,45 км³/мес [16]. За расчетный период 1966–2013 гг. их минимальное годовое количество было отмечено в 1971, 1974, 1990 и 2012 гг. Наиболее дождливыми годами оказались 1997, 2004, 2010 гг. (рис. 2, *b*). В ряду годовых сумм осадков над заливом Сиваш обнаружены колебания с характерными периодами 4 года и 6–7 лет (рис. 3, *b*). Спектральный анализ выполнен стандартным методом Даньелла [17], спектр рассчитывался с использованием спектрального окна Тьюки при эффективном числе степеней свободы 6,5. Перед проведением спектрального анализа из временного ряда предварительно удалялся полиномиальный тренд 3-го порядка.

Осадки являются важнейшей приходной составляющей залива Сиваш, влияющей на содержание пресной воды в нем и, как следствие, на превышение его уровня относительно нулевой уровневой поверхности. При сравнении графиков хода на рис. 2, *b* и *c* видно, что максимумы годовых сумм осадков над заливом Сиваш совпадают с максимумами среднего уровня моря на МГП Чонгарский мост. В спектре изменчивости уровня моря на МГП Чонгарский мост обнаруживаются спектральные пики с периодами 4 и 6–7 лет (см. рис. 3, *b*). Взаимосвязь колебаний количества осадков и уровня моря на указанных периодах характеризуется относительно высоким уровнем когерентности – 0,5 и 0,6 соответственно (см. рис. 3, *b*).

Напротив, на станции МГ Геническ, находящейся в проливе Тонком со стороны Азовского моря, такого согласования колебаний не отмечается: на рис. 3, *b* отдельный пик прослеживается на периоде колебаний 4–5 лет, однако

в основном изменчивость уровня моря в Геническом сконцентрирована на периодах в 7–20 лет. На спектре когерентности уровня моря с количеством осадков один наиболее явный пик соответствует периоду, равному 8 годам.



Р и с. 3. Характеристики водообмена через пролив Тонкий: *a* – объемный сток сивашских (красная линия) и азовских (синяя линия) вод в проливе Тонком за 1966–2013 гг.; *b* – спектры изменчивости уровня моря на МГ Геническ (зеленая линия), на МГП Чонгарский мост (черная линия) и годового количества осадков над заливом (красная линия); спектры когерентности между рядами «уровень моря на МГП Чонгарский мост – количество осадков» (синяя линия) и «уровень моря на МГ Геническ – количество осадков» (сиреневая линия); *c* – спектры изменчивости оттока сивашских вод из залива (зеленая линия), притока азовских вод в залив (черная линия) и годового количества осадков над заливом (красная линия), а также спектры когерентности «отток – осадки» (синяя линия) и «приток – осадки» (сиреневая линия)

Fig. 3. Characteristics of water exchange through the Tonky Strait: *a* – the Sivash (red line) and the Azov Sea (blue line) runoff volumes in the Tonky Strait in 1966–2013; *b* – spectra of variability of the sea level at the Genichesk MS (green line) and at the Chongarsky bridge MP (black line), and of the annual precipitation amount over the bay (red line); coherence spectra between the series “sea level at the Chongarsky bridge MP – precipitation amount” (blue line) and “sea level at the Genichesk MS – precipitation amount” (lilac line); *c* – variability spectra of the Sivash water outflow from the bay (green line), the Azov Sea water inflow to the bay (black line) and of the annual precipitation amount over the bay (red line), and also the coherence spectra “outflow – precipitation” (blue line) and “inflow – precipitation” (lilac line)

Несмотря на разные условия формирования межгодовой изменчивости уровней моря в заливе Сиваш и Азовском море, разность уровней моря в этих двух бассейнах определяет интенсивность водообмена между ними через пролив Тонкий.

Характеристика водообмена в проливе Тонком

Режим течений в проливе Тонком определяется разностью уровней моря, обуславливающей уклон уровенной поверхности в проливе в сторону Сиваша, и ветровым режимом. По данным экспедиционных наблюдений в 80-х гг., в 63 % случаях отмечались азовские течения, в 35 % – сивашские и только в 1 % случаев наблюдались смешанные течения [11, 13]. При этом, по данным из работы [12], примерно 55–57 % всех случаев азовских течений наблюдается при штиле или при слабых неустойчивых ветрах всех направлений и вызывается разницей уровней моря на концах пролива, и только 20 % связано с нагонными ветрами восточного направления. Сивашские течения возникают в 90–92 % всех случаев при сильных сгонных ветрах западного направления.

