

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Морской гидрофизический институт РАН»

на правах рукописи

ЕРЁМИНА ЕКАТЕРИНА СЕРГЕЕВНА

ВОДНО-СОЛЕВОЙ РЕЖИМ ЗАЛИВА СИВАШ И ФАКТОРЫ,
ЕГО ФОРМИРУЮЩИЕ

Специальность 1.6.17 – океанология

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
доктор географических наук,
старший научный сотрудник
Совга Елена Евгеньевна

Севастополь – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
РАЗДЕЛ 1 ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАЛИВА СИВАШ.....	24
1.1 История изучения залива Сиваш.....	24
1.2 Географическая характеристика и условия формирования залива Сиваш ...	28
1.3 Метеорологический режим	38
1.4 Ретроспективная оценка водно-солевого режима залива Сиваш.....	41
1.4.1 Водный баланс залива Сиваш.....	41
1.4.2 Пространственная и временная динамика солевого режима в заливе Сиваш	48
Выводы к разделу 1	54
РАЗДЕЛ 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	56
2.1 Материалы и методы оценки режима солености.....	56
2.1.1 Материалы исследований.....	56
2.1.2 Методика определения солености.....	58
2.2 Материалы и методы спутниковых наблюдений.....	62
2.3 Материалы и методы, использованные для оценки составляющих водного баланса.....	67
2.3.1 Материалы и методы, использованные для расчета количества осадков	67
2.3.2 Материалы и методы, использованные для расчета расходов воды в проливе Тонком.....	73
Выводы к разделу 2.....	76
РАЗДЕЛ 3 ВОДНО-СОЛЕВОЙ РЕЖИМ ЗАЛИВА СИВАШ И ФАКТОРЫ ЕГО ФОРМИРУЮЩИЕ.....	78
3.1 Элементы метеорологического режима.....	78
3.1.1 Ветровой режим	78
3.1.2 Атмосферные осадки	79
3.2 Элементы гидрологического режима.....	84
3.2.1 Современный температурный и ледовый режимы залива.....	84

3.2.2 Уровненный режим	91
3.2.3 Водообмен залива Сиваш с Азовским морем	93
3.2.4 Фильтрация вод Азовского моря через бар Арабатской Стрелки	98
3.3 Водный баланс залива Сиваш при различных режимах работы Северо-Крымского канала	100
Выводы к разделу 3	104
РАЗДЕЛ 4 ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВОДНО-СОЛЕВОГО РЕЖИМА ЗАЛИВА СИВАШ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕКРЫТИЯ СЕВЕРО-КРЫМСКОГО КАНАЛА	107
4.1 Изменчивость солености залива Сиваш после перекрытия Северо-Крымского канала в сравнении с ее многолетней динамикой	107
4.1.1 Динамика солености Восточного Сиваша	107
4.1.2 Динамика солености Южного Сиваша	111
4.1.3 Динамика содержания NaCl в разных районах Сиваша	113
4.2 Изменчивость морфометрических характеристик залива Сиваш по спутниковым данным.....	115
4.3 Динамика площади тростниковых зарослей в заливе Сиваш после перекрытия Северо-Крымского канала по спутниковым данным	120
4.4 Практические рекомендации по научно-обоснованной сети наблюдений, как части экологического мониторинга залива Сиваш.....	124
Выводы к разделу 4.....	128
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	131
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	135

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Актуальность выполненной работы определяется необходимостью изучения залива Сиваш Азовского моря как наиболее техногенно и антропогенно преобразованной акватории прибрежной зоны Крыма. Данный залив является восстанавливаемым месторождением минеральных солей, отличается высоким биоразнообразием, входит в перечень водно-болотных угодий международного значения, территория которого внесена в Рамсарский список в 1978 году. Гидролого-гидрохимическое состояние залива Сиваш определяется особым водным балансом, а изменчивость его составляющих меняет устоявшееся природное равновесие.

В результате человеческой деятельности водно-солевой режим залива Сиваш претерпевает существенные изменения. Введение в эксплуатацию Северо-Крымского канала (СКК) в 70-е годы кардинально повлияло на водный баланс Сиваша: пресные воды, поступающие с полей орошения, привели к снижению солености в Восточном и Южном Сиваше в несколько раз [Сивашский регион ... , 2007].

В работах, посвященных оценке составляющих водного баланса залива Сиваш со времени ввода в эксплуатацию Северо-Крымского канала [Раскин, 1992; Сивашский регион ... , 2007; Дьяков и др., 2013; Дьяков и др., 2015a], не рассчитывался показатель изменения объема залива по уравнению водного баланса, что не позволило оценить его динамику в зависимости от влияния природно-климатических и антропогенных факторов в различные временные периоды функционирования СКК [Sovga et al., 2018]. Кроме того, не были осуществлены корректировки отдельных статей водного баланса, за счет которых появилась бы возможность увеличения точности водно-балансовых расчетов.

Высокая изменчивость факторов, определяющих водно-солевой режим залива Сиваш, создает необходимость в проведении балансовых расчетов в различные периоды функционирования Северо-Крымского канала. Актуальность

настоящего исследования состоит в необходимости получения откорректированных данных приходных и расходных статей водного баланса залива в период до работы канала и во время его функционирования.

Перекрытие Северо-Крымского канала в 2014 г. стало еще одним важным фактором, оказывающим влияние на водно-солевой режим залива Сиваш. Сократился объем поступления пресных вод в залив, что привело к росту солености [Боровская и др., 2020; Ломакин, 2020; Ерёмина, 2021], изменению морфометрических характеристик залива, ландшафтов Присивашья и, как следствие, к глобальной перестройке экосистемы Сиваша. Проявления этих процессов были подтверждены в работах: [Колесникова, и др., 2016; Шадрин и др., 2016; Бурдиян и др., 2018; Михайлов, 2015, 2019; Костин, 2019; Soloveva, et al., 2019; Prazukin et al., 2018; Anufriieva et al., 2020; Shadrin et al., 2019; Sergeeva et al., 2020]. В перечисленных работах в большей степени уделялось внимание изменениям биологических параметров экосистемы залива. Динамика солености по всей акватории Сиваша, ее межгодовая и сезонная изменчивость за 2014–2020 гг. не была подробно проанализирована и не были получены количественные оценки изменчивости морфометрических характеристик залива после перекрытия Северо-Крымского канала.

Особую актуальность имеет проведенный в работе анализ динамики солености воды после перекрытия Северо-Крымского канала в Восточном и Южном Сиваше за 2013–2020 гг. по результатам экспедиционных исследований Морского гидрофизического института. Автором была оценена изменчивость морфометрических характеристик залива Сиваш (динамика береговой зоны, прибрежных водоемов, тростниковой растительности) за указанный выше период при использовании современных контактных и дистанционных методов. Предложены рекомендации для организации системы наблюдений залива Сиваш в новых условиях с учетом современных границ водно-болотного угодья международного значения «Восточный Сиваш». Полученные автором результаты стали научным обоснованием необходимости возобновления работы двух гидрометеопостов в заливе Сиваш.

Объект и предмет исследования

Объект исследования – акватория залива Сиваш и прилегающие территории Присивашья. Предмет исследования – водно-солевой режим залива Сиваш и факторы, его формирующие.

Цель и задачи исследования

Цель исследования – комплексная оценка природно-климатических и антропогенных факторов, формирующих водно-солевой режим залива Сиваш.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. Рассчитать и проанализировать внутри- и межгодовую изменчивость составляющих водообмена между заливом Сиваш и Азовским морем через пролив Тонкий в современный климатический период с использованием данных гидрометеорологических наблюдений на близлежащих станциях;

2. Изучить особенности гидрометеорологических условий: уровня режима, ветровых условий (по данным метеогидропостов), современного температурного и ледового режимов залива Сиваш по спутниковым данным.

3. Изучить внутри- и межгодовую изменчивость атмосферных осадков, выпадающих на поверхность залива Сиваш за современный климатический период на основе откорректированных данных четырех береговых метеостанций.

4. Уточнить составляющие водного баланса залива Сиваш в различные периоды функционирования Северо-Крымского канала.

5. Проанализировать динамику солености после перекрытия Северо-Крымского канала в Восточном и Южном Сиваше за 2013–2020 гг. по результатам экспедиционных исследований МГИ.

6. Оценить изменчивость морфометрических характеристик залива Сиваш (динамика береговой зоны, прибрежных водоемов, тростниковой растительности) после перекрытия Северо-Крымского канала.

7. Предложить рекомендации для организации системы наблюдений залива Сиваш после перекрытия Северо-Крымского канала.

Научная новизна полученных результатов

Получены новые знания об особенностях функционирования морских закрытых водоемов на примере залива Сиваш (морского залива лагунного типа) в условиях изменчивости природно-климатических и антропогенных факторов. Впервые получены скорректированные по методике Главной геофизической обсерватории и Казахстанского научно-исследовательского гидрометеорологического института (ГГО-КазНИГМИ) [Браславский и др., 1975] данные об объемах атмосферных осадков, выпадающих над заливом, за современный климатический период, позволяющие оценить недоучет вклада атмосферных осадков в водный баланс залива Сиваш.

Впервые оценено изменение объема залива, как в период его условно-естественного состояния, так и при различных режимах работы Северо-Крымского канала на основании проведенного в настоящей работе расчета составляющих водообмена между заливом Сиваш и Азовским морем через пролив Тонкий, а также уточнения отдельных статей водного баланса залива Сиваш.

Впервые проанализирована изменчивость солености в заливе после перекрытия Северо-Крымского канала. Для Восточного и Южного Сиваша впервые показаны отличия в сезонной и межгодовой динамике роста солености в различных частях акваторий по мере удаления от пролива Тонкого.

Впервые проанализирован современный температурный режим залива, установлен факт фильтрации вод Азовского моря через Арабатскую Стрелку с использованием спутниковых данных. Впервые получены количественные оценки уменьшения площадей прибрежных водоемов Присивашья и тростниковой растительности после перекрытия Северо-Крымского канала.

Теоретическая и практическая значимость работы

Полученные в работе значения водообмена между Азовским морем и заливом Сиваш через пролив Тонкий могут использоваться в воднобалансовых расчетах для залива Сиваш и для оценки климатической изменчивости его составляющих. Получен ряд действительных сумм атмосферных осадков на метеорологических станциях Присивашья, скорректированных в соответствии с

методикой ГГО-КазНИГМИ [Браславский и др., 1975], что позволяет повысить точность водно-балансовых расчетов для залива Сиваш за период 1966–2013 гг.

Важными практическими результатами работы стали первые количественные оценки изменений морфометрических характеристик залива Сиваш после перекрытия СКК. Впервые после перекрытия Северо-Крымского канала с использованием спутниковых данных рассчитаны общие площади озер-лагун, рисовых чеков и водоемов мелиоративной системы Присивашья, которые сократились на 79,24 км², при этом 2,45 км² приходится на пресные и соленые водоемы, 76,79 км² – на рисовые чеки. Также впервые получены предварительные оценки изменения площадей тростниковой растительности в Восточном и Южном Сиваше за период 2015–2020 гг. с явной тенденцией к уменьшению.

В работе даются практические рекомендации по научно-обоснованной сети наблюдений за водно-солевым режимом залива Сиваш, что актуально для экологического мониторинга залива Сиваш.

Результаты анализа имеющейся информации о состоянии акватории залива Сиваш, полученной после перекрытия Северо-Крымского канала и представленные в настоящей работе, были доложены на заседании комиссии Министерства экологии и природных ресурсов республики Крым, прошедшем 21 ноября 2018 г. Они получили одобрение и поддержку, как научное обоснование необходимости восстановления работы в акватории залива Сиваш гидрометеопоста (ГМП) Роскомгидромета Чонгарский мост, который функционировал в течение 80 лет, но прекратил работу в 2014 году. Соответствующее письмо Министерства экологии и природных ресурсов республики Крым было отправлено в Роскомгидромет.

Полученные результаты позволят научно обосновать возможные изменения в концепции природопользования, соблюдая сбалансированное экономическое развитие региона при минимизации экологического ущерба.

Методология и методы исследования

Исследование динамики солености залива Сиваш проводилось на основе данных натурных наблюдений, полученных в ходе 18 сухопутных экспедиций

ФГБУН ФИЦ МГИ совместно с Севастопольским отделением Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова» (СО ФГБУ «ГОИН») при участии автора в районы Восточного и Южного Сиваша за 2013–2020 гг. Всего было выполнено 130 станций. Для оперативного измерения солености в пробах воды, полученных в ходе экспедиций, в настоящей работе использовался рефрактометрический метод, а для более точных определений в лаборатории пикнометрический метод.

На основе данных уровня моря, направления и скорости ветра рассчитаны среднемесячные и среднегодовые стоки азово-сивашских вод в проливе Тонком в период 1966–2013 гг. по двум методикам: Слатинского Ю. Г. (1969) [Слатинский, 1969] и Раскина Л. Г. (1992) [Раскин, 1992].

Произведен расчет сумм осадков на основе данных четырех метеостанций: Джанкой, Владиславовка, Геническ, Стрелковое. В работе использовалась методика корректировки осадков ГГО-КазНИГМИ [Браславский и др., 1975]. Проведено сравнение полученных значений с данными наблюдений по среднемноголетним суммам осадков, рассчитанным за период 1966–2013 гг. Между исходными и действительными значениями количества осадков, просуммированными по месяцам, сезонам и за год, рассчитывались абсолютные отклонения, а также среднее квадратичное и относительное отклонения. При оценке тенденций изменения режима поступления атмосферных осадков в залив были рассчитаны линейные тренды непараметрическим методом робастного линейного сглаживания с использованием оценочной функции Тейла-Сена [Sen, 1968]. Значимость трендов устанавливалась на основе теста Манна-Кендалла на уровне 10% [Евстигнеев и др., 2019].

Для анализа температурного режима залива Сиваш использовались данные массива NASA [Архив Giovanni] о среднемесячных значениях температуры поверхности моря (ТПМ) за 2003–2016 гг. с осреднением в пределах акваторий Южного Сиваша, Восточного Сиваша, Западной части Азовского моря. Всего было построено более четырехсот полей температуры поверхности воды. В дополнение

использовались данные Морского портала МГИ РАН [Морской портал МГИ]: NOAA, MetOp (AVHRR).

Для исследования ледового режима залива Сиваш использовались спутниковые данные сканеров MODIS спутников Terra (EOS AM) и Aqua (EOS PM) [Архив Giovanni], всего было отобрано около 200 снимков.

С помощью данных спутников серии Landsat сканеров TM (Landsat-5), OLI/TIRS TM (Landsat-8), отобранных на портале Геологической Службы США (USGS) [Геологическая Служба США], проводился анализ изменений, произошедших в береговой зоне после перекрытия Северо-Крымского канала: рассчитывались площади пресноводных водоемов Присивашья во время работы канала и после его перекрытия, сопоставлялись площади водного зеркала Восточного и Южного Сиваша, в условиях изменившегося водного баланса, выделялись районы подтопления и обмеления берегов залива. Данная методика позволяет выделить изменение береговой линии во времени. Для чёткого выделения границы «суша – водная поверхность» использовалось сопоставление изображений в ИК-каналах [Станичная и др., 2016]. Обработка снимков осуществлялась в свободно распространяемой программе BEAM VISAT 5.0 (<https://www.brockmann-consult.de/cms/web/beam>). В ходе обработки изображения, сделанные в разное время, интерполировались на сетку с шагом, соответствующим 30-метровому разрешению, затем комбинировались в форме RGB-изображения [Ерёмина и др., 2017b, 2018c, 2018d]. Всего было составлено около 30 композитов за 1984–2016 гг., из них выбрано около 8 для качественной оценки сокращения водоемов Присивашья, рисовых чеков и других изменений прибрежной территории залива Сиваш.

Изучение динамики тростниковой растительности было выполнено по данным цифровых многозональных спутников Sentinel-2 L1C. Использовались RGB-композиции с сочетанием каналов 11:8:4. Используемые снимки Sentinel выполнены с 2015 по 2020 гг. в вегетативный период с мая по июнь, они сопоставлялись с осенними снимками, всего было отобрано около 40 снимков. Для идентификации тростниковой растительности на снимках при выборе эталона использовались красные и инфракрасные каналы. Полученные таким образом снимки, в отличие от

снимков в естественных цветах, позволили отделить чистую поверхность воды от суши и растительности. Надежность в определении эталона тростниковой растительности обеспечивалась также визуальным анализом и полевым дешифрированием в ходе рекогносцировочных маршрутов. Анализируемая территория включала в себя акваторию заливов Князевского и Балгановского (в Восточном Сиваше) и район Алексеевской засухи (Южный Сиваш).

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие результаты научной деятельности:

1. Установлено, что антропогенные факторы, связанные с функционированием и перекрытием Северо-Крымского канала и системой природопользования в регионе, оказывают влияние на формирование водно-солевого режима залива Сиваш наряду с воздействием таких природно-климатических факторов как атмосферные осадки, водообмен с Азовским морем, температурный и ледовый режимы.

2. Показано, что изменение уровня режима залива Сиваш в результате функционирования Северо-Крымского канала существенно влияло на водообмен в проливе Тонком: рост уровня залива вызывал уменьшение поступления азовоморских вод и его опреснение, снижение уровня – увеличение притока азовоморских вод и осолонение залива.

3. Перекрытие Северо-Крымского канала привело к изменению водно-солевого режима залива. Резкое сокращение пресноводной приходной составляющей в его водном балансе вызвало увеличение солености акватории. Показано, что за шесть лет соленость воды в Восточном и Южном Сиваше возросла вдвое и приблизилась к значениям, зафиксированным до начала работы канала.

4. Впервые с использованием спутниковых методов получены количественные оценки морфометрических характеристик береговой зоны залива Сиваш, включая динамику его фитогенных берегов. Установлено, что после перекрытия Северо-Крымского канала общая площадь водоемов Присивашья сократилась на 79,24 км² (5,6% от общей площади акватории Восточного Сиваша и водоемов Присивашья).

5. Предложена и научно обоснована современная структура наблюдательной сети за водно-солевым режимом залива Сиваш. Сеть состоит из 14 пунктов наблюдений и охватывает особо охраняемые территории водно-болотного угодья «Восточный Сиваш» в его современных границах, что актуально для системы экологического мониторинга Восточного Сиваша после перекрытия Северо-Крымского канала.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных в работе результатов натуральных наблюдений обеспечена использованием методов, являющихся общепринятыми в данной области, и выполненными в сертифицированной лаборатории.

Достоверность результатов работы, полученных при использовании дистанционных методов исследования, обеспечена анализом постоянно пополняемой обширной базы данных спутниковых снимков исследуемой территории, которой располагает отдел дистанционных методов исследования Морского гидрофизического института РАН. Достоверность результатов, полученных при использовании метода RGB-комбинирования изображений, сделанных в разное время для одной территории, подтверждена многочисленными публикациями в рецензированных изданиях [Станичная и др., 2015; Станичная и др., 2016; Ерёмина и др., 2018с; Ерёмина и др., 2018d].

Достоверность результатов расчетов водообмена залива Сиваш с Азовским морем через пролив Тонкий, а также корректировки величин атмосферных осадков обеспечена использованием методов и методик общепринятых в данной области [Слатинский, 1969; Раскин, 1992; Браславский и др., 1975].

Основные результаты диссертации представлялись на международных и всероссийских конференциях, семинарах и школах: "Международная научная конференция «Современное состояние и перспективы наращивания морского ресурсного потенциала юга России» (пгт. Кацивели, 2014 г.); Научно-практическая конференция «Пути решения проблемы сохранения и восстановления пляжей Крымского полуострова» (г. Севастополь, 2015 г.); IX Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых (с

международным участием) по проблемам водных экосистем, посвященной 100-летию со дня рождения д. б. н., проф., чл.-кор. АН УССР В.Н. Грезе «Pontus Euxinus 2015» (г. Севастополь, 2015 г.); Седьмая Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Представительство «Интеркосмос» (г. Таруса, 2016 г.); Всероссийская молодежная научная конференция «Комплексные исследования морей России» (г. Севастополь, 2016 г.); I Черноморская научно-практическая конференция МГУ «Проблемы безопасности в современном мире» (г. Севастополь, 2016 г.); International Conference «Managing risks to coastal regions and communities in a changing world» EMECS'11 – SeaCoasts XXVI (St. Petersburg, 2016); Научная конференция: «Экология. Экономика. Информатика. Азовское море, Керченский пролив и предпроливные зоны в Черном море: проблемы управления прибрежными территориями для обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования» (пос. Дюрсо, 2016 г.); 1 международный экологический форум в Крыму «Крым – эколого-экономический регион. Пространство ноосферного развития» (г. Севастополь, 2017 г.); II Всероссийская конференция молодых ученых «Комплексные Исследования Мирового Океана» (г. Москва, 2017 г.); Научная конференция «Моря России: наука, безопасность, ресурсы» (г. Севастополь, 2017 г.); Пятнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, 2017 г.); III Всероссийская конференция молодых ученых «Комплексные Исследования Мирового Океана» (г. Санкт-Петербург, 2018 г.); Всероссийская научно-практическая юбилейная конференция «Геоэкология и природопользование: актуальные вопросы науки, практики и образования» (г. Симферополь, 2018 г.); Всероссийская научная конференция «Моря России: методы, средства и результаты исследований» (пгт Качивели, 2018 г.); Комиссия по экологической безопасности Совета Министров Республики Крым (г. Симферополь, 2018 г.); Всероссийская научная конференция «Моря России: фундаментальные и прикладные исследования» (г. Севастополь, 2019 г.); Всероссийская научная конференция «Моря России: Исследования

береговой и шельфовой зон» (28-ая Береговая конференция) (г. Севастополь, 2020 г.).