В настоящей работе были рассчитаны среднемесячные и среднегодовые значения стока азовских и сивашских течений в проливе Тонком по МС и МР. Согласно результатам расчета, весь исследуемый период времени сохраняется преобладание стока азовских вод над сивашскими. Водообмен в проливе Тонком имеет сезонные особенности: максимум стока азовских вод в Сиваш приходится на апрель – август (рис. 3, а) и совпадает по времени с периодом наивысшего подъема уровня в Азовском море, минимальный приток в Сиваш отмечается в сентябре и в зимние месяцы, в период развития ледовых явлений в море. Сивашские течения в основном наблюдаются в марте – апреле и в осенний сезон с максимумом в октябре¹.

Такая картина внутригодового распределения стоков азово-сивашских вод зеркально отражает сезонные особенности ветрового режима. Выше было отмечено, что западные ветры, сгоняющие сивашские воды, встречаются реже осенью, нагонные восточные – преобладают в зимний период. Водообмен между Сивашом и Азовским морем в основном определяется колебаниями уровенной поверхности моря и соответствует сезонной динамике уровня.

Рассчитанный по МС среднегодовой приток азовских вод в Сиваш в 1966–2013 гг. составил $1,75 \text{ км}^3$, а отток сивашских вод – $0,08 \text{ км}^3$, полученные нами данные притока хорошо согласуются с оценками самого Ю. Г. Слатинского для периода 1961–1966 гг. По его расчетам, в Сиваш поступало в среднем $1,7 \text{ км}^3$ азовских вод, однако сивашская составляющая водообмена в наших расчетах оказалась существенно ниже¹. Очевидно, это связано с недоучетом вклада пресной составляющей (дренажный сток) в баланс Сиваша, вследствие чего возникали такие значительные отклонения в оценках реального водообмена. В связи с этим более целесообразно использовать методику МР.

Расчет по МР позволяет учесть изменения уровня в заливе, что отразилось на результатах оценки оттока сивашских вод в Азовское море: он составил $0,26 \text{ км}^3$ в среднем за год (таблица). Среднегодовой приток Азовских вод варьировал в широких пределах от $0,3$ до $1,18 \text{ км}^3$ (рис. 3, а).

¹ Ерёмкина Е. С., Евстигнеев В. П. Оценки стоков азово-сивашских вод в проливе Тонком // Моря России: фундаментальные и прикладные исследования : тезисы докладов всероссийской научной конференции, г. Севастополь, 23–28 сентября 2019 г. Севастополь : ФГБУН ФИЦ МГИ, 2019. С. 195. URL: http://mhi-ras.ru/assets/files/morya_rossii-2019_tezisy.pdf#1 (дата обращения: 08.09.2020).

**Среднемесячные значения притока азовских и оттока сивашских вод (км³)
в проливе Тонком в 1966–2013 гг., рассчитанные по двум методикам
Monthly average values of the Azov Sea water inflow and the Sivash Bay water
outflow (km³) in the Tonky Strait in 1966–2013, calculated by two methods**

Компонент / Component	Месяцы / Months												∑год / ∑year
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Рассчитано по МР / Calculated by the Raskin method													
Отток / Outflow	0,018	0,014	0,023	0,021	0,013	0,012	0,012	0,013	0,028	0,039	0,041	0,034	0,265
Приток / Inflow	0,046	0,022	0,046	0,059	0,072	0,065	0,078	0,076	0,061	0,065	0,065	0,068	0,718
Рассчитано по МС / Calculated by the Slatinsky method													
Отток / Outflow	0,005	0,002	0,003	0,004	0,001	0,003	0,004	0,004	0,014	0,021	0,019	0,012	0,088
Приток / Inflow	0,112	0,068	0,163	0,202	0,225	0,196	0,181	0,152	0,116	0,119	0,135	0,141	1,665