Достоверность и новизна научных результатов подтверждаются публикациями в ведущих профильных рецензируемых журналах.

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано в соавторстве 33 научные работы, из них 8 статей в рецензируемых научных журналах, 6 статей в рецензируемых сборниках научных трудов и 19 тезисов докладов в сборниках докладов научных конференций.

Требованиям ВАК при Минобрнауки России удовлетворяют 10 работ в рецензируемых научных изданиях. В их числе 3 работы [1, 5, 6] в рецензируемых научных изданиях, входящих в наукометрическую базу Web of Science, 3 работы [2, 5, 6], входящих в наукометрическую базу SCOPUS, 3 работы в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень изданий ВАК при Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук [3, 4, 7, 8] и 3 работы [9, 10, 11] в изданиях, соответствующих п. 10 Постановления Правительства Российской Федерации от 30 июля 2014 г. № 723 «Об особенностях присуждения ученых степеней и присвоения ученых званий лицам, признанным гражданами Российской Федерации в связи с принятием в Российскую Федерацию Республики Крым и образованием в составе Российской Федерации новых субъектов – Республики Крым и города федерального значения Севастополя».

Статьи в рецензируемых журналах

1. Sovga E.E. Water balance in the Sivash bay as a result of variability of the natural-climatic and anthropogenic factors / E.E. Sovga, **E.S. Eryemina**, T.V. Khmara // *Physical Oceanography*, [e-journal]. – 2018. – № 25(1). – P. 67–76.

2. **Ерёмина Е.С.** Оценки влияния перекрытия Северо-Крымского канала на изменчивость морфометрических характеристик залива Сиваш по

спутниковым данным / Е.С. Ерёмина, Л.В. Харитонова, С.В. Станичный // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15. – № 7. – С. 175–183.

3. Совга Е.Е. Система экологического мониторинга залива Сиваш в современных условиях / Е.Е. Совга, **Е.С. Ерёмина**, Н.Н. Дьяков // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2018. – № 2. – С. 22–38.

4. Евстигнеев В.П. Расчет количества осадков, выпадающих на поверхность залива Сиваш / В.П. Евстигнеев, **Е.С. Ерёмина** // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2019. – № 2. – С.19–29.

5. Sovga E.E. Research expeditions performed by Marine hydrophysical institute in the Sivash bay waters in Spring and Autumn, 2018 / E.E. Sovga, **E.S. Eremina**, A.A. Latushkin // Physical Oceanography, [e-journal]. – 2020. – № 27(2). – P.161–170.

6. **Eremina E.S.** Inter-annual variability of water exchange between the Azov Sea and the Sivash bay through the Tonky strait / E.S. Eremina, V.P. Evstigneev // Physical Oceanography, [e-journal]. – 2020. – № 27(5). – P. 489–500.

7. **Ерёмина Е.С.** Динамика площади тростниковых зарослей в заливе Сиваш (Азовское море) по спутниковым данным / Е.С. Ерёмина, Е.Е. Совга, С.В. Станичный, В.А. Михайлов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2020. – № 4. – С. 54–65.

8. **Ерёмина Е.С.** Восстановление солёности в заливе Сиваш до естественного уровня после перекрытия Северо-Крымского канала / Е.С. Ерёмина // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2021. – № 3. – С. 84–93.

Статьи в сборниках научных трудов

9. **Щурова Е.С. (Ерёмина Е.С.)** Использование спутниковых данных для исследования современного состояния залива Сиваш / Е.С. Щурова, Р.Р. Станичная, С.В. Станичный // Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон моря. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2016. – №3. – С. 61–64.

10. Позаченюк Е.А. О методах оценки современного состояния акватории залива Сиваш в условиях перекрытия Северо-Крымского канала в 2014 году / Е.А. Позаченюк, Е.Е. Совга, **Е.С. Щурова (Е.С. Ерёмкина)**, Т.В. Хмара, Л.В. Харитоновна // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2016. – №4. – С41–49.

11. Совга Е.Е. Ресурсный потенциал озера Сиваш и современное экологическое состояние его акватории / Е.Е. Совга, **Е.С. Щурова (Е.С. Ерёмкина)** // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. – № 27. – С. 276–283.

12. **Щурова Е.С. (Ерёмкина Е.С.)** Изменчивость характеристик озера Сиваш по данным спутникового дистанционного зондирования / Е.С. Щурова // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. – № 27. – С. 302–305.

13. Ломакин П.Д. Экспедиционные исследования МГИ в Восточном Сиваше весной и осенью 2014 года / П.Д. Ломакин, Е.Е. Совга, **Е.С. Щурова (Е.С. Ерёмкина)**, Е.И. Овсяный // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. – № 28. – С. 138–145.

14. Sovga E.E. Current Water and Salt Regime of the Sivash Bay / E.E. Sovga, **E.S. Eremina**, L.V. Kharitonova, T.V. Khmara // Processes in GeoMedia – Volume II. Springer Geology. – 2021. – P. 225–234.

Тезисы докладов на Всероссийских и международных конференциях

15. Ломакин П.Д. Современный гидрохимический режим и ресурсный потенциал Восточного Сиваша / П.Д. Ломакин, Е.Е. Совга, **Е.С. Щурова (Е.С. Ерёмкина)**, Е.И. Овсяный // Тезисы докладов международной научной конференции «Современное состояние и перспективы наращивания морского ресурсного потенциала юга России». – Кацивели. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. – С. 87–92.

16. **Щурова Е.С. (Ерёмкина Е.С.)** Анализ ледового режима залива Сиваш по спутниковым данным / Е.С. Щурова (**Е.С. Ерёмкина**) // Тезисы докладов международной научной конференции «Современное состояние и перспективы наращивания морского ресурсного потенциала юга России». – Кацивели. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. – С.148–151.

17. Станичная Р.Р. Внутрисезонная изменчивость береговой линии Сиваша, вызванная ветровыми условиями / Р.Р. Станичная, **Е.С. Щурова (Е.С. Ерёмкина)** // Тезисы докладов научно-практической конференции «Пути решения проблемы сохранения и восстановления пляжей Крымского полуострова». – Севастополь, 2015. – С. 144–145.

18. **Щурова Е.С. (Ерёмкина Е.С.)** Пространственная и временная изменчивость поля температуры поверхности воды Сиваша и Азовского моря с использованием спутниковых данных / Е.С. Щурова, С.В. Станичный // Тезисы докладов IX Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых (с международным участием) по проблемам водных экосистем, посвященной 100-летию со дня рождения д.б.н., проф., чл.-кор. АН УССР В.Н. Грезе «Pontus Euxinus 2015». – Севастополь, 2015. – С.202–203.

19. **Щурова Е.С. (Ерёмкина Е.С.)** Применение спутниковых данных в исследовании залива Сиваш / Е.С. Щурова, Р.Р. Станичная, С.В. Станичный // Материалы всероссийской молодежной научной конференции «Комплексные исследования морей России, [Электронный ресурс]. – Севастополь, 2016. С. 219–224.

20. **Щурова Е.С. (Ерёмина Е.С.)** Исследование интрузий азовских вод через Арабатскую стрелку / Е.С. Щурова, С.В. Станичный // Тезисы докладов I Черноморской научно-практической конференции МГУ «Проблемы безопасности в современном мире», [Электронный ресурс]. – Севастополь, 2016. – С. 102–103.

21. **Shchurova E.S. (Eremina E.S.)** Satellite data for investigation of recent state and processes in the Sivash bay / E.S. Shchurova, R.R. Stanichnaya, S.V. Stanichny // Proceedings of International Conference "Managing risks to coastal regions and communities in a changing world" EMECS'11 - SeaCoasts XXVI. – St. Petersburg, 2016. – P. 773–780.

22. **Щурова Е.С. (Ерёмина Е.С.)** Изменения ресурсного потенциала залива Сиваш (Азовское море) после перекрытия Северо-Крымского канала в 2014 году / Е.С. Щурова, Е.Е. Совга, Т.В. Хмара, П.Д. Ломакин // Сборник материалов конференции «Экология. Экономика. Информатика. Азовское море, Керченский пролив и предпроливные зоны в Черном море: проблемы управления прибрежными территориями для обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования». – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2016. – С. 296–307.

23. **Щурова Е.С. (Ерёмина Е.С.)** Мониторинг влияния перекрытия Северо-Крымского канала на залив Сиваш / Е.С. Щурова // Сборник тезисов II Всероссийской конференции молодых ученых «Комплексные Исследования Мирового Океана конференции КИМО-2017», [Электронный ресурс]. – Москва, 2017. – С. 617.

24. Совга Е.Е. Современное экологическое состояние и ресурсный потенциал залива Сиваш / Е.Е. Совга, **Е.С. Ерёмина**, Т.В. Хмара // Тезисы докладов научной конференции «Моря России: наука, безопасность, ресурсы». – Севастополь: ФГБУН МГИ, 2017. С.103.

25. **Ерёмина Е.С.** Современный термохалинный режим залива Сиваш на основе спутниковой информации и данных натуральных наблюдений / Е.С. Ерёмина, С.В. Станичный // Тезисы докладов пятнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», [Электронный ресурс]. – Москва, 2017. – С. 250.

26. **Ерёмина Е.С.** Мониторинг изменений водного баланса Южного Сиваша по спутниковым снимкам / Е.С. Ерёмина, Л.В. Харитонова // Сборник: Крым – эколого-экономический регион. Пространство ноосферного развития. Материалы I Международного экологического форума в Крыму, [Электронный ресурс]. – 2017. – С. 267–269.

27. **Ерёмина Е.С.** Современное состояние прибрежных водоемов Присивашья после перекрытия Северо-Крымского канала / Е.С. Ерёмина, Л.В. Харитонова // Процессы в геосредах. – 2018. – № 3(17).– С. 58–59.

28. **Ерёмина Е.С.** Оценка изменения гидрологического режима водно-болотного угодья «Восточный Сиваш» / Е.С. Ерёмина, Е.Е. Совга // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Моря России: методы, средства и результаты исследований». – Севастополь: ФГБУН МГИ, 2018. – С. 242–243.

29. **Ерёмина Е.С.** Рекомендации по организации системы экологического мониторинга залива Сиваш в условиях перекрытия Северо-Крымского канала / Е.С. Ерёмина, Е.Е. Совга, Н.Н. Дьяков // Материалы Всероссийской научно-практической юбилейной конференции с международным участием, в сб. «Геоэкология и природопользование: актуальные вопросы науки, практики и образования, [Электронный ресурс]. – Симферополь, 2018. – С. 125–128.

30. **Ерёмина Е.С.** Моделирование гидродинамических процессов в мелководных водоемах на примере залива Восточный Сиваш / Е.С. Ерёмина, Т.В. Хмара // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Моря России: фундаментальные и прикладные исследования». – Севастополь: ФГБУН МГИ, 2019. – С. 73–74.

31. **Ерёмина Е.С.** Оценки стоков азово-сивашских вод в проливе Тонком / Е.С. Ерёмина, В.П. Евстигнеев // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Моря России: фундаментальные и прикладные исследования». – Севастополь: ФГБУН МГИ, 2019. – С. 194–195.

32. Совга Е.Е. Экспедиционные исследования в Восточном Сиваше за 2018 г. / Е.Е. Совга, **Е.С. Ерёмина** // Тезисы докладов Всероссийской научной

конференции «Моря России: фундаментальные и прикладные исследования». – Севастополь: ФГБУН МГИ, 2019. – С. 272–273.

33. Совга Е.Е. Динамика фитогенных берегов в заливе Сиваш по спутниковым данным / Е.Е. Совга, **Е.С. Ерёмкина**, С.В. Станичный // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Моря России: исследования береговой и шельфовой зон». – Севастополь: ФГБУН ФИЦ МГИ, 2020. – С. 475.

Связь работы с научными темами

Работа выполняется в соответствии с планами научных исследований ФГБУН ФИЦ МГИ в рамках, следующих завершенных и действующих научно-исследовательских проектов:

– «Научное обоснование наращивания запасов полезных ископаемых и природных ресурсов в прибрежной зоне Азово-Черноморского бассейна» – шифр «Ресурс» (РК № 0112U001781), период 2012–2014 гг.

– «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей, на основе современных методов контроля состояния морской среды и гридтехнологий» – шифр «Фундаментальная океанология» (рег. номер НИОКР_115062410072 от 24.06.2015), период 2014–2017 гг.

– Тема 0827-2018-0004 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» (шифр «Прибрежные исследования»), период 2018–2020 гг.

– Влияние перекрытия Северо-Крымского канала на состояние акватории залива Сиваш (Грант РФФИ №16-45-910582р_a), период 10.06.2016–13.05.2017 гг.

Личный вклад соискателя

Соискателем совместно с научным руководителем работы определена актуальность исследования, сформулирована цель и обозначены основные задачи. Ею лично обобщены и проанализированы имеющиеся литературные данные о физико-географической характеристике залива Сиваш, истории его изучения, ретроспективной оценке водно-солевого режима залива Сиваш.

Соискатель принимала участие в экспедиционных исследованиях, лично осуществляла отбор и анализ проб воды. Ею освоены методики определения солености воды и осуществлены измерения солености воды Восточного и Южного Сиваша в различные сезоны по результатам экспедиционных исследований за 2013–2020 гг.

Соискатель принимала участие в выборе методик и их адаптации для расчетов водообмена залива Сиваш с Азовским морем через пролив Тонкий. Лично анализировала полученные данные составляющих водообмена за 1966–2013 гг. Проводила анализ ветрового и уровенного режимов по данным морских береговых станций.

Автором работы проведено сравнение откорректированных данных сумм атмосферных осадков по методике ГГО-КазНИГМИ с данными наблюдений, дана оценка режимов поступления вод в залив Сиваш и их изменение.

Сформирована база спутниковых изображений различного разрешения исследуемого района. Освоена методика дешифрирования спутниковых снимков, в том числе метод RGB-комбинирования изображений, выполненных в разное время для выделения изменений в береговой зоне. Проанализирована изменчивость температурного и ледового режимов на основании спутниковой информации, охарактеризована динамика береговой линии и прибрежных водоемов.

На паритетной основе совместно с научным руководителем и соавторами опубликованных работ осуществлялось обсуждение полученных в работе результатов, формулировка выводов и заключения работы.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д. г. н. Елене Евгеньевне Совге за всестороннюю поддержку, чуткое руководство, ценные идеи и замечания, а также организацию всего научного процесса, связанного с изучением залива Сиваш в Морском гидрофизическом институте. Автор сердечно благодарит к. ф.-м. н. С.В. Станичного, за ценные рекомендации и переданный опыт в работе со спутниковыми данными. Автор выражает

благодарность директору СО ФГБУ «ГОИН» Н.Н. Дьякову и его коллективу за продуктивную совместную работу в экспедициях в исследуемый район. Соискатель выражает искреннюю благодарность к. ф.-м. н. В.П. Евстигнееву за проявленный интерес к совместной работе и за переданный опыт и знания. Автор благодарит к. г. н. И.Г. Шокурову, д. г. н. Ю.В. Артамонова, д. г. н. В.Н. Белокопытова, директора ФГБУН ФИЦ МГИ С.К. Коновалова за ценные советы и внимание к работе. Соискатель признательна д. ф.-м. н. Н.Б. Шапиро, д. г. н., профессору МГУ Е.И. Игнатову за поддержку работы, а также благодарит д. г. н., профессора П.Д. Ломакина, к. г. н. Л.В. Харитонову Е.И. Овсяного, Р.Р. Станичную, Т.В. Хмару, А.А. Латушкина за полезные консультации, сотрудничество и содействие в работе. Автор искренне благодарит всех сотрудников отдела гидрофизики шельфа МГИ РАН. Автор благодарит за поддержку своих родных и близких.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка использованных источников, который включает 154 наименования. Полный объем работы составляет 152 страницы, содержит 12 таблиц, 39 рисунков.

Во **введении** к диссертационной работе раскрыта актуальность и степень разработанности темы, сформулированы цель и задачи исследования. Определена научная новизна работы и ее практическая значимость, приводятся: положения, выносимые на защиту, основные материалы и методы, используемые в работе, степень достоверности и апробация результатов, личный вклад автора и список публикаций по теме диссертации.

В первом разделе описывается физико-географическая характеристика района исследования и степень изученности темы. Рассматривается история изучения залива Сиваш: с античных времен до начала 21 века. Приводится географическая характеристика района исследования и история его формирования. Описываются особенности метеорологического режима, которые включают: ветровой режим, температурный режим, атмосферные осадки,

испарение и ледовые условия, как природно-климатические факторы, определяющие водно-солевой режим залива Сиваш. Проводится ретроспективная оценка водно-солевого режима залива Сиваш.

Выделяются основные статьи водного баланса. На основе литературных данных выводится уравнение водного баланса за период до постройки Северо-Крымского канала и во время его эксплуатации.

Во втором разделе изложены все материалы и методы, которые были использованы в исследовании. В диссертационной работе анализировались данные натурных наблюдений, данные дистанционного зондирования Земли и гидрометеопостов, при этом для решения каждой конкретной задачи подбирались специальные методики.

В третьем разделе работы представлены полученные откорректированные данные приходных и расходных статей водного баланса залива в период до работы канала и во время его функционирования. На основании спутниковой информации анализируются современные данные по гидрометеорологическому режиму залива Сиваш, современному температурному режиму залива, установлен факт фильтрации вод Азовского моря через Арабатскую Стрелку. На основе новых, откорректированных данных анализируется динамика объема залива Сиваш за два периода: до постройки канала и во время его функционирования.

В четвертом разделе работы рассматриваются полученные автором оценки межгодовой и сезонной изменчивости солености в заливе Сиваш. Приводятся количественные оценки изменения морфометрических характеристик и анализируется динамика площадей тростниковой растительности после перекрытия Северо-Крымского канала.

РАЗДЕЛ 1 ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАЛИВА СИВАШ

1.1 История изучения залива Сиваш

Первые упоминания о заливе Сиваш (Азовское море) встречаются у Страбона в его труде «География» (примерно 7 г. до н.э.): «Здесь находится перешеек, отделяющий от моря так называемое озеро Сапра... Хотя озеро Сапра имеет, как говорят, 4000 стадий, но является, собственно, только западной частью Меотиды, с которой оно соединено широким устьем. Оно весьма болотисто и едва судоходно для сшитых из кожи лодок, так как ветры легко обнажают мелкие места и затем снова покрывают их водой; поэтому болота непроходимы для больших судов. В заливе 3 островка, вдоль побережья несколько мелких мест и немного подводных камней» [цит. по Страбон, 1964].

Изучение минеральных озер России началось еще с середины 18-го столетия. Академик П.С. Паллас посетил причерноморскую степь в 1793–1794 гг. В описаниях его путешествий имеется много интересных и ценных наблюдений о минеральных озерах Азово-Черноморского побережья и степного Крыма. Впервые верно была высказана мысль о происхождении приморских озер путем отделения косами и пересыпями морских заливов. «Все Крымские озера лежат на морском побережье, отделены от моря узкою и низкою косою, они представляют собою морские заливы, которые...отделились наносом песка и ила и образовали собою закрытые озера...» [цит. по Дзенс-Литовский, 1946]. Паллас упоминал морфометрические характеристики, геологическое строение, биоразнообразие Арабатской Стрелки: «...проходя далее в Крым вдоль песчаной Арабатской косы, местами очень узкой длиной в сто десять верст... коса имеет здесь ширину в несколько сот сажень и в начале состоит из ракушечного песка, в котором хорошо растут немногочисленные травы. Эта коса имеет 11 верст длины до переправы в Ениче. По ней проходят многочисленные подводы из Малороссии,

везущие жизненные припасы и различные товары в Крым и рыбу из Азовского моря» (Рисунок 1.1) [Паллас, 1999].



Рисунок 1.1 – Фрагмент военной топографической карты п-ова Крым, составленной генерал-майором С.А. Мухиным.

СПб: Военно-топографическое депо, 1817 г. Масштаб – в 1 дюйме четыре версты (1:168 000) [Морские берега Крыма, 2019]

В 1834 г. профессор Дерптского университета Траугот Фридеман Гебель посетил минеральные озера Крыма [Дзенс-Литовский, 1946]. В его работах приведено более 40 химических анализов рапы и новосадки минеральных озер, в том числе данные по содержанию Cl, Br, Na, K, NaCl, MgCl₂, MgBr₂, CaCl₂ в Сиваше [Friedemann, 1837–1838].

Большая полевая работа была проведена профессором Г.П. Федченко в 1863 г., он занимался обследованием минеральных озер Азово-Черноморского побережья и степного Крыма. В 1880 г. появляется описание соляных озер Азово-Черноморского побережья и степного Крыма А. Першке [Дзенс-Литовский, 1946]. Этой работой начинается комплексное геологическое и гидрохимическое изучение минеральных озер. Кроме описания существующих соляных промыслов на минеральных озерах Азово-Черноморского побережья, Першке подробно останавливается на происхождении озер, лиманов и Сивашей. Ученый впервые классифицирует минеральные озера на основании химического анализа рапы. Всякие изменения в составе соляной массы рапы озера он пытается объяснить химическим взаимодействием растворённых солей с элементами, приносимыми водой, питающей озеро. После этих работ появляется целый ряд специальных гидрохимических исследований минеральных озёр; таковы работы В.В. Марковникова по астраханиту, А. Першке, А. Лебединцева и др. Эти исследования и положили основу комплексному геологическому и физико-химическому изучению минеральных озёр [Дзенс-Литовский, 1946].

В 1881 г. Министерство государственных имуществ опубликовало «Очерк месторождений полезных ископаемых в Европейской России и на Урале» [Очерк месторождений ... , 1881], где, в том числе, описываются месторождения соли, классифицируются соленые озера Крыма по группам, описывается как происходит осаждение соли на Сиваше и приводятся данные о добычи соли.

В 1894 г. И.Н. Вноровским было впервые произведено бурение дна озер Сакского, Сасык-Сиваша и Красного в Крыму. Н.С. Курнаковым в то же время были собраны пробы донных иловых отложений и произведены химические анализы, а И.В. Мушкетовым произведено геологическое обследование. На основании личных исследований и материалов, добытых Вноровским при бурении озёр, и литературных данных Мушкетовым была опубликована в Горном журнале статья «Заметки о происхождении различных типов крымских соляных озёр» [Дзенс-Литовский, 1946].

В 1915 г. была издана книга «Крымские соленые озера» И.А. Каблукова и А.С. Каблукова [Каблуков и др., 1915], целью исследований была перспектива добычи калийных и натриевых солей из рапы крымских озер, авторы проводили опыты по получению калийных солей, произвели ряд анализов и предоставили полный отчет о проделанной работе с приведением методик.

Большая работа в исследовании физико-химических свойств минеральных озер была проделана академиком Н.С. Курнаковым и его учениками – С. Жемчужным, В. Ильинским, С. Макаровым, В. Николаевым, А. Бергманым, М. Валяшко, В. Кузнецовым и многими другими. Академик Н.С. Курнаков начал изучение минеральных озер Крыма в 90-х годах 19 века и полвека отдал вопросам изучения минеральных озер. Н.С. Курнаковым была проделана работа по лабораторной обработке полевых материалов Крымских соленых озер и Сиваша, впервые были освещены те процессы, которые происходят в рапе минеральных озёр, вызывая изменения в составе их солей [Курнаков, 1963; Курнаков и др., 1936]. На этих материалах Н.С. Курнаковым был разработан метод, рассматривающий минеральное озеро, как равновесную химическую активную систему. Применение и глубокое внедрение физико-химического анализа для изучения минеральных озёр начинается с исследований Н.С. Курнакова, данный метод способствовал развитию геологии донных химических и кластических осадков озёр [Дзенс-Литовский, 1946]. В отношении сульфатных озер исследования акад. Н.С. Курнакова и его школы позволили определить условия выделения глауберовой соли и дали возможность обосновать бассейновый способ получения тенардита.

Под руководством А.И. Дзенс-Литовского в 1930–1933 гг. работала Крымская комплексная гидрогеологическая экспедиция, которая вела совместное исследование с Крымской физико-химической экспедицией Академии Наук, руководимой акад. Н.С. Курнаковым. Работами экспедиции были охвачены главным образом минеральные озера Евпаторийского побережья, Тарханкутского полуострова и Сиваша. Профессор А.И. Дзенс-Литовский опубликовал множество работ о природе Сиваша [Дзенс-Литовский, 1938a, 1938b, 1946, 1954, 1956a, 1956b].

Б.С. Шустовым были осуществлены экспедиции в район Сиваша с целью изучения физико-географических особенностей водоема, где были выполнены гидрологические наблюдения, измерения глубин, обследованы берега и острова Сиваша [Шустов, 1938].

М.Ф. Стащук, В.Л. Супрычев и М.С. Хитрая детально описали минералогию илов, возраст, время и этапы развития Сиваша в книге [Стащук и др., 1964]. П.Т. Данильченко и А.М. Понизовский занимались гидрохимией Сиваша. Работы этого времени имели огромное практическое значение и до сих пор остаются актуальными, обобщающими всю известную информацию об особенностях гидрохимического режима Сиваша [Понизовский, 1965а, 1965б; Данильченко, и др., 1954].

В 70-х годах 20 века ученые Морского гидрофизического института изучали гидрохимический режим залива Сиваш, существенно измененный после запуска Северо-Крымского канала [Баранник и др., 1973, Баранник и др., 1974].

В 80-е и 90-е года 20 века залив Сиваш изучался мало, вновь возобновлено исследование природы Сиваша в 2000-х годах. Так как залив Сиваш вошел в Рамсарский список водно-болотных угодий международного значения в 1978 г., новый статус дал толчок к получению новой и обобщению известной информации об экономическом состоянии региона (сельское хозяйство, промышленность, водные ресурсы, охотничье хозяйство, рекреация) [Сивашский регион ... , 2007], экологических проблемах, природе [Марушевский и др., 2005].

1.2 Географическая характеристика и условия формирования залива Сиваш

Вопрос о времени и условиях формирования залива Сиваш является спорным. Остаются разногласия даже по кардинальному вопросу: представляет ли собой Сиваш реликт некогда существовавшего пролива и была ли его площадь не больше современной.

Гипотеза о существовании пролива в районе Перекопского перешейка принадлежит еще П.С. Палласу, она возникла на основании его исследований по формированию озер Эльтон и Баскунчак [Стащук и др., 1964].

А.И. Дзенс-Литовский в 1936 г. высказался о связи Сиваша с морем: «Возможно, перекопские озера представляют собой затопленные устья боковых балок, которые впадали в узкий морской пролив, соединяющий когда-то Азовское море с Черным морем через Ишунский проток из озера Красного и с Сивашом – через залив Алгояш. Впоследствии эти балки были сильно расширены деятельностью ветра. Так как это продолжалось недолго, то неудивительно, что в окрестностях перекопских озер нельзя найти никаких признаков бывшего соединения с морем» [Стащук и др., 1964, с. 150–151]. По мнению Дзенс-Литовского пролив исчез 5000 лет назад.

В.К. Леонтьев и О.К. Леонтьев [Леонтьев и др., 1956] высказали гипотезу, что на месте современного Сиваша два тысячелетия тому назад существовал пролив. Сам Сиваш располагался южнее и отделялся от пролива пересыпью. Материалом для выводов послужили данные бурения на глубину 40–42 м. Авторы статьи пишут, что в разрезе отложений лагуны можно наблюдать смену лагунных илов песками (на глубине 15 м), которые затем вновь сменяются донными лагунными осадками (на глубине 23 м). Пески принимаются авторами за древнюю пересыпь. Так как илы Сиваша имеют максимальную мощность 15 м, то, судя по указанным глубинам, авторы этой гипотезы оперировали третичными отложениями, не имеющими отношения к развитию Сиваша [Стащук и др., 1964].

Согласно исследованиям М.Ф. Стащук, В.Л. Супрычев, М.С. Хитрая [Стащук и др., 1964] возраст 8-метровой толщи илов Сиваша составляет 2600 лет. Следовательно, начало формирования бассейнов на месте современного Сиваша приходится на второе тысячелетие до новой эры. Возникновение Сиваша началось в районах развития отрицательных форм рельефа, представляющих собой поды, заболоченные участки и др. На месте Сиваша развивалось два самостоятельных бассейна. В области, относящейся к Западному Сивашу, с восточным ограничением острова Русского, вначале образовалось соленое озеро

Бук, а восточнее располагалась заболоченная местность, преимущественно с пресными водами, и далее на восток за Чонгарским полуостровом находился залив Азовского моря.

В результате постепенного опускания области и размыва берегов, бассейн, расположенный на месте Западного Сиваша, соединился с остальной частью. К этому времени (1100–1200 гг. н. э.) приходится формирование вала – Арабатской Стрелки, который затормозил водообмен между Азовским морем и бассейном, расположенным в области Сиваша. Так как определенное время барьер мог находиться под водой, на карты он нанесен был с опозданием. Впервые он появился у В. Боплана на карте 1650 г. [Стащук и др., 1964]. Можно считать установленным, что Арабатская Стрелка в разных своих частях образовалась в разное время. Наиболее древний участок аккумуляции в средней части бара имеет возраст 5–6 тыс. лет, когда начала формироваться современная береговая зона. Видимо, близкий к этому возраст имеет северная часть стрелки с коренными останцами. Южная, наиболее молодая, часть соединила уже существовавшие севернее участки суши с побережьем Керченского полуострова и превратила Сиваш в полуизолированную лагуну. Тогда же начала формироваться дельта Генического пролива [Мысливец и др., 2014; Мысливец, 2015].

Современный Сиваш представляет собой обширный мелководный залив Азовского моря (морской залив лагунного типа) с изрезанной береговой линией – множеством полуостровов, мысов, заливов. С Азовским морем Сиваш соединен мелководным и узким Геническим проливом, расположенным у северной оконечности Арабатской Стрелки [Совга и др., 2013]. Пролив Генический в настоящее время состоит из двух рукавов – Тонкий и Промойна (Арабатский) (Рисунок 1.2). Основной водообмен залива Сиваш с Азовским морем осуществляется через пролив Тонкий. Он имеет вид узкой речной дельты с вершиной, обращенной к Азовскому морю. Длина пролива 4 км, средняя ширина 100 м, максимальная глубина 4,7–5 м, площадь сечения на гидростворе вблизи мареографа морской гидрометеостанции (МГ) Геническ при среднемноголетней величине уровня 482 см в этом пункте составляет 276 м² [Семенова, 1962, 1964;

Слатинский, 1969; Дьяков и др., 2015а, Совга и др., 2018]. Через пролив Промойна водообмен Сиваша с Азовским морем долгое время или отсутствовал, или осуществлялся в очень ограниченном объеме через дренажные трубы, проложенные под грунтовой автомобильной дорогой. В настоящее время через пролив Промойна существует постоянный водообмен залива Сиваш с Азовским морем. Ширина пролива сейчас составляет в среднем 90–100 м. В районе впадения в Азовское море пролив Промойна расширяется до 150 м и очень мелководен, здесь расположен ряд мелких островков и отмелей [Дьяков и др., 2015а].

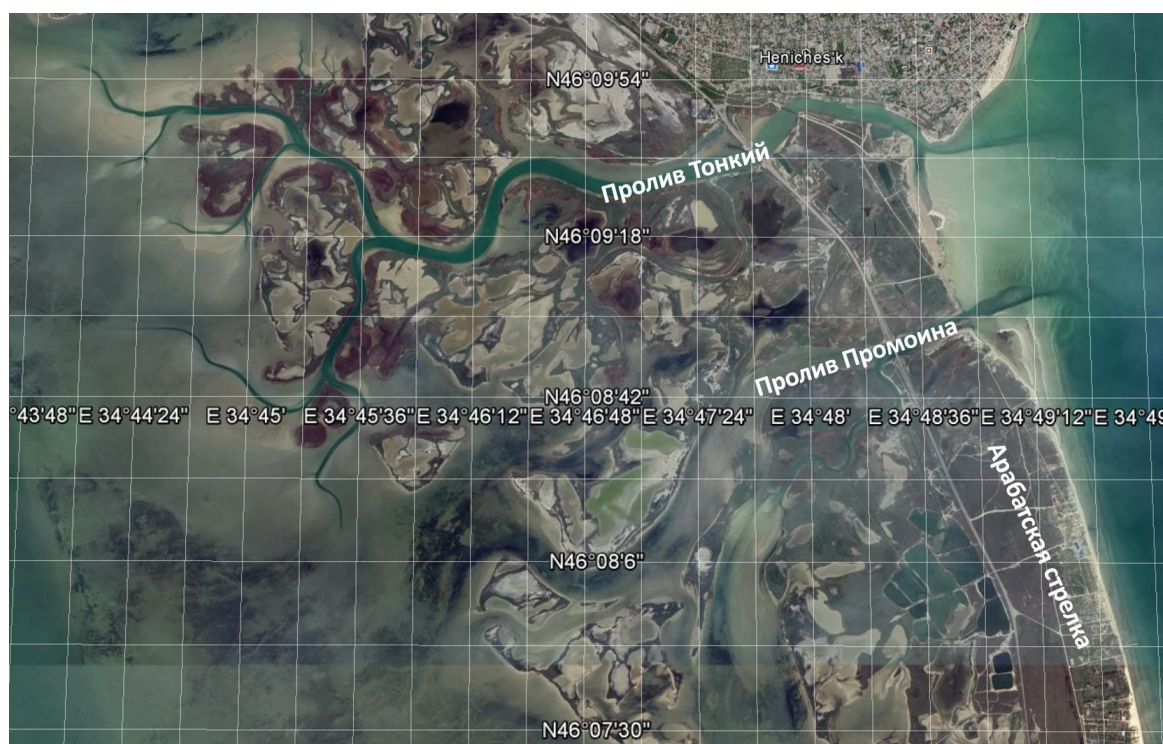


Рисунок 1.2 – Дельта Генического пролива [Google Earth]

Глубоко вдающимся с севера Чонгарским полуостровом Сиваш делится на две ветви (части): западную и восточную, которые сообщаются между собой через Чонгарский пролив длиной до 1 км, шириной 200–300 м и глубиной 0,5–1 м [Понизовский, 1965а]. Западную ветвь можно условно разделить на Западный Сиваш и Средний, или Центральный, Восточную ветвь – на Восточный и Южный [Совга и др., 2013].

Общая площадь Сиваша около 2530–2540 км², из которых на долю восточной ветви приходится 1430 км², а на долю западной – 1100 км².

Площадь островов в Сиваше составляет 9900 га, или около 4 % площади водоема, примерно 30 % из них приходится на мелкие, размером до 10 га.

Западный Сиваш ограничен Перекопским перешейком на западе и на востоке Кутаранской дамбой, которая соединяет мыс Кутара и мыс Джангара на полуострове Кок-Сокал, отделяя Средний Сиваш. Дамба построена в 1959 г. в связи с планом реконструкции Красно-Перекопского бромного завода [Стащук и др., 1964]. Дно Западного Сиваша выше уровня моря. Около 10% площади имеют отметки от +1 до +5 м. Рапа до строительства Кутаранской дамбы поступала только при нагонных течениях. Месяцами он представлял собой огромную осушку. Глубина может составлять здесь 30–40 см, в зависимости от направления ветра рапа перемещается по площади Западного Сиваша на запад или восток.

Средний Сиваш связан с Восточным Чонгарским проливом. К Среднему Сивашу относятся крупные заливы: Ярошикский, расположенный к северу от Чонгарского полуострова, Сергеевский, протягивающийся на север от пролива между островом Чюрюк и полуостровом Тюбеком, и залив Алгазы с извилистым Алгазинским проливом. Мелкими заливами на Среднем Сиваше являются Кутаранский, Китайский и Сунакский.

На Среднем Сиваше наиболее распространены участки с глубинами около 0,5 м. Залив Алгазы представляет собой осушку площадью 3,9 тыс. га, которая эпизодически заливается рапой во время нагонных ветров. В Ярошикском заливе глубина в центральной части достигает 1,2 м, севернее острова Куюк-Тук – 1,8 м, а в Сергеевском заливе средняя глубина составляет около 1 м, центральная часть залива в осевой части характеризуется глубинами от 1,5 до 2,2 м [Стащук и др., 1964].

Берега Среднего Сиваша сильно изрезаны, здесь имеется ряд островов, которые сложены суглинками четвертичного возраста. Наиболее крупные острова Русский, Чюрюк и Куюк-Тук соединяются с материком осушками, что делает их

похожими на полуострова. Выделяются небольшие острова – Мартынный, Круглый и Китайский.

В 1960 г. между полуостровами Чонгарским и Биюк-Найманским была сооружена дамба (Биюк-Найманская со шлюзом в центральной части), которая изолировала большую часть Среднего Сиваша от водообмена с остальным Сивашским бассейном. Благодаря этой дамбе Средний водоем превращен в огромный испарительный бассейн для получения рассолов высокой концентрации [Совга и др., 2013].

Восточный Сиваш на востоке ограничен Арабатской стрелкой, на юге Шакалинским сужением, на севере соединяется с Азовским морем Геническим проливом. Авторы по-разному условно делят на районы Восточный Сиваш. Так Б.С. Шустов [Шустов, 1938] – ученый, который очень подробно исследовал Сиваш и его берега предложил выделять «расширения», приуроченные к крупным заливам, разделенным полуостровами. По направлению от пролива Генического на юг к Шакалинскому сужению у устья р. Салгир Восточный Сиваш можно разделить на несколько расширений (водоемов) (Рисунок 1.3):

а) Геническое, расположенное к северу от полуострова Семеновский кут на Арабатской Стрелке;

б) Коянловское, с севера и востока ограниченное берегами Генического полуострова, острова Коянлы, а также цепью островов (Птичий, Низменный) и отмелей, тянущихся к северной оконечности полуострова Тюп-Тархана. На западе это расширение отчленяется обрывистыми берегами Чонгарского полуострова и Тюп-Джанкочем, а на юго-западе в виде Рогачинского залива вдается вглубь крымского берега;

в) Чокракское, примыкающее к Арабатской Стрелке и углубляющееся в нее Счастливецским заливом на севере. Заливы этого расширения (Балагановский и Князевский) омывают полуострова Тюп-Тархан, Тюп-Кангил и Кут; и, наконец,

г) Валокское, с заливом Черногузов на севере и заливом Кут на юго-западе, ограничивающееся с юга Шакалинским сужением [Совга и др., 2018].

Современные исследователи [Дьяков и др., 2015b; Сивашский регион ... , 2007] предлагают районировать Восточный Сиваш на плесы (Рисунок 1.4).

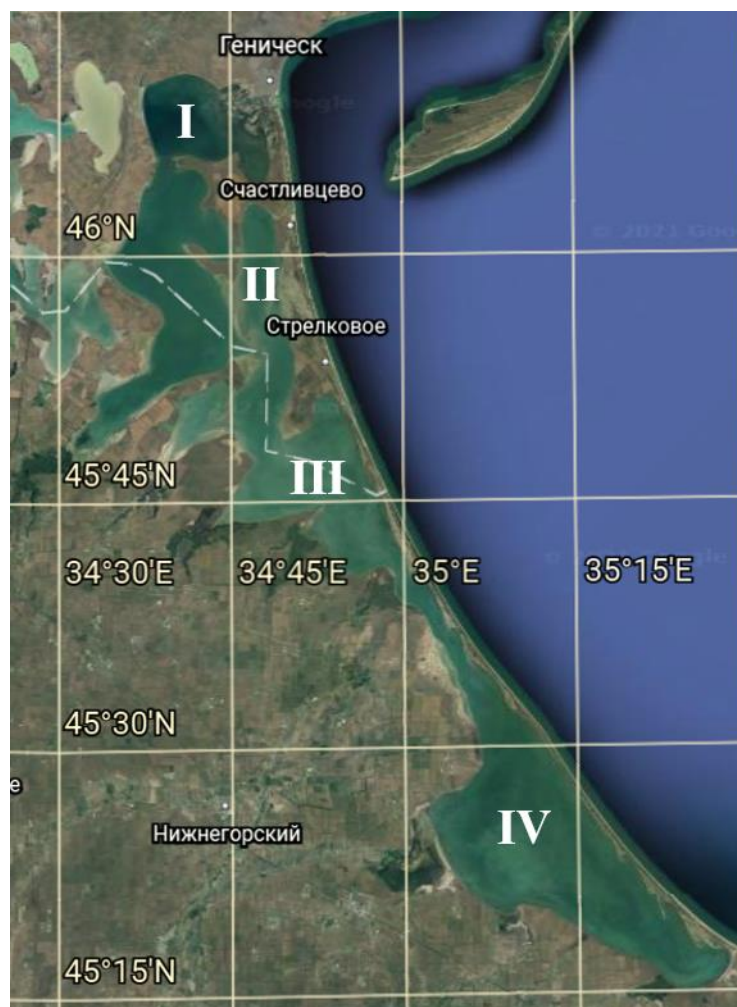


Рисунок 1.4 – Схема плесов Восточного Сиваша [Google Earth]

Плесы I и II соответствуют Геническому и Коянловскому расширению. Плес III включает Валокское и Чокракское расширения. Южный Сиваш относят к IV плесу.