Расчеты показали снижение притока азовских вод в 1976–2006 гг.: с 1963 по 1976 г. из Азовского моря в Сиваш поступало в среднем 0,81 км³, с началом работы СКК приток сократился в среднем на 0,2 км³. С 2007 г. наблюдался рост в поступлении вод Азовского моря и снижение оттока из Сиваша (рис. 3, *a*), что обусловлено резким перепадом уровней между заливом и морем в эти годы (рис. 2, *c*). Возможно, перепад уровней связан с сокращением поступления вод из СКК, поскольку заметного увеличения количества выпадающих осадков над заливом Сиваш в эти годы не происходило (рис. 2, *b*). Разница между притоком и оттоком вод в проливе характеризуется высокой межгодовой изменчивостью. В среднем за весь исследуемый период разница составила 0,45 км³, в отдельные годы, когда уровень моря на МГП Чонгарский мост был равен уровню на станции МГ Геническ, составляющие водообмена были равными, а когда он был выше – отток из Сиваша превышал приток из моря. Наиболее вероятной причиной такого роста уровня в Сиваше являлась работа СКК.

В спектре изменчивости величины оттока сивашских вод (см. рис. 3, *c*) обнаружены колебания с периодом около 4 лет. На этот же период приходится основной пик спектральной плотности изменчивости количества осадков над заливом Сиваш. На спектре когерентности этому периоду соответствует когерентность 0,4, хотя отмечается и вторичный пик когерентности для периодов 5–6 лет. Причинами снижения когерентности между колебаниями являются влияние скорости ветра над проливом Тонким и разности уровней моря в заливе и в Азовском море на интенсивность водообмена. В большей степени изменчивость уровня в районе МГ Геническ определяется динамикой изменений уровня Азовского моря. В частности, наложение разнообразных факторов влияния приводит к смещению пиков на спектре притока вод из Азовского моря на периоды 3 года и 5–6 лет. При этом слабая когерентность между притоком Азовских вод и осадками над заливом Сиваш проявляется с периодичностью 4–5 лет.

Выводы

В работе использованы две эмпирические методики расчета водообмена в проливе Тонком, разработанные при разных гидрологических режимах залива Сиваш. Анализ полученных расходов воды в 1966–2013 гг. показал, что МС не учитывает повышение уровня залива в период работы канала, поэтому начиная с 70-х гг. для расчета составляющих водообмена в проливе Тонком целесообразно использовать МР, в которой в основу расчета положено уравнение зависимости от перепада уровней Азовского моря и Сиваша. Методика расчета расходов воды в проливе Тонком по данным стандартных гидрометеорологических наблюдений была адаптирована и программно реализована.

Расчеты показали, что среднегодовой приток азовских вод варьируется в широких пределах от 0,3 до 1,18 км³, отток сивашских вод в среднем за год составляет 0,26 км³. Разница между притоком и оттоком вод в проливе характеризуется высокой межгодовой изменчивостью. В среднем за весь исследуемый период она составила 0,45 км³. В спектре составляющих водообмена между Сивашом и Азовским морем выделены колебания с периодом ~ 4 года для оттока сивашских вод из залива и с периодами 3 года и 5–6 лет для притока азовских вод в Сиваш. Многолетняя изменчивость оттока Сивашских вод с периодом 4 года обусловлена аналогичной изменчивостью количества осадков над заливом Сиваш. Межгодовая изменчивость количества осадков определяет межгодовую изменчивость уровня моря в заливе Сиваш.