Южный Сиваш имеет неправильную, вытянутую с северо-запада на юго-восток форму, сообщается с Восточным Сивашом через пролив Шакалинское сужение, или Южный пролив шириной 1,8 км и глубиной до 1,5 м [Совга и др., 2013]. Граница между ними проходит у устья р. Салгир. Площадь Южного Сиваша достигает 545 км². Из них на долю водного зеркала приходится около 500 км², на острова – 36 км² и на долю осушек – около 42 км². По площади водного

зеркала, а также по его постоянству в течение года Южный Сиваш резко отличается от других частей Сиваша. Ветер, осадки, поверхностный сток практически не оказывают влияния на величину его водной поверхности. Он глубоководнее, чем другие части водоема. Глубины свыше 2 м занимают наибольшую площадь Южного Сиваша от Южной части Шакалинского сужения и до широты с. Соляного. Однометровая изобата очень близко подходит к Арабатской Стрелке и к западному берегу Южного Сиваша – Алексеевской засухе.

В осевой части Южного Сиваша была зафиксирована максимальная глубина 3,2 м. Длина водоема по линии Рыбацкое – Шакалинский пролив около 50 км, ширина до 24 км. Южный Сиваш характеризуется слабо развитой береговой линией. Вдоль нее тянется ряд длинных островков и кос, из которых наиболее значительная отделяет Алексеевскую засуху. Все острова Южного Сиваша – наносные и представляют собой удлиненные в меридиональном направлении песчаные образования, часто изменяющие свои очертания и размеры. Площадь даже наиболее крупных из этих островов не превышает 10 га. Постепенно вырастая, острова иногда смыкаются между собой и берегом, образуя длинные косы [Стащук и др., 1964; Понизовский, 1965а].

Характерным для залива Сиваш является наличие большого количества осушек, представляющих собой ровные и плоские площади с плотным, многометровым слоем иловых отложений. Большую часть года осушки лишены рапы и заполняются рассолами при длительных ветрах соответствующего направления или при усиленном поверхностном стоке [Понизовский, 1965а].

До строительства гидротехнических сооружений основная площадь осушек приходилась на западную ветвь Сиваша. Водоем к западу от мыса Кутара представлял собой сплошную осушку площадью свыше 310 км². После строительства дамб площадь осушек в западной ветви снизилась до 153 км². В восточной ветви на долю осушек приходится около 100 км² и сосредоточены главным образом в северной части.

Дно залива подстилается илами серого и серовато-зеленого цвета, мощность которых в Западном Сиваше достигает 8–10 м, а в Восточном 15 м. В некоторых заливах Среднего водоема (например, Сергеевском и у Чонгарского полуострова) обнаружены черные лечебные грязи высокого качества. Небольшие залежи лечебной грязи найдены также в Южном Сиваше, в устьях рек и балок [Понизовский, 1965а].

В изолированной баром лагуне Сиваша формируется собственный гидродинамический режим и своя система циркуляции, которые определяются мелководностью лагуны, очертаниями берегов, шириной и водным балансом отдельных водоемов. Главной особенностью гидродинамического режима акватории Сиваша (особенно мелководных его частей) является трансформация ветрового волнения в сгонно-нагонные явления, непосредственно связанные с воздействием ветра на водную толщу мелководья. По мере обмеления лагуны сгонно-нагонные явления приобретают все более отчетливый вид. По мнению Ю.В. Артюхина [Артюхин, 1982] механизм сгонно-нагонных явлений заложен в самом процессе эволюции суглинистого берега [Sovga et al., 2018].

В замкнутой лагуне существует собственная система течений, выделяют течения двух видов. Дрейфовые течения возникают при трении ветра о воду и носят переменчивый характер в зависимости от направления ветра. Градиентные течения возникают из-за разностей уровней отдельных частей Сиваша (Генический и Чонгарский проливы, Шакалинское сужение, горловина залива Алгазы) или сгонно-нагонных явлений (стоковые течения) [Sovga et al., 2018].

С 1978 г. Сиваш внесен в Рамсарский список водно-болотных угодий международного значения, так как является неотъемлемым звеном в экологической цепи водно-болотных угодий Крыма, среди которых: Каркинитский и Джарылгачский заливы, Средний Сиваш и Восточный Сиваш, аквально-скалистые комплексы Карадага и мыса Казантип и аквально-прибрежный комплекс мыса Опук. Общая площадь водно-болотных угодий Крыма составляет более 333 тыс. га.

Водно-болотные угодья Сиваша это Восточный и Средний Сиваш (площадь, которых 165 тыс. га и 80 тыс. га) [Барабаш, 1984], представляют собой естественный комплекс, который имеет уникальную структуру и специфические системные взаимосвязи. Кроме того, водно-болотные угодья являются источником биологического разнообразия, обеспечивая водой и первичной пищей разных видов птиц, млекопитающих, земноводных, рыб, беспозвоночных [Барабаш, 1984].

После вхождения Крыма в экономическое и социально-правовое поле РФ территория водно-болотного угодья «Залив Сиваш» разделена государственной границей, уменьшились возможности проведения исследований на всей акватории водно-болотного угодья. В 2017 г. Министерство экологии и природных ресурсов республики Крым издало приказ от 18 декабря 2017 года № 2919 «Об утверждении Положения о водно-болотном угодье «Восточный Сиваш» в целях обеспечения выполнения обязательств, вытекающих из Конвенции о водно-болотных угодьях, имеющих международное значение от 02 февраля 1971 г.»

1.3 Метеорологический режим

Температура воздуха. В соответствии с климатическими условиями степного Крыма среднегодовая температура воздуха изменяется в пределах 10,1 – 10,3 °С. Абсолютный минимум температур равен -20° – -23 °С. В отдельные годы морозы достигают -28 – -32 °С. Степной Крым характеризуется жарким, полусухим летом. Температура воздуха в июле +23 – +24 °С. В отдельные годы в июле – августе она повышается до +35 – +39° С [Понизовский, 1965а].

Ветровой режим. Азовское море расположено в южной части умеренного пояса, и его климат формируется под влиянием крупномасштабных синоптических процессов: развития отрога Сибирского антициклона в холодный период года и Азорского антициклона летом [Ветро-волновые условия ..., 2017; Low-frequency variability ... , 2014]. Ветровые условия в районе залива Сиваш в общем соответствуют режиму всего Азовского бассейна [Eremina et al., 2020]. Для

него характерно большое число ветреных дней. Сезонные особенности ветрового режима выражаются в преобладании летом ветров западных румбов, которые сопровождаются повышением дефицита влажности, испаряемости и температуры; зимой наибольшую повторяемость имеют ветры восточных румбов. Ветры ускоряют процесс концентрирования рапы и определяют ее перемещение. Кроме того, они обуславливают явление сгона и нагона воды в Сиваш и Азовское море и водообмен между отдельными частями Сиваша. По данным [Слатинский, 1969], примерно 55–57 % всех случаев азовских течений в проливе Тонком наблюдаются при штиле или при слабых неустойчивых ветрах всех направлений и вызывается разницей уровней моря на концах пролива, только 20 % связано с нагонными ветрами восточного направления. Сивашские течения возникают в 90 – 92 % всех случаев при сильных сгонных ветрах западного направления [Eremina et al., 2020].

Атмосферные осадки. Одним из важнейших последствий современных климатических тенденций является изменение структуры гидрологического цикла, водности рек, уровня озер и морей [Climate change ... , 2013; Евстигнеев и др., 2010; Nohara et al., 2006]. Такие процессы происходят вследствие увеличения влагоемкости атмосферы, связанного с повышением глобальной температуры воздуха [Мохов, 2014] и, как следствие, с увеличением частоты обильных осадков, что уже отмечается в последние десятилетия [Van den Besselaar et al., 2013; Второй оценочный доклад ... , 2014; Евстигнеев и др., 2019].

Количество выпадающих на поверхность залива осадков имеет выраженный сезонный ход с максимумом в теплый сезон года (май – июль). Минимум осадков выпадает в холодный период года. [Гидрометеорологические условия ... , т. 2; Sovga et al., 2018]. В пространственном распределении количества сезонных осадков больше всего их выпадает в южной части залива Сиваш. Область минимума осадков расположена в Западном Сиваше. В многолетнем ходе количества атмосферных осадков, выпадавших на акваторию залива за вековой период, заметна тенденция к увеличению количества осадков. Атмосферные осадки являются наибольшим по величине приходным компонентом пресноводного баланса Сиваша. В среднем за многолетний период по

рассчитанным данным количество выпадающих на поверхность залива осадков за год составляет $0,72 \text{ км}^3/\text{год}$ [Дьяков и др., 2013; Agler et al., 2003].

Испарение. Высокая температура воздуха и воды, пониженная влажность воздуха в районе залива Сиваш летом и осенью приводят к интенсивному испарению воды и повышению концентрации рассолов. В условиях засушливого климата Присивашья испарение воды из залива Сиваш оказывает существенное влияние на водный баланс Сиваша, гидрологический и гидрохимический режимы.

Ежегодно с водной поверхности залива испаряются миллиарды кубометров воды. Наиболее интенсивное испарение происходит с мая по октябрь [Данильченко и др., 1954]. Результаты нескольких исследований по испарению воды в заливе Сиваш опубликованы в работах [Данильченко и др., 1954; Понизовский, 1965а; Филиппео, 1935], где была принята испаряемость рассолов Сиваша $1000 - 1100 \text{ мм}$ в год, в таком случае с водоема может испариться $2,5 \text{ км}^3$ воды, что больше объема Сиваша равного $1,93 - 2 \text{ км}^3$.

По предварительным оценкам, полученным В.П. Евстигнеевым совместно с автором настоящей работы, среднемноголетнее количество испарившейся воды за период 1966 – 2013 гг. близко к данным Понизовского, поэтому в водно-балансовых расчетах на долю испарения в настоящей работе будет принята величина $2,5 \text{ км}^3/\text{год}$.

Ледовые условия. Ледовый сезон в заливе Восточный Сиваш характеризуется значительной неустойчивостью, возможно неоднократное появление и исчезновение льда в любые по суровости зимы. Количество очищений акватории ото льда за сезон в северных районах залива происходит в среднем 5 – 6 раз, иногда доходит до 10 – 15 случаев. В центральных и южных частях залива за ледовый сезон очищения наблюдаются в среднем 2 раза (максимум 5 раз). Ледовитость в марте в умеренные и суровые зимы составляет $590 - 775 \text{ км}^2$ (41% – 54% акватории залива), а площадь, занятая припаем, $465 - 640 \text{ км}^2$. Распределение и сплоченность льда на акватории залива зависят от суровости зимы и широтного расположения плесов [Дьяков и др., 2015b; Боровская и др., 2008].

1.4 Ретроспективная оценка водно-солевого режима залива Сиваш

1.4.1 Водный баланс залива Сиваш

В ходе развития агропромышленного комплекса, залив Сиваш претерпевал и продолжает испытывать антропогенное воздействие, как и другие важнейшие подобные по своей природе и значению объекты по всему миру [Winant et al., 2011; Carstensen et al., 2015; Webster, 2010; Largier et al., 1997; Nohara et al., 2006; Accelerating loss ... , 2009; Duck et al., 2012; Wooldridge et al., 2016; Potter et al., 2010]. Особенно важные изменения произошли за последние 60 лет со строительством Северо-Крымского канала и развитием химических предприятий в Западном Сиваше.

При оценке состояния любой водной экосистемы в целом, важнейшим показателем является ее водный баланс – соотношение прихода и расхода воды на определённой территории в некоторый временной интервал. Техническим средством анализа воднобалансовых соотношений является уравнение водного баланса.

Аналізу составляющих водного баланса залива Сиваш посвящено ограниченное количество работ. Следует отметить труды А. М. Познизовского [Познизовский, 1965а; Данильченко и др., 1954], а также работы, выполненные при поддержке международной организации Wetlands International – АЕМЕ в 2000, 2005 и 2007 гг. [Марушевский и др., 2005; Современное состояние ... , 2000; Сивашский регион ... , 2007; Sovga et al., 2018] и исследования СО ФГБУ «ГОИН» [Дьяков и др., 2011, 2012, 2013, 2015а, 2015b, 2016].

Изменчивость водного баланса залива Сиваш определяется естественными и антропогенными воздействиями, такими как: изменение глобального и регионального климата, введение в эксплуатацию Северо-Крымского канала и его перекрытие, строительство дамб, динамика водообмена с Азовским морем.

После ввода в эксплуатацию СКК водно-солевой режим залива Сиваш определялся приходными и расходными статьями его водного баланса [Понизовский, 1965а; Дьяков и др., 2013].

Приходные статьи включали:

- атмосферные осадки;
- поступление азовских вод через пролив Генический;
- дренажно-сбросные воды Северо-Крымского канала и Каховской оросительной системы;
- поверхностный и подземный сток сивашского бассейна;
- фильтрация азовских вод через Арабатскую Стрелку.

Расходные статьи состояли из:

- испарение воды с акватории Сиваша;
- поступление вод Сиваша в Азовское море [Евстигнеев и др., 2019; Sovga et al., 2018].

Подробнее остановимся на рассмотрении дренажно-сбросных вод Северо-Крымского канала и Каховской оросительной системы. В 60-х годах 20-ого века в Крыму начала эксплуатироваться одна из крупнейших в Европе оросительных систем – система Северо-Крымского канала. Этот канал, длина которого составляет 400 км, являлся основным источником водоснабжения Крыма. Строительство первой очереди канала началось в 1961 г. и закончилось в 1975 г.; строительство второй очереди началось в 1977 г. и завершилось в 1986 г.; строительство третьей очереди было начато в 1986 г., но из-за сокращения финансирования осталось незавершенным [Марушевский и др., 2005; Позаченюк и др., 2014].

В 1985 г. после пуска воды в Крым по Северо-Крымскому каналу и начала интенсивного орошения сельскохозяйственных культур водоотведение дренажно-сбросных вод в залив Сиваш составило 521 млн. м³ с территории Крыма и 109 млн. м³ со стороны Херсонской области из каналов Каховской оросительной системы (КОС). С поступлением дренажно-сбросных вод с орошаемых сельскохозяйственных угодий в акваторию Сиваша и увеличением уровня в заливе уменьшился приток вод Азовского моря [Совга и др., 2018]. Так в 1980–

1982 г. приток азовских вод составил 297–342 млн. м³/год при среднемноголетнем значении 883 млн. м³/год. До 1995 г. на территории Крыма и Херсонской области сбрасывалось от 681,4 до 772,9 млн. м³/год пресных вод. Начиная с 2000 г. наблюдалось резкое снижение объемов поступления в Сиваш сточных вод, уже к 2002 году сток составил 388,0 млн. м³/год [Сивашский регион ... , 2007] (Таблица 1.1).

Развитие орошения в Присивашье вызвало значительное качественное и количественное изменение водного баланса залива. Это привело к значительному снижению минерализации вод залива, усилению изменчивости его морфометрических характеристик и динамики берегов [Михайлов, 2007, 2011, 2012, 2014], что отразилось на всей экосистеме залива.

Таблица 1.1 – Объемы дренажного и поверхностного стока, поступающие в Сиваш (млн. м³) [Сивашский регион ... , 2007]

Сток	Год					
	1985	1990	1995	2000	2001	2002
Крым, зона Северо-Крымского канала						
Полевые угодья	71,3	73,2	78,4	71,8	54,0	50,0
Рисовые чеки	251,3	233,2	214,0	97,4	72,0	69,9
Дренаж и сток рек	198,4	224,7	253,5	200,1	150,09	170,1
Всего	520,9	531,1	545,9	369,3	276,09	290,0
Херсонская область, зона Каховской оросительной системы						
Дренаж	108,8	150,3	227,0	115,0	86	98
Всего	108,8	150,3	227,0	115,0	86	98
Итого	629,7	681,4	772,9	484,3	362,09	388,0

Водообмен через Генический пролив. При нагонных течениях морская вода из Азовского моря поступает в залив Сиваш через пролив Генический, который имеет два русла – проливы Тонкий и Промоина. Вода, попадая в северную часть Восточного Сиваша, растекается двумя потоками – через

Чонгарский пролив в Западный Сиваш и через Шакалинское сужение в Южный Сиваш. При сгонных течениях часть воды вытекает в Азовское море. Режим течений в проливе Тонком определяется разностью уровней моря и залива, обуславливающей уклон уровенной поверхности в проливе в сторону Сиваша, и ветровым режимом. По данным экспедиционных наблюдений в 80-х гг. 20-го в., в 63 % случаях отмечались азовские течения, в 35 % – сивашские и только в 1 % случаев наблюдались смешанные течения [Eremina et al., 2020; Дьяков и др., 2015а; Раскин, 1992].

По расчетным данным за многолетний период (1936–2010 гг.) отток сивашских вод в Азовское море составил $0,41 \text{ км}^3/\text{год}$, приток азовских вод в Сиваш – $1,22 \text{ км}^3/\text{год}$. В отдельные годы величины стока могут существенно отличаться от среднемноголетних значений. Анализ данных показал, что произошли существенные изменения за 1970–2010 гг. в водообмене Сиваша с Азовским морем через Генический пролив [Дьяков и др., 2013]. Средняя величина стока сивашских вод в море за 1970–2010 гг. по сравнению с предыдущим периодом (1936–1969 гг.) увеличилась на $0,15 \text{ км}^3$, а притока азовских вод в залив уменьшилась на $0,51 \text{ км}^3$, величину сопоставимую с объемом сброса дренажных вод. За 1936–2010 гг. в притоке сивашских вод в Азовское море был выявлен значимый положительный тренд ($0,0024 \text{ км}^3/\text{год}$), а в оттоке азовских вод через Генический пролив отмечалась значимая тенденция к уменьшению ($0,0119 \text{ км}^3/\text{год}$). На изменения в величинах обмена сивашскими и азовскими водами через пролив оказал воздействие антропогенный фактор – сброс дренажно-сточных вод с оросительных систем [Дьяков и др., 2013; Совга и др., 2018].

Фильтрация азовских вод через Арабатскую Стрелку. Арабатская Стрелка отделяет залив Сиваш от Азовского моря и имеет длину 110 км и ширину от 0,5 до 5 км [Совга и др., 2013]. Поверхность пересыпи выше в северной ее части (до 10 м), тогда как южная часть пересыпи не подымается более чем на +3 м над уровнем Азовского моря. Южная часть пересыпи характеризуется развитием нескольких гряд с пологими склонами, разделенными ложбинами. Гряды сложены мелко- и среднезернистым песком, а днища ложбин – песчано-илистым

материалом. Как на грядах, так и в ложбинах отмечается обилие ракуши, что говорит о том, что пересыпь сложена материалом, поступившим с морского дна [Леонтьев и др., 1956].

В гидрологическом справочнике морей СССР [Гидрологический справочник ... , т. 3, вып. 3] приводятся сведения о произведенных прокопках поперек Арабатской Стрелки от Азовского моря до Сиваша, с нивелировкой уровня почвенных вод и урезов двух бассейнов, что обнаружило довольно резкое падение уровня почвенных вод в сторону Сиваша. Определения солености воды в прокопках отметили азовскую воду почти во всей ширине бара, лишь узкой полосой у Сиваша оказалась сивашская вода. При съемке солености Сиваша в 1934 г. ясно обрисовалась расположенная вдоль Арабатской Стрелки полоса с несколько менее соленой водой по сравнению с остальной частью Южного Сиваша.

Из данных приведенных А.М. Понизовским в [Понизовский, 1965а] следует, что фильтрация вод Азовского моря через Арабатскую Стрелку незначительна. Этот вывод был сделан на основании рассмотрения фактического материала – результатов зондировочного и глубокого бурения 132 скважин в части Арабатской Стрелки, примыкающей к Сивашу на всем протяжении береговой линии Южного Сиваша, а также опытов по определению фильтрационных свойств грунтов, кроме того в 1959–1962 гг. Крымской комплексной геологической экспедицией снова изучался вопрос о взаимосвязи между рассолами Сиваша и водой Азовского моря. Был рассчитан расход потока азовских вод в Южный Сиваш, составивший 7360 м^3 в сутки, или 115 тыс. м^3 в год [Понизовский, 1965а].

Сток речных вод в залив Сиваш. Суммарный сток речных вод в залив Сиваш складывается из стока рек Салгира, Сухого Индола и стока малых рек. Основную часть речного притока в Сиваш составляет сток р. Салгир (73,7 %). Сток р. Сухой Индол и малых рек составляет соответственно 8,9 % и 17,4 % суммарного стока рек в залив [Дьяков и др., 2013]. Выявлены значимые положительные тренды стока рек в залив, составлявшие за период 1936–2010 гг.

величину 1,131 млн. м³/год, за 1970–2010 гг. – 3,539 млн. м³/год. Всего за 1977–2010 гг. средний объем годового стока рек в залив Сиваш по сравнению с 1936–1969 гг. вырос почти в 2 раза – на 47,65 млн. м³/год (0,05 км³/год). Величина стока речных вод не сопоставима с величиной других составляющих пресноводного баланса залива Сиваш (сброса дренажных вод, атмосферных осадков, испарения) и существенную роль в распреснении залива не играет [Дьяков и др., 2013].

Анализ опубликованных работ по составляющим водного баланса залива Сиваш показал, что эти исследования имеют следующие недоработки:

Во-первых, во всех перечисленных работах не все компоненты водного баланса были учтены. Так в работе [Дьяков и др., 2013] не была учтена такая важная составляющая водного баланса как испарение, а анализировались те статьи водного баланса, которые, по мнению авторов, в большей степени определяются природно-климатическими факторами (атмосферные осадки, сток рек, водообмен с Азовским морем).

Во-вторых, в перечисленных работах не был сведен баланс и не рассчитывался показатель изменения объема залива (ΔV), что не позволило оценить его динамику в зависимости от влияния природно-климатических и антропогенных факторов в различные временные периоды функционирования СКК.

Все доступные опубликованные данные о компонентах водного баланса залива Сиваш за 1963–2010, были сведены в Таблицу 1.2, по этим данным в настоящей работе рассчитано изменение объема залива (ΔV) [Sovga et al., 2018].

Следует отметить, что в работе [Дьяков и др., 2013] некоторые компоненты водного баланса были рассчитаны путем осреднения данных по двум периодам – до введения в строй СКК и в период его функционирования до 2010 г., что, по-видимому, и было причиной большого разброса в полученных нами величинах ΔV .

Таблица 1.2 – Водный баланс залива Сиваш и изменение его объема за исследуемые временные периоды [Sovga et al., 2018]

Значения	Приходные статьи баланса, км ³				Расходные статьи баланса, км ³		ΔB , км ^{3*}
	Приток Азовского моря, Q_{as}	Сток рек, V_p	Атмосферные осадки, V_{oc}	Дренаж, $V_{скк}$	Сток сивашской рапы, Q_{ss}	Испарение, $V_{исп}$	
период до постройки СКК 1963–1965гг. по [Понизовский, 1965а; Данильченко и др., 1954]							
min	0,65	0,25	0,89	–	0,06	2,5	-0,77
max	1,96	0,25	0,89	–	0,43	2,5	0,17
среднее	1,01	0,25	0,89	–	0,241	2,5	-0,59
период функционирования СКК 1970–2010 гг. по [Дьяков и др., 2013; Сивашский регион ... , 2007]							
min	0,96	0,08	1,07	0,38	0,46	2,5	-0,47
max	1,01	0,11	1,09	0,77	0,47	2,5	0,01
среднее	0,98	0,09	1,08	0,57	0,465	2,5	-0,25

* - рассчитано в настоящей работе.

Как видно из Таблицы 1.2 отдельные статьи водного баланса подвержены высокой изменчивости из-за действия природно-климатических и антропогенных факторов. Особый интерес представляет величина стока азово-сивашских вод в проливе Тонком в разные периоды функционирования Северо-Крымского канала. Кроме того, авторы [Дьяков и др., 2013] использовали в качестве исходного массив данных осадков GPCP [Agler et al., 2003], представляющий собой интерполяцию данных наблюдений метеостанций на сетку $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. Известно, что процедуры интерполяции искажают статистическое распределение метеорологических величин [Haylock et al., 2008], а пространственное разрешение

глобального массива часто оказывается недостаточным для воспроизведения мезомасштабных особенностей атмосферных полей в регионах со сложной орографией. Следствием этого является не всегда высокая степень достоверности значений воспроизводимого метеорологического элемента, такого как, например, атмосферные осадки [Евстигнеев и др., 2019].

В настоящей работе проводится уточнение отдельных статей водного баланса для проведения более корректных водно-балансовых расчётов и анализа изменений, происходящих в заливе Сиваш. Результаты представлены в третьем разделе работы.

В ходе хозяйственной деятельности человека менялся гидрологический режим, изменялся уровень в заливе, в отдельных частях водоема с помощью дамб солевой режим со временем начал контролироваться искусственно. Далее рассматривается пространственная и временная динамика солевого режима в различных условиях.

1.4.2 Пространственная и временная динамика солевого режима в заливе Сиваш

Основным источником соли в водах залива Сиваш является Азовское море. Морская вода соленостью 11–12 ‰ поступает через пролив Тонкий, испаряясь концентрируется по мере отдаления от пролива Тонкого с севера на юг в Восточном Сиваше и с востока на запад в Западном Сиваше. До запуска Северо-Крымского канала в 70-е годы 20 века в самой южной части залива у пос. Соляное соленость достигала 120–140 ‰, а в самой западной части, у мыса Кугаран – 230–260 ‰ [Понизовский, 1965а]. В районе пролива Тонкого в течение 10 месяцев в году соленость воды колебалась в пределах 10–11 ‰, из-за сгонных течений повышалась в феврале – марте до 22–27 ‰.

Через Чонгарский пролив вода следует в Средний и Западный водоемы. В самом проливе среднегодовая соленость равна 40 ‰, но из-за сгонно-нагонных

явлений колеблется в большом диапазоне – от 27 ‰ до 90 ‰, увеличение солености вызывают течения из западной части Сиваша.

Западный и Средний водоемы Сиваша благодаря построенным там Кугаранской и Биюк-Найманской дамбам (Рисунок 1.5) превращены в водоемы с регулируемым гидрологическим и гидрохимическим режимом.

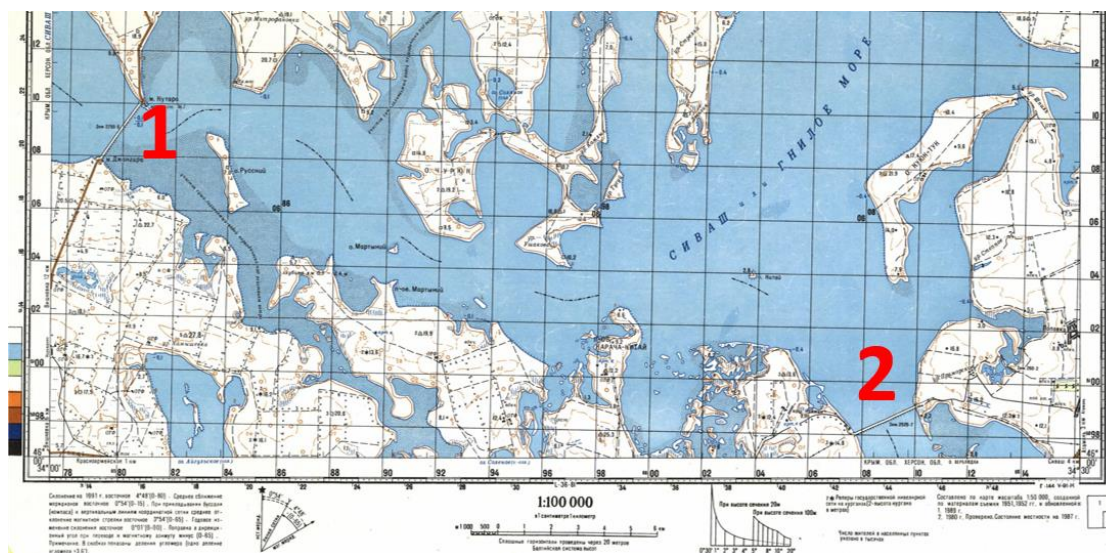


Рисунок 1.5 – Фрагмент топографической карты Западной ветви Сиваша: Кугаранская (1) и Биюк-Найманская (2) дамбы. Карта Генерального штаба СССР, издание 1991г., масштаб 1:100000

До строительства дамб Западный Сиваш большую часть года представлял собой огромную осушку, которая заполнялась водой преимущественно в период усиленного поверхностного стока и осенне-зимних нагонных течений. Многолетние наблюдения свидетельствуют о том, что в Западном водоеме концентрация рапы была значительно выше, вследствие мелководности Чонгарского пролива. Соленость была подвержена резким колебаниям – от 50 ‰ до 260 ‰, которые происходили в результате сгонно-нагонных течений. После строительства дамб изменчивость солености рассолов должна была стать стабильной и колебаться в пределах 240–260 ‰, и использоваться в качестве сырья для химической промышленности Северного Крыма.

Средний водоем с помощью дамб был превращен в огромный испарительный бассейн для подготовки рассолов высокой концентрации. Для

солевого режима Среднего Сиваша характерны сезонные колебания солености, которая в мае-июне составляет в среднем 100–120 ‰ и достигает максимума в сентябре – октябре – 190 ‰. Такое высокое повышение концентрации соли связано с нарушением водообмена с Восточным Сивашом через мелкий Чонгарский пролив в период наиболее интенсивного испарения.

До 70-х годов соленость в Восточном Сиваше с севера на юг изменялась с 10 ‰ в районе пролива Тонкого до 40 ‰ у Чонгарского моста, в районе пос. Стрелковое составляла 60 ‰, в Южном Сиваше изменялась в пределах 115–135 ‰. При этом для Южного Сиваша характерно практическое постоянство солености. Это отличает его от других частей водоема, поэтому Южный Сиваш рассматривался А.М. Понизовским как район с благоприятными условиями для создания мощной сырьевой базы для химической промышленности.

Из-за слабой связи с Азовским морем соленость Сиваша до введения в строй Северо-Крымского канала колебалась от 80 до 160 ‰, сопровождаясь повышенной концентрацией газов (сероводорода, метана и др.), образующихся в результате массового гниения водорослей. Изменение солености в плесах Восточного Сиваша, обусловленное поступлением в пределы акватории значительных объемов распресненных сбросных и дренажных вод, отражено в Таблицах 1.3 и 1.4. Если в 1955 г. средняя соленость Сиваша достигала 92 ‰, то к 1988 г. средняя соленость снизилась до 22,6 ‰, а к 1997 г. составляла около 17 ‰ [Сивашский регион ... , 2007].

Еще через десять лет в 1971–1972 гг. были проведены гидрохимические исследования Морским гидрофизическим институтом НАН Украины, после введения в строй первой очереди Северо-Крымского канала. Были организованы три экспедиции в районах Азовского моря, Восточного Сиваша в прибрежной зоне Арабатской Стрелки и некоторых районов Западного и Южного Сиваша в ноябре 1971 г. и в июле и октябре – ноябре 1972 г. Схема расположения станций представлена на Рисунок 1.6.

Таблица 1.3 – Изменение солёности Восточного Сиваша за 1955–1988 гг.
[Сивашский регион ... , 2007]

Год	Плес, солёность ‰				Средняя солёность, ‰
	I	II	III	IV	
1955	37,7	59,6	124,4	146,8	92,0
1983	16,7	28,5	27,6	29,5	25,6
1984	16,4	27,5	27,4	28,6	24,9
1985	18,1	26,0	24,9	25,1	23,5
1986	17,2	25,5	24,5	26,1	23,3
1987	18,7	26,6	20,8	18,9	21,3
1988	22,6	27,3	22,1	18,5	22,6

Таблица 1.4 – Изменение среднего значения солёности в Сиваше на посту «Соляное» [Сивашский регион ... , 2007]

Год	Солёность, ‰	Год	Солёность, ‰	Год	Солёность, ‰
1935	141,12	1964	148,36	1973	–
1936	133,76	1965	143,67	1974	–
1937	127,00	1966	134,29	1975	78,68
1947	124,03	1967	127,25	1976	80,60
1952	157,80	1968	126,08	1977	63,59
1958	152,80	1969	108,78	1978	55,37
1959	138,27	1970	97,30	1979	49,10
1962	171,30	1971	100,75	1980	42,79
1963	147,19	1972	–	1981	38,88

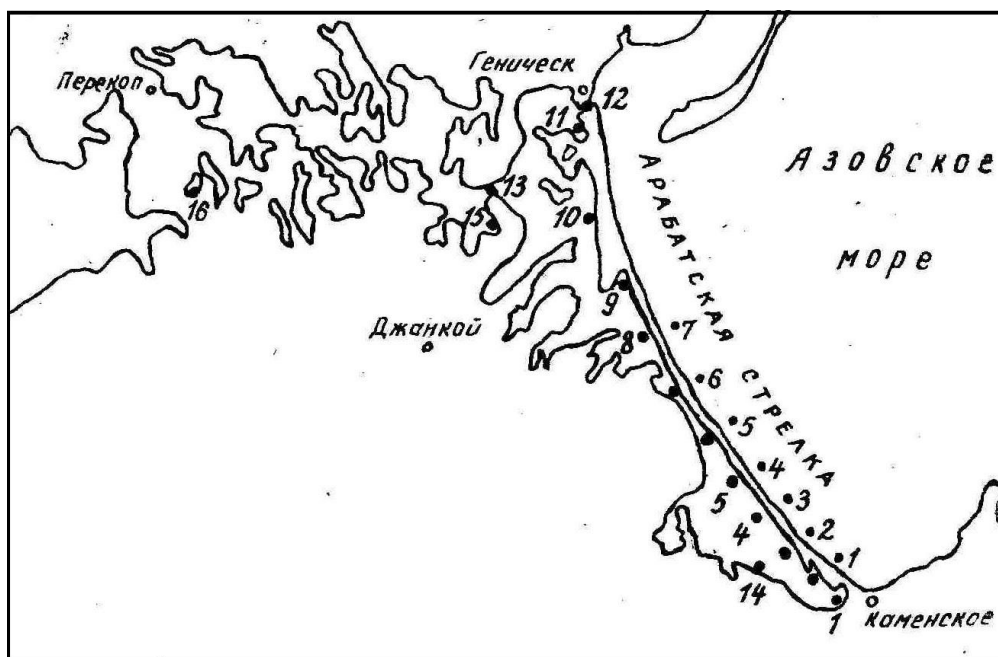


Рисунок 1.6 – Схема расположения станций в Азовском море и Сиваше осенью 1972 г. [Баранник и др., 1973]

По мнению авторов работы [Баранник и др., 1974], накопление рапы в период 1954–1974 гг. в средней и западной частях Сиваша и оз. Старое привело к снижению концентрации солей в северной части Восточного Сиваша. Почти двукратное понижение концентрации ионов в рапе Южного Сиваша по сравнению с многолетними данными обусловлено, вероятно, разбавлением рапы водами Северо-Крымского канала (Таблица 1.5). В работе [Друмева, 1991] представлены результаты исследований солевого состава залива Сиваш в проливе Геничеськом, Чонгарском проливе, в Южном и Западном Сиваше в 1988–1989 гг., выполненные с СО ФГБУ «ГОИН». По этим данным концентрация солей в Чонгарском проливе понизилась примерно в полтора раза по сравнению с началом 70-х годов. В Восточном Сиваше в районе пос. Стрелковое (Таблица 1.5) солёность также снизилась на 20–30 % по сравнению с данными 1961 г.

Таблица 1.5 – Соленость рассолов в заливе Сиваш по [Понизовский, 1965; Баранник и др., 1973; Друмева, 1991; Совга и др., 2013]

Место отбора пробы	Соленость, ‰			
	1950–1951 гг.	1961 г.	Данные МГИ 1972 г.	Данные ГОИН 1988 г.
Азовское море	10,8	10,3	11,7	12
Генический пролив	10,9	13,5	11,8	12,1
Чонгарский пролив	42,3–44	48–53	38	26,5
Район Счастливецво	52,3–61,8	58–67	47,6	–
Район Стрелкового	54,2–63,7	67–85	57,8	39,8
Район пос.Валок	85–92	89–96	61,2	–
Шакалинское сужение	94,7–97,2	100–116	69,1	–
Пос.Соляное (Южный Сиваш)	120,6–133,2	114–138	96,5	–
Мыс Кутара (Западный Сиваш)	128,4–224	137–251	201*	–

*Озеро Старое

Значительные объемы пресных вод, поступающих в 70–90-е гг. привели к снижению минерализации воды в Сиваше. Это способствовало развитию биологического разнообразия, значительно возросла продуктивность залива. Выносимые с полей биогенные элементы определили развитие водорослей, гидробионтов и кормовой базы Сиваша [Сивашский регион ... , 2007]. Следствием опреснения Сиваша являлось появление вблизи устьев балок в вершинах ингрессионных заливов и «вторичных» лагун значительных площадей развития тростниковой растительности. По данным работы [Костин, 2019], тростниковые сообщества, перемежающиеся рогозом и осоками, в 60-е гг. занимали 10–20 % акватории заливов, в 80-е гг. – уже 60–70 %, а к 90-м гг. площади тростниковой растительности покрывали 70–80 %. В тростниково-болотных комплексах тростниковые заросли имеют огромное экологическое значение – они являются важнейшим, очень специфичным биотопом с

характерным богатым набором орнитофауны. С другой стороны, снизился ресурсный потенциал Южного Сиваша, который в 60-е годы рассматривался как база для химической промышленности [Понизовский, 1965].

Современный солевой режим залива Сиваш, его пространственная и временная изменчивость, основанные на данных, полученных автором в ходе экспедиционных исследований за 2013–2020 гг., рассмотрены в четвертом разделе диссертационной работы.

Выводы к разделу 1

В первом разделе приведен полный обзор литературных данных о физико-географической характеристике залива Сиваш в условиях изменчивости природно-климатических факторов (водообмен с Азовским морем, атмосферные осадки, испарение, речной сток, фильтрация Азовской воды через бар Арабатской Стрелки) и антропогенных воздействий (дамбы, регулирующие водообмен в Западном и Среднем Сиваше, функционирование и перекрытие существующих оросительных систем).

Водно-солевой режим Восточного и Южного Сиваша определяется изменчивостью статей водного баланса залива. Так, в соответствии с данными предыдущих исследований, сбросы пресной воды оросительных систем наиболее сильно повлияли на Восточный и Южный Сиваш, что привело к уменьшению солености и росту уровня залива и в результате к снижению объемов поступления азовских вод. В итоге средняя соленость Восточного Сиваша снизилась со 141 ‰ в 1955 г. до 22,60 ‰ к 1989 г., а в 1997 г. достигла минимального значения 17 ‰.

Анализ опубликованных работ по водно-солевому режиму залива Сиваш и составляющим его водного баланса позволил выявить следующие недоработки:

Во-первых, во всех перечисленных работах не все компоненты водного баланса были учтены. Так, не была учтена такая важная составляющая как испарение, а анализировались только атмосферные осадки, сток рек, водообмен с Азовским морем.

Во-вторых, в литературе самая большая статья водного баланса залива – атмосферные осадки рассчитывались по данным наблюдений без учета систематических ошибок их измерения.

В-третьих, в перечисленных работах не рассчитывался показатель изменения объема залива ΔV , что позволило бы оценить его динамику при разных режимах функционирования СКК [Sovga et al., 2018].

На основании анализа литературных данных в первом разделе диссертационной работы автором рассчитано изменение объема залива (ΔV), делается вывод, что статьи водного баланса: водообмен через пролив Тонкий, атмосферные осадки требуют уточнения для проведения более корректных водно-балансовых расчётов и анализа изменений, происходящих в заливе Сиваш.

Показано, что при всей сложности исследуемого объекта изучение его осуществлялось фрагментарно без определенной периодичности. При этом проведенный автором анализ литературных данных позволил выделить те природно-климатические и антропогенные факторы, уточнение и корректировка которых необходима, как при установлении причин изменчивости водно-солевого режима залива, так и при расчетах его водного баланса, что будет рассмотрено в третьем разделе работы.

Основные результаты первого раздела опубликованы в статьях [Совга и др., 2013, 2018; Позаченюк и др., 2016; Sovga et al., 2018; Евстигнеев и др., 2019; Еремина et al., 2020], тезисах и материалах конференций [Ерёмина и др., 2018b; Совга и др., 2017; Ерёмина и др., 2019].