Полученные значения стоков могут использоваться в ретроспективных воднобалансовых расчетах для залива Сиваш в 1966–2013 гг. После 2014 г. данные с пункта наблюдений в Геническе (Украина) не поступают, пост МГП Чонгарский мост не функционирует. Это делает невозможной оценку азово-сивашского водообмена по данным косвенных измерений на метеорологических станциях и на основе эмпирических методик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems / M. Waycott [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2009. Vol. 106, iss. 30. P. 12377–12381. <https://doi.org/10.1073/pnas.0905620106>
2. *Carstensen J., Klais R., Cloern J. E.* Phytoplankton blooms in estuarine and coastal waters: Seasonal patterns and key species // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2015. Vol. 162. P. 98–109. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2015.05.005>
3. *Wooldridge T. H., Adams J. B., Fernandes M.* Biotic responses to extreme hypersalinity in an arid zone estuary, South Africa // *South African Journal of Botany*. 2016. Vol. 107. P. 160–169. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sajb.2016.05.004>
4. *Prazukin A. V., Anufrieva E. V., Shadrin N. V.* Cladophora mats in a Crimean hypersaline lake: structure, dynamics, and inhabiting animals // *Journal of Oceanology and Limnology*. 2018. Vol. 36, iss. 6. P. 1930–1940. <https://doi.org/10.1007/s00343-018-7313-4>
5. The concept of an estuary: A definition that incorporates systems which can become closed to the ocean and hypersaline / I. C. Potter [et al.] // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2010. Vol. 87, iss. 3. P. 497–500. [doi:10.1016/j.ecss.2010.01.021](https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.01.021)
6. *Largier J. L., Hollibaugh J. T., Smith S. V.* Seasonally hypersaline estuaries in Mediterranean-climate regions // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 1997. Vol. 45, iss. 6. P. 789–797. <https://doi.org/10.1006/ecss.1997.0279>

7. *Sovga E. E., Eryemina E. S., Khmara T. V.* Water Balance in the Sivash Bay as a Result of Variability of the Natural-Climatic and Anthropogenic Factors // *Physical Oceanography*. 2018. Vol. 25, iss. 1. P. 67–76. doi:10.22449/1573-160X-2018-1-67-76
8. Сивашский регион: краткая социально-экономическая характеристика / Под общ. ред. В. А. Костюшина, Г. В. Фесенко. Киев : Черноморская программа Ветландс Интернешнл, 2007. 178 с.
9. *Щурова Е. С., Станичная Р. Р., Станичный С. В.* Использование спутниковых данных для исследования современного состояния залива Сиваш // *Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон моря*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2016. Вып. 3. С. 61–64.
10. *Понизовский А. М.* Соляные ресурсы Крыма. Симферополь : Крым, 1965. 163 с.
11. *Дьяков Н. Н., Белогудов А. А.* Водообмен залива Сиваш с Азовским морем через пролив Генический (Тонкий) // Труды Государственного океанографического института имени Н. Н. Зубова. М. : Артифекс, 2015. Вып. 216. С. 240–253. URL: <http://www.oceanography.ru/index.php/component/jdownloads/finish/30/1675> (дата обращения: 12.08.2020).
12. *Слатинский Ю. Г.* Об обмене вод между Сивашом и Азовским морем через пролив Тонкий // Сборник работ Бассейновой гидрометеорологической обсерватории Черного и Азовского морей. Л. : Гидрометеоздат, 1969. Вып. 7. С. 38–54.
13. *Раскин Л. Г.* О водообмене через пролив Тонкий // Комплексные исследования южных морей. М. : Гидрометеоздат, 1992. С. 21–31. (Труды государственного океанографического института ; Вып. 205).
14. Low-frequency variability of storms in the northern Black Sea and associated processes in the ocean–atmosphere system / A. Polonsky [et al.] // *Regional Environmental Change*. 2014. Vol. 14, iss. 5. P. 1861–1871. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0546-z>
15. Гидрометеорологические условия морей Украины. Том 1: Азовское море / Ю. П. Ильин [и др.]. Севастополь, 2009. 402 с.
16. *Евстигнеев В. П., Ерёмкина Е. С.* Расчет количества осадков, выпадающих на поверхность залива Сиваш // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2019. Вып. 2. С. 19–29. doi:10.22449/2413-5577-2019-2-19-29
17. *Brockwell P. J., Davis R. A.* Time Series: Theory and Methods. Springer, 1991. 580 p. doi:10.1007/978-1-4419-0320-4

Об авторах:

Ерёмкина Екатерина Сергеевна, младший научный сотрудник, отдел гидрофизики шельфа, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 5891-9884**, **ORCID ID: 0000-0002-5596-2691**, **ResearcherID: E-8676-2018**, shchurova88@gmail.com

Евстигнеев Владислав Павлович, старший научный сотрудник, ФГАОУ ВО СевГУ (299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, 53), начальник отдела Севастопольского ЦГМС (299011, Россия, ул. Советская, 61), **SPIN-код: 8739-5204**, **ORCID ID: 0000-0003-3064-2613**, **ResearcherID: G-1894-2014**, **Scopus Author ID: 12544785600**, vald_e@rambler.ru