РАЗДЕЛ 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Материалы и методы оценки режима солености

2.1.1 Материалы исследований

Исследование динамики солености залива Сиваш проводилось на основе данных натурных наблюдений, полученных в ходе 18 сухопутных экспедиций в районы Восточного и Южного Сиваша с 2013 по 2020 гг. ФГБУН МГИ совместно с СО ФГБУ «ГОИН» при участии автора настоящей работы. Всего было выполнено 130 станций, на которых были отобраны пробы воды. Соленость воды рассчитывалась по плотности воды и определялась прямым измерением с помощью рефрактометра. Результаты измерений приводятся в промилле (‰).

Для анализа многолетней динамики солености также использовались ретроспективные данные в исследуемых акваториях за 1935–1988 гг. [Понизовский, 1965; Гидрологический справочник ... , т. 3, вып. 3].

В 2013 г. район работ занимал большую часть акватории Восточного Сиваша, примыкающей к Арабатской Стрелке. Схема станций представлена в четвертом разделе (Рисунок 4.1).

В ходе экспедиции на каждой станции были определены температура и соленость воды. Температура воды и воздуха определялись при помощи поверхностного термометра. Пробы воды были отобраны для дальнейшего лабораторного анализа с помощью пикнометрического и рефрактометрического методов.

В заливе Сиваш пробы отбирались на участках с глубиной 0,2–0,6 м, в Азовском море – в прибрежной зоне волнового обрушения на глубинах до 1 м. Коррекция маршрута и координаты предварительно намеченных станций осуществлялись при помощи приемника навигационной системы GPS. Всего было сделано 20 станций, обработано и проанализировано 20 проб воды.

В 2014 году Крым вошел в социально-правовое поле Российской Федерации, часть станций района Шакалинского сужения и севернее стали недоступны, кроме того, работы в приграничной зоне стали невозможны без специальных пропусков, что ограничило проведение полевых исследовательских работ.

В 2014–2016 гг. было реализовано еще 5 сухопутных экспедиций. Количество станций было меньше. Для работ были выбраны точки в заливах: Рогачинский, Князевский, Балагановский, а также в районе, расположенном севернее Шакалинского сужения [Совга и др., 2018]. Схема станций приведена в четвертом разделе (Рисунок 4.2.). Всего было сделано 22 станции и проведено 44 определения солености.

В Южном Сиваше также выполнялись экспедиционные работы в 2015–2017 гг. Совместно с СО ФГБУ «ГОИН» было проведено 8 экспедиций, схема станций приведена в четвертом разделе (Рисунок 4.4, а). Контрольная станция находилась в районе Арабатской крепости, другие станции располагались севернее по Сивашскому побережью Арабатской Стрелки. Всего было сделано 17 станций и 34 определения солености и температуры воды.

В период 2018–2020 гг. ФГБУН МГИ были проведены 4 комплексные экспедиции в районы Восточного и Южного Сиваша (Рисунок 2.1). Всего было выполнено 54 станции, на каждой из них проводили определения солености рефрактометрическим методом и комплексом «Кондор».

В диссертационной работе также приведены и проанализированы данные, предоставленные ПАО «Крымский содовый завод», полученные в ходе ежегодного мониторинга районов Западного, Среднего и Восточного Сиваша [Совга и др., 2018]. В соответствии с устным сообщением главного геолога ПАО «Крымский содовый завод» И.П. Сокольчик, приведены осредненные среднегодовые данные содержания NaCl (кг/м^3) за 2000–2017 гг. Осреднение дается по трем районам (Западный, Средний и Восточный Сиваш). Всего проанализировано 54 определения.

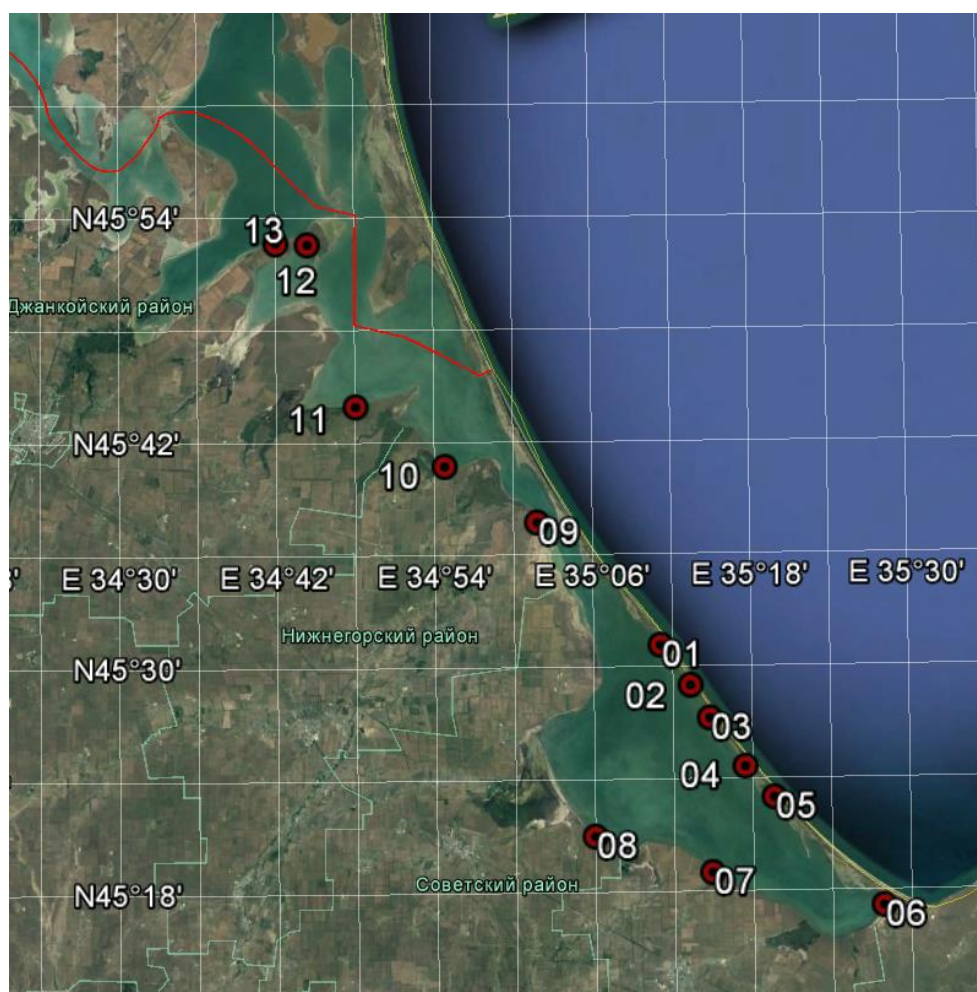


Рисунок 2.1 – Район проведения комплексных экспедиций в залив Сиваш в 2018–2020 гг. Красная линия – граница РФ

2.1.2 Методика определения солености

В диссертационной работе соленость воды в Сиваше определялась несколькими методами: рассчитывалась по плотности воды и прямым измерением с помощью рефрактометра. Зависимость между плотностью высокоминерализованных природных вод и соленостью можно выразить через уравнение прямой (2.1) [Понизовский, 1965a]:

$$d_{20} = 1 + 0,00072 * S, \quad (2.1)$$

где d_{20} – плотность при 20°C, г/мл;

S – соленость, ‰.

Плотность – одна из наиболее важных характеристик природных вод, используемая при интерпретации их гидрохимического состава. Плотность природных водных растворов колеблется в пределах 1,000–1,400 г/см³, возрастая с увеличением минерализации.

Плотность воды также зависит от температуры. Эта зависимость определяется коэффициентом объемного теплового расширения α , показывающим, какую часть первоначального объема тела при 0°C составляет изменение объема при изменении температуры на 1°C [Справочник химика, т. III, 1966]. Так как плотность вещества сильно варьирует в зависимости от температуры, то её точное измерение (0,1–0,2 °C) является непременным условием при определении плотности.

В практике исследования высокоминерализованных природных вод, в частности залива Сиваш, обычно применяются следующие методы определения плотности:

- пикнометрический;
- ареометрический.

В настоящей работе для определения плотности использовался пикнометрический метод [Методические указания ... , 2014]. Пикнометрический метод является наиболее точным, позволяющим выполнять измерения плотности растворов до четвертого – пятого знака после запятой при измерениях в лабораторных условиях. Метод не имеет ограничений в измерении предельных концентраций солей [Ломакин и др., 2014a].

Принцип метода основан на определении массы пробы рассола, помещенной в пикнометр – специальный стеклянный сосуд определенной формы с известным объёмом. Зная массу пробы рассола и объём пикнометра, рассчитывают плотность как массу единицы объёма вещества. Применение пикнометра и современных электронных аналитических весов позволяет определять относительную плотность с точностью до 0,0005 г/см³ [Овсяный и др., 2004; Ломакин и др., 2014a].

Для определения плотности растворов применяют пикнометры двух типов:

- пикнометр Рейсшауэра (ПЖ-1) вместимостью от 1 до 50 см³;

– пикнометр Гей-Люссака (ПЖ-3) вместимостью от 10 до 100 см³ [Ломакин и др., 2014а].

Основные элементы техники измерения плотности растворов описаны в ряде руководств [Методы анализа ... , 1964; Резников и др., 1954; Воскресенский, 1964; Данильченко и др., 1954].

Определяют массу чистого пустого пикнометра ($m_{\text{п}}$) с пробкой с точностью до 0,0002 г. Заполняют взвешенный сухой пикнометр лабораторной водой несколько выше метки (при температуре измерений 20°C), закрывают его пробкой и помещают в суховоздушный термостат, поддерживающий температуру измерений с точностью до десятых долей градуса. После 30-минутной выдержки в термостате при температуре $20 \pm 0,1^\circ\text{C}$ уровень воды в пикнометре быстро доводят до метки и не вынимая из термостата отбирают излишек воды пипеткой. Пикнометр снова закрывают пробкой, термостатируют еще 15 мин, проверяют соответствие уровня жидкости метке, протирают снаружи досуха чистой мягкой тканью [Пассет и др., 1981] оставляют на 10 мин за стеклом футляра аналитических весов, а затем взвешивают. После рассчитывают среднюю массу воды в объёме пикнометра.

Объём пикнометра вычисляют по формуле:

$$V_{\text{п}}^t = (m_2 - m_{\text{п}}) / \rho_w^t, \quad (2.2)$$

где m_2 – масса пикнометра с лабораторной водой при температуре t , г;

$m_{\text{п}}$ – масса пустого пикнометра, г;

ρ_w^t – плотность воды при той же температуре, г/см³.

Массу пикнометра (m_2 , г) с лабораторной водой при температуре испытаний t вычисляют по формуле (2.3):

$$m_2 = m_{\text{п}} + \rho_w^t \cdot V_{\text{п}}^t, \quad (2.3)$$

где ρ_w^t – плотность лабораторной воды при температуре t , г/см³;

$V_{\text{п}}^t$ – объём пикнометра, см³.

Далее пикнометр наполняется рассолом, выдерживается в термостате и взвешивается, показания записываются в журнал измерений.

По разности масс пикнометра с рассолом ($m_{п+р}$) и пустого пикнометра ($m_{п}$) получаем массу рассола в объёме пикнометра при температуре измерений (t) по формуле:

$$m_p^t = m_{п+р} - m_{п}, \quad (2.4)$$

Массу рассола (m_p^t) делят на объём пикнометра ($V_{п}^t$) и получают массу 1 см³ рассола при температуре измерений (t), или плотность рассола (2.5):

$$\rho_p^t = \frac{m_p^t}{V_{п}^t} \cdot \rho_w^t, \quad (2.5)$$

где ρ_p^t – плотность рассола при температуре измерений (t), г/см³;

m_p^t – масса рассола при температуре измерений (t), г;

$V_{п}^t$ – объём пикнометра при температуре измерений (t), см³;

ρ_w^t – плотность лабораторной воды при температуре измерений (t), г/см³.

Отбор проб, обращение с ними и хранение производился в соответствии с требованиями нормативных документов ГОСТ 17.1.5.05-85, ДСТУ ISO 5667-1:2003, ДСТУ ISO 5667-2:2003, ДСТУ ISO 5667-3:2001, ДСТУ ISO 5667-9:2005 [Методические указания ... , 2014].

Рефрактометрический метод основан на использовании оптического прибора рефрактометра, предназначенного для определения солёности по измеренному показателю преломления света. Этот метод показал себя как экспресс метод для ориентировочных определений солёности в полевых условиях, и является более точным при применении температурной коррекции измерений. Метод имеет ограничения в измерении предельных концентраций солей – от ≥ 30 ‰ до ≤ 230 ‰.

Для оперативного измерения солености в пробах воды, полученных в ходе экспедиций, использовался рефрактометр модели REF201 [Позаченюк и др., 2016; Sovga et al., 2020].

Перед использованием прибор калибровали с помощью дистиллированной воды, выдержанной в термостате при 20°C. После того как прибор калиброван, он готов к использованию. Инструмент очищают и на призму капают 2–3 капли рассола с температурой 20°C. Закрывают пластину для дневного света и снимают показания солености для каждой пробы трижды. Измерения записываются в протокол.

2.2 Материалы и методы спутниковых наблюдений

В связи с приграничным положением объекта исследования доступ к нему в настоящее время в значительной степени ограничен. Систематические наблюдения за всей акваторией залива Сиваш могут выполняться только с применением дистанционных методов исследования [Совга и др., 2018]. В зависимости от задач использовались различные наборы спутниковых данных. Спутниковая информация анализировалась для исследования особенностей пространственного и временного распределения температуры поверхности воды, характерных черт, и продолжительности ледового режима в заливе Сиваш, для оценки возможного проникновения вод Азовского моря в залив Сиваш через бар Арабатской Стрелки, изучения изменчивости морфометрических характеристик залива Сиваш и динамики тростниковой растительности после перекрытия СКК [Щурова, 2013, 2014; Щурова и др., 2015, 2016a, 2016b; Shchurova et al., 2016; Ерёмкина и др., 2017b, 2018c, 2018d, 2020].

Для анализа температурного режима залива Сиваш использовались данные массива NASA [Архив Giovanni] о среднемесячных значениях температуры поверхности моря (ТПМ) за 2003–2016 гг. с осреднением в пределах акваторий Южного Сиваша, Восточного Сиваша, Западной части Азовского моря. Всего было построено более четырехсот полей температуры поверхности воды. В

дополнение использовались данные Морского портала МГИ РАН [Морской портал МГИ]: NOAA, MetOp (AVHRR).

Для исследования ледового режима залива Сиваш использовались спутниковые данные сканеров MODIS спутников Terra (EOS AM) и Aqua (EOS PM) [Архив Giovanni, Совга и др., 2018]. Спектрорадиометр MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) является одним из ключевых инструментов на борту американских спутников серии EOS (Terra (EOS AM-1) и Aqua (EOS PM-1)). MODIS имеет 36 спектральных каналов с 12-ти битным радиометрическим разрешением в видимом, ближнем, среднем и тепловом инфракрасном диапазонах [Малинников и др., 2008]. Он осуществляет постоянную съемку поверхности Земли с периодом от 1 до 2 дней, из 36 каналов два канала (1, 2) имеют пространственное разрешение 250 метров, 5 каналов (3–7) имеют разрешение 500 м, остальные каналы (8–36) обладают пространственным разрешением 1000 м. Полоса обзора сенсора MODIS составляет порядка 2330 км [ГК «СКАНЭКС»]. Данные сканеры выполняют съемку местности 1–2 раза в день, что решает задачу мониторинга показателей температуры и ледовых условий в Сиваше. Для оценки продолжительности ледового режима и пространственных особенностей ледовых условий в заливе Сиваш были выбраны 2006, 2008, 2012, 2014, 2015, 2016 гг. [Совга и др., 2018]. В эти годы наблюдался ледовый покров в Азовском море и заливе Сиваш, по спутниковым данным температура поверхности моря опускалась ниже нуля. Из всех снимков отбирались изображения, выполненные с декабря по март, на которых залив хорошо просматривался, не перекрывался облачностью. Всего было отобрано около 200 снимков.

Для анализа изменения положения береговой линии, затопляемых и осушаемых территорий залива Сиваш во время функционирования СКК (период с 1984 по 2013 гг.) и после его перекрытия (с 2014 г.) была проведена выборка [Совга и др., 2018; Ерёмина и др., 2017b] космических снимков спутников серии Landsat сканеров TM (Landsat-5), OLI/TIRS TM (Landsat-8) на портале Геологической Службы США (USGS) [Геологическая Служба США], полученных в безоблачную погоду. При отборе изображений учитывались гидрологические

характеристики объекта изучения. Отбирались изображения, полученные во время летнего сезона и, соответственно, минимального уровня воды, а также во время весеннего сезона, когда уровень в Сиваше наибольший [Совга и др., 2018; Ерёмина и др., 2017b]. Так как при сгонно-нагонных явлениях берега Сиваша могут осушаться на десятки метров, отбирались изображения, полученные при штилевых условиях или при скорости ветра не более 2 м/с согласно данным морской гидрометеорологической станции «Геническ» [Архив метеоданных]. Проводилось RGB комбинирование снимков, сделанных в разное время для одной территории. Этот метод и его преимущества были описаны в работе [Станичная и др., 2016]. Некоторые результаты исследования сезонной и многолетней динамики береговой линии залива Сиваш были приведены в работах автора настоящей работы [Станичная и др., 2015; Shchurova at al, 2016; Ерёмина и др., 2017b, 2018c, 2018d]. Данная методика позволяет выделить изменение береговой линии во времени. Для четкого выделения границы суша – водная поверхность использовалось сопоставление снимков в инфракрасном канале, так как излучение инфракрасного участка спектра практически полностью поглощается тонкой пленкой воды, не проникая в глубину, что дает резкий контраст между водоемами и объектами суши [Станичная и др., 2016; Ерёмина и др., 2017b, 2018c, 2018d]. Обработка изображений осуществлялась в свободно распространяемой программе BEAM VISAT 5.0 [<http://www.brockmann-consult.de/cms/web/beam/>]. В ходе обработки снимки интерполировались на сетку с шагом, соответствующим 30-ти метровому разрешению, затем комбинировались в форме RGB изображения, где на красный канал подавались снимки, сделанные в более позднее время, а на синий и зеленый каналы – сделанные в более ранние периоды. Полученные композиты позволили выделить обмелевшие участки ранее затопленной суши, появившиеся острова и осушки красным цветом, а участки суши, которые со временем стали затопленными – голубым цветом (Рисунок 2.2) [Ерёмина и др., 2017b, 2018c, 2018d]. Всего было составлено около 30 композитных снимков за 1984–2016 гг., из них выбрано около 10 снимков для

качественной оценки сокращения водоемов Присивашья, рисовых чеков и других изменений прибрежной территории залива Сиваш.



Рисунок 2.2 – Пример комбинации двух космических снимков, выполненных в разное время: белым цветом выделена суша; черным цветом – водная поверхность; красным цветом – обмелевшие участки ранее затопленной суши; голубым – затопленная суша

Анализ спутниковых снимков позволяет получить описательно-распознавательные образы водоемов, главным образом в виде морфометрических характеристик: площади водного зеркала S_z и ее контура. Зная площадь, максимальную и среднюю глубину $H_{ср}$, можно получить объем водного тела $V = S_z \cdot H_{ср}$. Характеристики V и S_z позволяют рассчитать так называемую удельную поверхность S_z/V . Этот параметр характеризует обмен веществом и энергией между водоемом и окружающей средой [Ястреб и др., 2007; Ерёмина и др., 2017b, 2018c, 2018d].

Для решения поставленной задачи с помощью свободной геоинформационной системы QGIS (Quantum GIS) проводилось RGB-

комбинирование снимков из каналов: ближнего инфракрасного (ИК) (SWIR 3) (2,100–2,300 мкм), ближнего ИК (SWIR 2) (1,560–1,660 мкм) и красного видимого канала (0,630–0,680 мкм). Излучение ближнего инфракрасного участка спектра практически полностью поглощается тонкой пленкой воды, не проникая в глубину, что дает резкий контраст между акваториями и объектами суши. В данном диапазоне хорошо отслеживается береговая линия, что позволяет достаточно четко выделить границу суша – море [Лабутина, 2004]. Представленная комбинация снимков позволяет с большой точностью дешифровать как пресные, так и гиперсолёные водные объекты внутри суши [Ястреб и др., 2012]. Далее проводилась оцифровка береговой линии Восточного Сиваша, прибрежных лагун, водоемов и рисовых чеков, заливавшихся водой во время действия СКК. Полученные данные позволили рассчитать площади водного зеркала (S_z), объемы вод (V) и удельную поверхность (S_z/V) рассматриваемых водных объектов [Ерёмина и др., 2017b, 2018c, 2018d].

Изучение динамики тростниковой растительности было выполнено по данным цифровых многозональных спутников Sentinel-2 L1C. Использовались RGB-композиции с сочетанием каналов 11:8:4. Снимки Sentinel выполнены с 2015 по 2020 гг. в вегетативный период с мая по июнь сопоставлялись с осенними снимками. Всего было отобрано около 40 снимков. Для идентификации тростниковой растительности на снимках при выборе эталона использовались красные и инфракрасные каналы. Полученные таким образом снимки, в отличие от снимков в естественных цветах, позволили отделить чистую поверхность воды от суши и растительности. Надежность в определении эталона тростниковой растительности обеспечивалась также визуальным анализом и полевым дешифрированием в ходе рекогносцировочных маршрутов. Анализируемая территория включала в себя акваторию заливов Князевского и Балгановского (в Восточном Сиваше) и район Алексеевской засухи (Южный Сиваш). Именно для этого региона характерен наибольший объем поступления сточных и дренажных вод в Сиваш, и как следствие значительное развитие тростниковой растительности [Ерёмина и др., 2020].

2.3 Материалы и методы, использованные для оценки составляющих водного баланса

2.3.1 Материалы и методы, использованные для расчета количества осадков

В настоящей работе приводятся режимные оценки сумм осадков в районе залива Сиваш, рассчитанные на основе откорректированных данных четырех береговых метеостанций: Джанкой, Владиславовка, Геничesk, Стрелковое. Получены значения месячных, сезонных и годовых сумм осадков в период с 1966 по 2013 гг., данные представлены в мм и единицах объема – км³.

Осадки, поступающие на поверхность водного объекта, рассчитываются, как правило, по показаниям осадкомера Третьякова [Толмачева и др., 2017] на близлежащих метеорологических станциях. Измеренное количество осадков имеет систематическую погрешность, связанную с ветровым недоучетом, испарением, смачиванием внутренней поверхности осадкомера, кроме того, необходимо учитывать величину «ложных осадков», попадающих в осадкомер во время низовой и общей метели. По данным предыдущих исследований для Северного Каспия [Остроумова, 2015] и Азовского моря величина отклонения измеренных осадков от действительных значений в среднем составляет 15–16 %, в отдельные годы отклонение может достигать 60 % от годовой суммы [Евстигнеев и др., 2018, 2019].

Существуют два способа корректировки величин атмосферных осадков в разработке которых участвовали Государственный гидрологический институт и Главная геофизическая обсерватория (ГГИ-ГГО) [Богданова и др., 2002] и ГГО совместно с Казахстанским научно-исследовательским гидрометеорологическим институтом (КазНИГМИ) [Браславский и др., 1980]. В настоящей работе использована методика корректировки осадков ГГО-КазНИГМИ.

Согласно методике, определение действительного количества атмосферных осадков выполняется по формуле:

$$P_{ис} = K \cdot (P_{из} + \Delta P - \Delta P_{мет}), \quad (2.6)$$

где K – коэффициент, учитывающий влияние аэродинамических факторов на результат измерения осадков;

$P_{из}$ – результат измерения осадков по измерительному стакану (если измеренное количество осадков отмечено как следы, то величина $P_{из} = 0$), мм;

ΔP – поправка, компенсирующая эффект воздействия процессов испарения, конденсации и смачивания внутренней поверхности осадкомера, в том числе при $P_{из} = 0$, мм (приводится в таблицах для всех метеостанций СССР [Браславский и др., 1980]);

$\Delta P_{мет}$ – поправка, учитывающая количество «ложных осадков», попавших в осадкомер во время общей и низовой метели, мм (приводится в таблицах для всех метеостанций СССР [Браславский и др., 1980]).

Применение закона Дальтона к расчету величин испарения из осадкомерного ведра позволило правильно учесть изменение испарения в различное время суток при различной широте и высоте местоположения метеостанции

В среде статистического программирования R Software [R Core Team ... , 2013] был реализован алгоритм внесения поправок в исходные, первичные материалы наблюдений за осадками в зависимости от метеорологических условий. На основании программного кода был произведен расчет действительных сумм осадков на 4-х станциях Присивашья и проведено сравнение полученных величин с данными наблюдений. Сравнение проводилось по среднемноголетним суммам осадков за сезон и за год, рассчитанным за период 1966–2013 гг. для станций Геническ, Стрелковое, Владиславовка и Джанкой (Рисунок 2.3) [Евстигнеев и др., 2019].

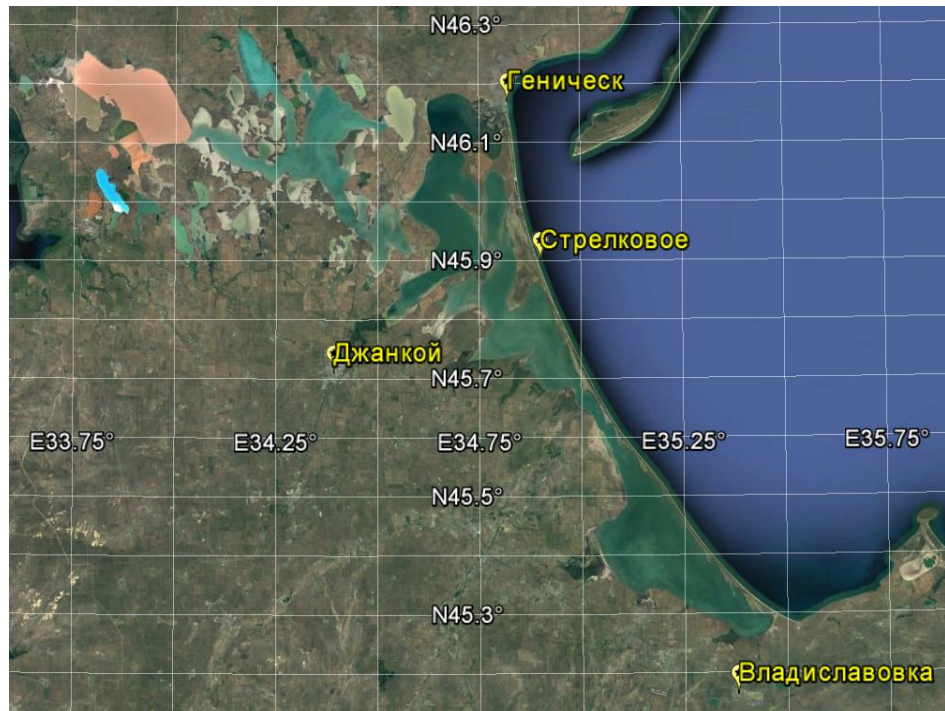


Рисунок – 2.3 Схема расположения метеостанций
в районе залива Сиваш

Между исходными и действительными величинами осадков, просуммированных по месяцам, сезонам и за год, рассчитывались абсолютные отклонения, а также среднее квадратичное (σ) и относительное (ε) отклонения по формулам:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - P_{из i})^2 / n - 1}, \quad (2.7)$$

$$\varepsilon = \frac{|\bar{P} - \bar{P}_{из}|}{\bar{P}_{из}} \cdot 100\% \quad (2.8)$$

где n – число месяцев (сезонов, лет), использованных в расчете;

$\bar{P}_{из}$ – среднеголетняя сумма осадков за месяц (сезон, год), мм.

Также в настоящей работе при оценке тенденций изменения режима поступления атмосферных осадков в залив были рассчитаны линейные тренды непараметрическим методом робастного линейного сглаживания с использованием оценочной функции Тейла-Сена [Sen, 1968]. Значимость трендов устанавливалась на основе теста Манна-Кендалла на уровне 10 %. Применение

оценочной функции Тейла-Сена обусловлено возможным наличием «выбросов» в выборке сумм осадков, несимметричностью и гетероскедастичностью их распределения [Евстигнеев и др., 2019].

Используя методику корректировки осадков ГГО-КазНИГМИ [Браславский и др., 1980], были произведены расчеты действительных сумм осадков на станциях Присивашья и проведено сравнение полученных величин с данными наблюдений (Рисунок 2.4). Сравнение проводилось по среднегодовым суммам осадков за месяц, сезон и год, рассчитанным с 1966 г.

Начиная с этого года, измерение осадков на метеостанциях стало выполняться 4 раза в сутки (на постах 2 раза в сутки) строго в заданные сроки независимо от состояния погоды. Следует учесть, что в разные годы в первичные материалы наблюдений вводились группы поправок в порядке, не соответствующем логике процессов осадконакопления. В частности, в методиках 60-х и 70-х гг. 20-го в. предполагалось умножение коэффициента ветрового недоучета на величину измеренных осадков плюс поправка на смачивание, поправка же на испарение прибавлялась к этому произведению. В результате ряды атмосферных осадков являются неоднородными, а информация о введенных поправках в исторических массивах данных не хранилась [Браславский и др., 1980; Евстигнеев и др., 2019].

Для получения действительных сумм осадков из исходных срочных данных предварительно исключались поправки, введенные на метеорологических станциях. На следующем этапе вводились поправки согласно методике ГГО-КазНИГМИ [Браславский и др., 1980; Евстигнеев и др., 2019].

Для месяцев зимнего сезона отмечены значительные отклонения количества действительных осадков от количества измеренных. В отдельные месяцы это отклонение может достигать 50–60 мм на всех станциях, кроме станции Джанкой, где максимальные различия в месячных суммах составляют величину не более 40 мм. Наибольшие различия между измеренными и действительными значениями получены по данным станции «Геническ». В среднем величина недоучета для указанных месяцев составляет от 6 мм (станция Джанкой) до 12 мм (станция

Геническ), при этом среднеквадратичное отклонение (σ) выше и составляет от 8 мм (станция Джанкой) до 17 мм (станция Геническ). Основной вклад в поправку к измеренным осадкам в холодный период оказывает ветровой недоучет [Евстигнеев и др., 2019].

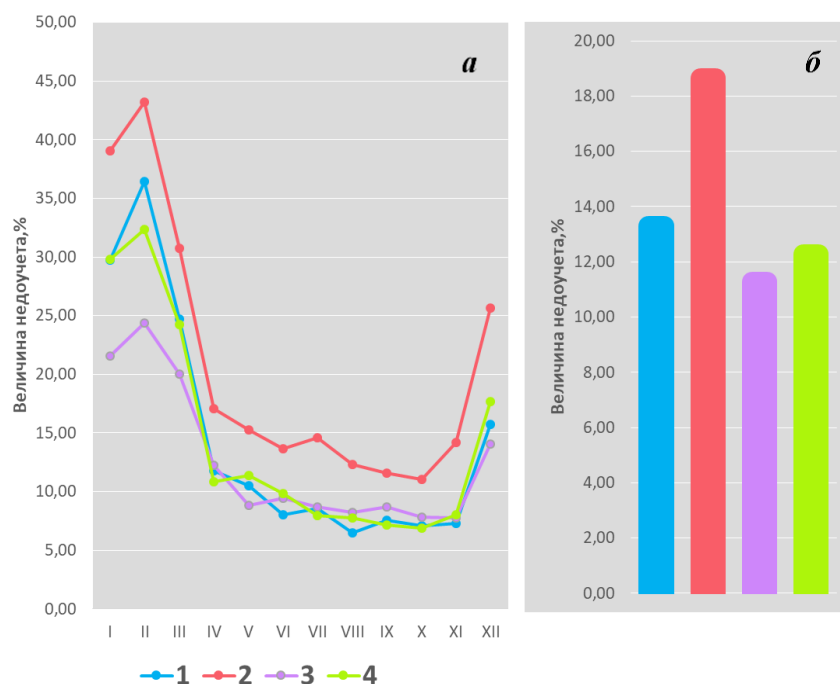


Рисунок 2.4 – Недоучет месячных (а) и годовых (б) сумм осадков для береговых станций залива Сиваш: 1 – Владиславовка; 2 – Геническ; 3 – Джанкой; 4 – Стрелковое [Евстигнеев и др., 2019]

Сильные ветры, в особенности на побережье Азовского моря, приводят к увеличению аэродинамического поправочного коэффициента. Так, например, на той же станции «Геническ» среднемноголетняя скорость ветра составляет 4,1 м/с (по данным за период 1966–2013 гг.). В этот же период на станции Джанкой она составила всего 2,3 м/с. Стоит отметить, что динамика скоростей ветра на станции «Геническ», возможно, не отражает естественно-климатическую изменчивость ветровых условий, а, скорее всего, связана с присутствующей в рядах сложно устранимой ошибкой. В частности, в период 1980–2000 гг. на станции в Геническе был отмечен рост скорости ветра, в то время как для большинства станций региона тренд скоростей был отрицательным (как, впрочем, и за

последние 50 лет). Вероятно, это связано с постепенным изменением степени защищенности метеоплощадки, что подтверждается данными об условиях производства наблюдений и отражено в техническом деле станции. Однако именно такие скорости ветра определяли фактические условия сбора осадков на станции «Геническ», к ряду измеренных осадков которой были введены наибольшие поправки [Евстигнеев и др., 2019].

В теплый период года максимальный недоучет в месячных суммах действительных осадков не превышал 20 мм, в летний период и того меньше – 10–12 мм. Средний недоучет действительных сумм осадков за месяцы с апреля по ноябрь составляет величину от 3 мм на метеостанции в Стрелковом до 5 мм в Геническе. Среднеквадратический недоучет σ для этих месяцев варьирует от 4 до 6 мм для тех же станций [Евстигнеев и др., 2019].

В годовых величинах недоучет действительных осадков варьирует в среднем от 54 мм на станции Джанкой до 84 мм в Геническе, среднеквадратичное отклонение годовых сумм находится практически в тех же пределах. В отдельные годы суммы действительных осадков могут отличаться на 100–180 мм [Евстигнеев и др., 2019].

Оценка влияния недоучета может быть дана по величине завышения действительных сумм осадков по отношению к существующей норме. Относительный вклад величины недоучета, рассчитанный по среднегодовым суммам действительных и измеренных осадков за месяц и за год, иллюстрирует Рисунок 2.4.

Для всех метеорологических станций наибольшая величина относительного недоучета приходится на холодный период года. Для января – марта, вследствие использования только измеренных осадков, ошибка оценки их действительного количества составит от 20% (ст. Джанкой) до 43 % (ст. Геническ) от нормы измеренных осадков (Рисунок 2.4, а), за теплый период (с мая по октябрь) величина недоучета не превышает 15 %.

В годовых величинах недоучет среднемноголетних годовых сумм осадков по данным четырех метеорологических станций колеблется в пределах 14–19 % (Рисунок 2.4, б) [Евстигнеев и др., 2019].

2.3.2 Материалы и методы, использованные для расчета расходов воды в проливе Тонком

В работе был проведен анализ расходов воды в проливе Тонком в период 1966–2013 гг., рассчитанных по данным уровня (см), направления и скорости ветра (м/с) на МГ Геническ и МГП Чонгарский мост. Расчет расходов азотовых вод через Тонкий пролив осуществлялся по двум методикам: Ю.Г. Слатинского [Слатинский, 1969] и Л.Г. Раскина [Раскин, 1992]. Данные приводятся в объемных единицах, км³ [Ерёмина и др., 2019; Eremina et al., 2020].

Суть первого метода заключалась в том, что на основе большого количества данных измерений, выполненных в период 1961–1964 гг., была установлена зависимость направления и скоростей течений в проливе Тонком от высоты стояния уровня в Геническе:

$$Q = f(H) \quad (2.9)$$

где Q – расход через поперечное сечение пролива, м³/сек,

H – высота уровня в Геническе, см [Eremina et al., 2020].

Были построены эмпирические кривые связи для разных ветровых условий (Рисунок 2.5). Основная кривая 1 – кривая маловетрия, используется для расчетов стока при штиле и ветрах всех направлений со скоростью до 6 м/с. Хотя штилевые условия имеют весьма малую повторяемость, средние скорости ветра над проливом относительно невелики. Кривая 2 применяется для расчетов при нагонных восточных ветрах со скоростью более 6 м/с. Кривая 3 используется при сгонных западных ветрах аналогичной силы. По данным измерений северные и южные ветры никакого влияния на скорость и направление течения не оказывают,

так как при ветрах этих направлений проекция скорости ветра на ось пролива близка к нулю. В этих случаях также используется кривая 1 [Слатинский, 1969]. Сравнение расчетных величин расходов и результатов наблюдений показало, что отклонение в среднем не превышает $\pm 5\%$.

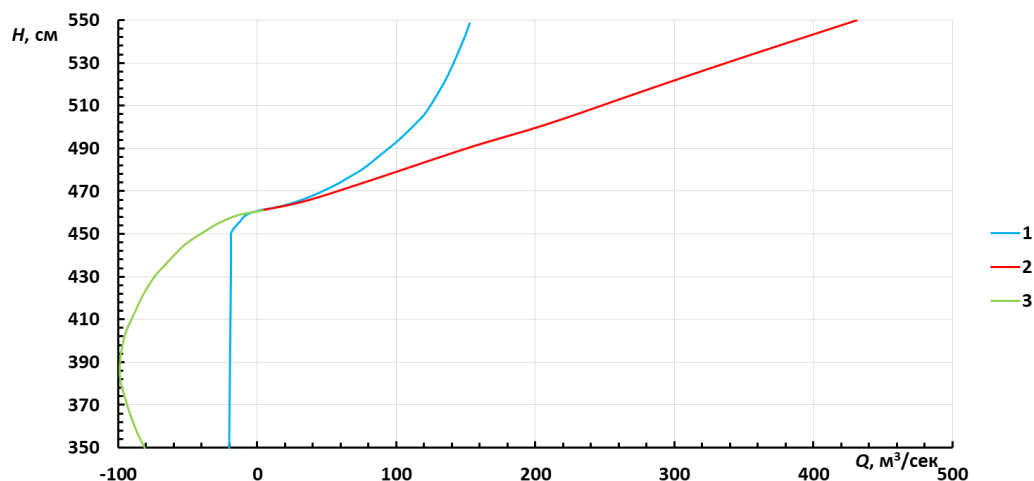


Рисунок 2.5 – Связь уровня с расходами в проливе Тонком в разных ветровых условиях: 1 – штиль, ветры всех направлений со скоростью < 6 м/с, северные и южные ветры > 6 м/с; 2 – восточные ветры со скоростью > 6 м/с; 3 – западные ветры > 6 м/с [Eremina et al., 2020]

Полученные по этой методике срочные расходы воды приводятся к среднесуточному показателю и пересчитываются в объемные единицы стока. Для целей водно-балансовых расчетов, было получено 16220 суточных измерений стока азово-сивашских вод в проливе Тонком за период с 1966 по 2013 гг.

Метод Ю.Г. Слатинского был разработан для расчета водообмена в проливе Тонком до начала работы Северо-Крымского канала, что явилось главным недостатком способа. Изменения, произошедшие в структуре баланса вод Сиваша с работой канала, спровоцировали интерес к созданию нового способа расчета водообмена. На основании данных, полученных в ходе экспедиций СО ФГБУ «ГОИН» в проливе Тонком с 1986–1988 гг. – период активной эксплуатации канала – Л.Г. Раскиным была разработана методика, учитывающая перепад

уровней между заливом Сиваш и на входе в пролив Тонкий со стороны Азовского моря [Раскин, 1992; Eremina et al., 2020].

На основе экспедиционных данных был изучен механизм формирования течений в проливе, установлена связь между измеренной средней скоростью течения на центральной вертикали гидроствора и средней скоростью течения по всему живому сечению пролива в этом же створе. Всего за период исследования [Раскин, 1992] было произведено 1700 измерений, из них в 63% наблюдались азовские течения, а в 35% – сивашские, смешанные течения наблюдались только в 1% случаев. Средняя скорость течения по живому сечению пролива вычислялась как результат деления мгновенного расхода на площадь сечения гидроствора. Подробнее измерения и методика описаны в [Раскин, 1992]. Эмпирическое уравнение связи, полученное в результате исследований, имеет вид:

$$V_{cp} = 0,014 + 0,76V_{ц}, \quad (2.10)$$

где V_{cp} – средняя скорость течения на гидростворе, м/с;

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

Коэффициент корреляции составляет 0,96, доверительные границы вероятности (95 %) для этого коэффициента составили 0,94 и 0,98 соответственно.

В данной методике 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, и разностью уровней между гидрометеорологической станцией МГ Геническ и постом МГП Чонгарский мост в заливе, а также проекцией скорости ветра на ось пролива. Итогом этого исследования стала значимая регрессионная зависимость в виде уравнения [Eremina et al., 2020]:

$$V_{ц} = (1,1\Delta H + 2,53W - 1,42)10^{-2}, \quad (2.11)$$

где ΔH – разница уровней между МГ Геническ и МГП Чонгарский мост, см;

W – проекция вектора скорости ветра на ось пролива, м/с.

Используя уравнения (2.10) и (2.11), по данным уровня на двух постах и проекций скорости ветра на ось пролива, в настоящей работе были рассчитаны величина и направление водообмена в проливе Тонком за период 1966–2013 гг. Величина водообмена представлена в кубических километрах (км³). Для пересчета средней скорости течений в объем стока требуется знать площадь сечения на гидростворе, которая, в свою очередь, зависит от уровня моря в проливе. По данным [Раскин, 1992] изменение площади сечения (S) в зависимости от изменения уровня в Геническе (H) можно представить в виде уравнения [Eremina et al., 2020]:

$$S = 265 + 0,675(H - 470). \quad (2.12)$$

В работе также дана климатологическая оценка естественных условий режима ветра и уровня моря, на фоне которых развивалось изменение интенсивности водообмена в проливе. Для этого были использованы данные регулярных гидрометеорологических наблюдений, выполняемых на станциях МГ Геническ и МГП Чонгарский мост за период 1966–2013 гг. Были рассчитаны стандартные режимные характеристики: повторяемость направлений по градациям скорости ветра и уровня моря, по месяцам и за год, оценки средних значений и показатели изменчивости ряда.

Выводы к разделу 2

Во втором разделе собраны все материалы и методы, использованные для изучения водно-солевого режима залива Сиваш и факторов, его формирующих в соответствии с поставленными в работе задачами.

В период с 2013–2020 гг. МГИ РАН и СО ФГБУ «ГОИН» провели 18 сухопутных экспедиций при участии автора в районы Восточного и Южного Сиваша. Было проведено более 100 определений солёности рефрактометрическим и пикнометрическим методами.

В зависимости от задачи использовались различные наборы архивных спутниковых данных. Спутниковая информация анализировалась для

исследования особенностей пространственного и временного распределения температуры поверхности воды, характерных черт, и продолжительности ледового режима в заливе Сиваш, для оценки возможного проникновения вод Азовского моря в Сиваш через бар Арабатской Стрелки, изучения изменчивости морфометрических характеристик залива Сиваш и динамики тростниковой растительности после перекрытия СКК.

В разделе приводятся методики расчетов отдельных статей водного баланса. Расчет сумм осадков осуществлялся на основе данных четырех метеостанций: Джанкой, Владиславовка, Геничesk, Стрелковое в период с 1966 по 2013 гг. Была выполнена корректировка осадков по методу ГГО-КазНИГМИ. Между исходными и действительными величинами осадков, просуммированных по месяцам, сезонам и за год, рассчитывались абсолютные отклонения, а также среднее квадратичное и относительное отклонения.

Расчет расходов азово-сивашских вод через Тонкий пролив осуществлялся на основе данных уровня, направления и скорости ветра на МГ Геничesk и МГП Чонгарский мост в период 1966–2013 гг. по двум методикам: Ю.Г. Слатинского и Л.Г. Раскина [Eremina et al., 2020]. Приведенные в разделе методики корректировки сумм атмосферных осадков и расходов воды в проливе Тонком могут быть в дальнейшем использованы для аналогичной корректировки указанных параметров в условиях перекрытия СКК для получения информации о тенденциях изменения факторов формирующих водно-солевой режим залива в новых условиях.

Материалы и методы, используемые в работе, позволяют достичь основной поставленной в работе цели – комплексно оценить факторы, формирующие водно-солевой режим залива Сиваш, его водный баланс.

Основные результаты второго раздела диссертации опубликованы в статьях [Щурова, 2013; Ломакин и др., 2014а; Щурова и др., 2016а; Позаченюк и др., 2016; Ерёмина и др., 2018d, 2020; Совга и др., 2018; Евстигнеев и др., 2019; Sovga et al., 2020; Eremina et al., 2020], тезисах и материалах конференций [Щурова, 2014; Щурова и др., 2015, 2016b; Ерёмина и др., 2017b, 2018с, 2019; Shchurova et al., 2016].

РАЗДЕЛ 3 ВОДНО-СОЛЕВОЙ РЕЖИМ ЗАЛИВА СИВАШ И ФАКТОРЫ, ЕГО ФОРМИРУЮЩИЕ

3.1 Элементы метеорологического режима

3.1.1 Ветровой режим

Среднегодовая повторяемость преобладающих восточных ветров над заливом Сиваш составляет 20 %, западных – 13 %, летом восточные и западные ветры наблюдаются практически с одинаковой частотой – 15 % и 13 % соответственно (Рисунок 3.1). В холодный период года восточные ветры имеют наибольшую повторяемость, которая достигает значений 23,5 %.

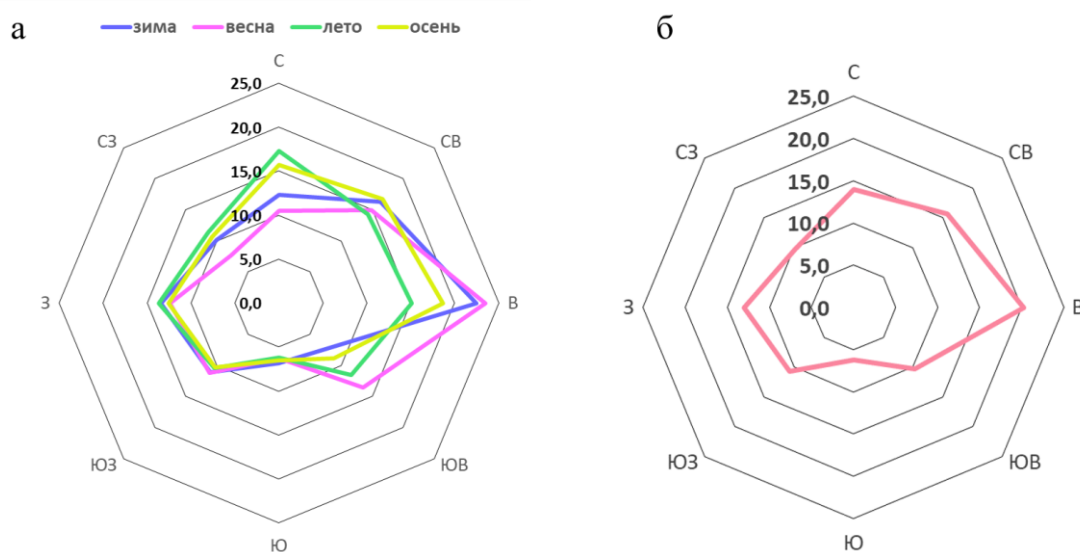


Рисунок 3.1 – Повторяемость направлений ветра: сезонная (а), среднегодовая (б) на станции Геническ за 1966–2013 гг. [Eremina et al., 2020]

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 %

(Рисунок 3.2), 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 % [Eremina et al., 2020].

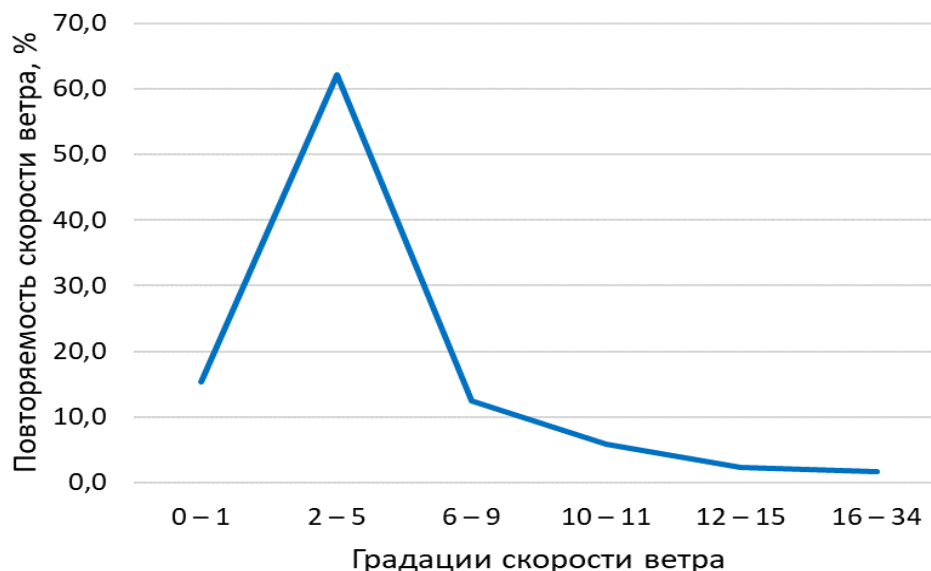


Рисунок 3.2 – Повторяемость градаций скорости ветра (%) на МГ Геническ за период 1966–2013 гг.

3.1.2 Атмосферные осадки

Режим действительных осадков над заливом Сиваш. Осредненная по 4-м станциям величина атмосферных осадков может быть использована для оценки их слоя над заливом Сиваш. Рассмотрим повторяемость различных градаций суточного количества по данным за период 1966–2013 гг. (Таблица 3.1). Наибольшую повторяемость (~ 94 %) имеет градация незначительных осадков 0,0–9,9 мм. В холодное полугодие эта градация имеет наиболее высокую повторяемость в период с ноября по март (более 96 %), в летние месяцы (июнь – август) повторяемость уменьшается и приобретает значения менее 90 %. В осенне-зимние месяцы суточные суммы редко превышают величину 40 мм и более. Зато в теплое полугодие (май – сентябрь) доля таких событий достигает ~ 0,5 % или 0,2 % в среднем от всех случаев осадков за год [Евстигнеев и др., 2019].

Таблица 3.1 – Повторяемость (%) различных градаций суточного количества осадков (мм) над заливом Сиваш по данным метеорологических станций за период 1966–2013 гг. [Евстигнеев и др., 2019]

градации	Месяцы												год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
0 – 9	96,46	96,78	96,39	95,78	92,83	89,45	87,33	84,01	91,57	94,9	96,46	96,37	93,96
10 – 19	3,23	2,6	2,94	3,66	5,32	7,8	9,39	10,1	5,67	4,18	3,07	2,97	4,61
20 – 29	0,24	0,45	0,57	0,33	1,16	1,83	1,64	3,7	1,6	0,7	0,47	0,58	0,94
30 – 39	0,08	0,09	0,09	0,22	0,46	0,69	1,19	1,18	0,29	0,12		0,08	0,3
40 – 49						0,23	0,3	0,17	0,58	0,12			0,09
50 – 59					0,12		0,15	0,34	0,15				0,04
60 – 69								0,17	0,15				0,02
70 – 79		0,09											0,01
80 – 89													
90 – 99					0,12			0,17					0,02
≥ 100								0,17					0,01

Наибольшая повторяемость такой градации (более 40 мм) приходится на август (более 1 %). В этом же месяце, а также в редких случаях в мае, были зарегистрированы экстремальные осадки с суточной суммой, превосходящей 90 мм; отдельные случаи таких осадков наблюдались в мае (Таблица 3.1).

Приняв среднеарифметическое значение действительного количества осадков по четырем метеорологическим станциям за оценку слоя осадков над заливом Сиваш, выполним анализ режима поступления в залив пресной воды с атмосферными осадками за период 1966–2013 гг.

На Рисунке 3.3 представлен график внутригодового хода месячных объемов осадков по данным четырех станций. Объем поступающей в залив воды с осадками имеет выраженный сезонный ход и максимален в теплое полугодие в период 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). Такое внутригодовое распределение осадков ближе к континентальному типу умеренных широт, хотя для отдельных станций Присивашья (Геничск и Стрелковое), используемых в расчете, годовой ход имеет признаки морского типа. Для таких станций осадки в течение года распределены более равномерно с отдельными максимумами в зимний период [Евстигнеев и др., 2019].

Среднемноголетнее значение годового объема осадков на поверхность залива составило 1,45 км³/год. За расчетный период 1966–2013 гг. минимальное годовое их количество было отмечено в 1971 г. и 1974 г. Наиболее дождливыми годами оказались 1997 г. и 2010 г. Интересно отметить, что по данным всех метеорологических станций Крыма (23 станции) в эти годы также было зарегистрировано наибольшее число опасных явлений (ОЯ), очень сильных осадков – 35 и 30 случаев соответственно. Критерием ОЯ является 30 мм выпавших осадков за 12 часов и менее в селеопасных районах, для остальных районов – 50 мм. В теплый период года наибольшее количество осадков обычно выпадает при смещении малоподвижных холодных фронтов с волновыми возмущениями. В холодный период положительные аномалии количества осадков наблюдаются при выходе южных циклонов.

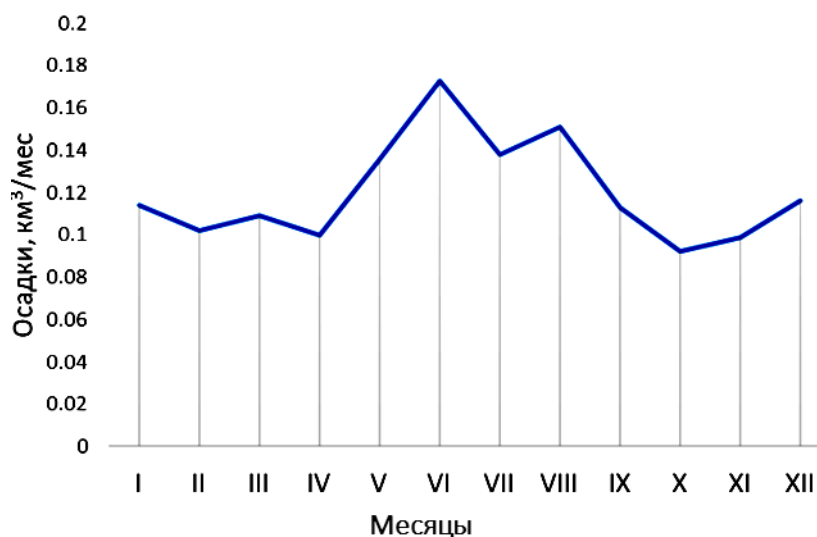


Рисунок 3.3 – Внутригодовой ход количества осадков, выпавших на поверхность залива Сиваш по данным четырех метеостанций, откорректированных в настоящей работе [Евстигнеев и др., 2019]

По исправленным данным измерения осадков можно дать оценку изменения режима поступления пресных вод над заливом Сиваш. Согласно известному подходу [Груза и др., 2012], индикатором изменения регионального климата может служить разность между климатическими нормами, характеризующими климатические условия начального и конечного периодов. Однако реальным это изменение может быть признано только тогда, когда его величина будет превосходить вероятную ошибку вычисления соответствующих норм.

В настоящей работе исследуемый период 47 лет (1966–2013 гг.) оказался недостаточным для расчета двух смежных климатических 30-летних норм. Вместо этого было проведено сравнение среднемноголетних величин годовых сумм осадков за 23-летние периоды (1966–1989 и 1990–2013 гг.). Результаты расчетов приведены в Таблице 3.2, согласно которой сумма годового объема осадков, а также объемов по всем сезонам, кроме зимнего, имела небольшое приращение за последние 45 лет. Однако разность между среднемноголетними величинами смежных 23-летних периодов оказалась незначимой, по крайней мере, с позиций стандартного t -теста [Fisher, 1925] ($\alpha=10\%$) [Евстигнеев и др., 2019].

Выявленная тенденция подтверждается расчетом линейных трендов годовых и сезонных объемов осадков за период 1966–2013 гг. (Таблица 3.2), величина которых оценивалась робастным непараметрическим методом Тейла-Сена [Sen, 1968]. Для всех сезонов, кроме зимнего, выявлен положительный тренд осадков, варьирующий в пределах 0,0016–0,01 км³/10 лет. Для зимнего сезона выявлен отрицательный тренд осадков. Для общего годового объема поступающих в залив атмосферных осадков тренд также оказался положительным и составил 0,016 км³/10 лет. Важно отметить, что величины полученных угловых коэффициентов (в том числе и для зимы) оказались незначимыми даже на уровне $\alpha = 10 \%$.

Таблица 3.2 – Характеристики изменения объема воды, поступающей в залив Сиваш с атмосферными осадками за период 1966–2013 гг. [Евстигнеев и др., 2019]

период года	количество осадков, км ³ /год			линейный тренд (км ³ /10 лет) за весь период
	1966–1989 гг.	1990–2013 гг.	разность	
Зима	0,348	0,34	– 0,008	– 0,0091
Весна	0,332	0,346	0,014	0,01
Лето	0,454	0,468	0,014	0,0016
Осень	0,283	0,347	0,064	0,0048
годовой объем	1,42	1,50	0,08	0,016

Величины трендов в Таблице 3.2 отличаются от представленных в литературе для залива Сиваш за примерно тот же период лет (0,042 км³/10 лет по данным [Дьяков и др., 2013]). Основной причиной различий возможно является недоучет действительных величин осадков из-за систематических ошибок при измерениях вследствие действия ветра, испарения из осадкомерного ведра и смачивания его дна и стенок. Так, на графике годового хода сумм осадков над заливом в работе [Дьяков и др., 2013] видно, что минимальные суммы отмечаются в зимний сезон, когда максимален недоучет осадков, прежде всего, связанный с сильными ветрами в регионе. По полученным данным в настоящей работе

минимум приходится на октябрь – ноябрь [Евстигнеев и др., 2019].
Корректировка данных позволила уточнить самую большую приходную составляющую водного баланса залива Сиваш, что является важным практическим результатом проделанной работы.

3.2 Элементы гидрологического режима

3.2.1 Современный температурный и ледовый режимы залива

Температура в заливе Сиваш вследствие его мелководности незначительно отличается от температуры воздуха. Анализ метеоданных с трех станций за период с 2005 по 2017 гг. показал, что среднегодовая температура воздуха изменяется в пределах 11,6–13,2 °С (Таблица 3.3). Среднемесячная температура зимой изменяется от -2,2°С до -5 °С, в отдельные годы морозы достигают -24 °С. Для степного Крыма характерно жаркое, сухое лето, температура воздуха 22–26 °С, максимальные значения приходятся на июль – август и достигают 34–36 °С.

Таблица 3.3 – Среднемесячная температура воздуха, °С

Название станции	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Феодосия	1,8	2,2	6,1	11,1	17,4	22,5	25,2	25,6	19,8	13,7	8,6	4,9
Геническ	-2,2	-0,6	4,1	9,9	17,7	22,3	24,6	24,6	18,8	11,6	6,1	1,8
Джанкой	-0,1	0,2	5	11	17,7	22,3	24,9	24,5	18,4	11,6	6,7	2,7

Температура воды в Сиваше анализировалась на основе дистанционных и контактных измерений. Результаты экспедиционных исследований, проведенных Морским гидрофизическим институтом РАН совместно с СО ФГБУ «ГОИН» в 2013–2016 гг. в районы Восточного и Южного Сиваша, показали, что температура воды от температуры воздуха отличается в среднем на 2 °С. В экспедиции, проведенной в июле 2013 г. вдоль всей Арабатской Стрелки, измерялась температура воды как в Азовском море, так и в заливе Сиваш, воды залива

отличались высокой температурой, которая изменялась в интервале 24,3–31,0 °С, что было обусловлено различной степенью прогрева участков с разной глубиной и мутностью вод, а также с внутрисуточным ходом инсоляции поверхности залива. Низкая температура наблюдалась вечером и в утренние часы, высокая – в послеполуденное время (в 14–15 часов). Размах суточных колебаний температуры воды в Сиваше составил до 6–7°С. Сравнение данных метеостанций со спутниковыми данными показали разницу между температурами воздуха и воды, которая изменялась от 0 до 7 °С.

На основе спутниковых данных сканера MODIS-Aqua с пространственным разрешением 1 км, взятых из архивов NASA [Архив Giovanni], были построены временные ряды полей температуры поверхности моря для районов Южного Сиваша и юго-западной части Азовского моря (Рисунок 3.4) [Щурова и др., 2016а].

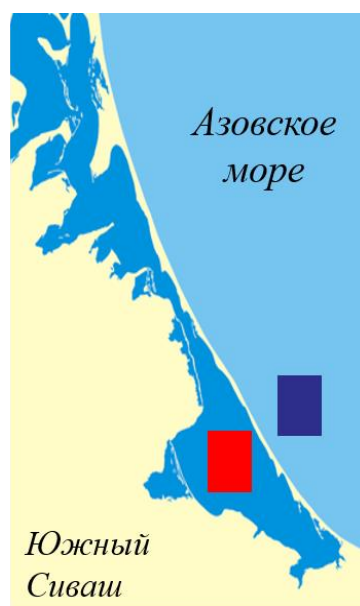


Рисунок 3.4 – Схема районов исследования

При анализе среднемесячных значений температуры воды по данным сканера MODIS за период 2003–2016 гг. отмечена высокая межгодовая изменчивость [Щурова и др., 2016а]. Линии трендов изменения температуры Азовского моря и залива Сиваш практически совпадают, на Рисунке 3.5, а, они показаны зеленой и розовой линией соответственно.

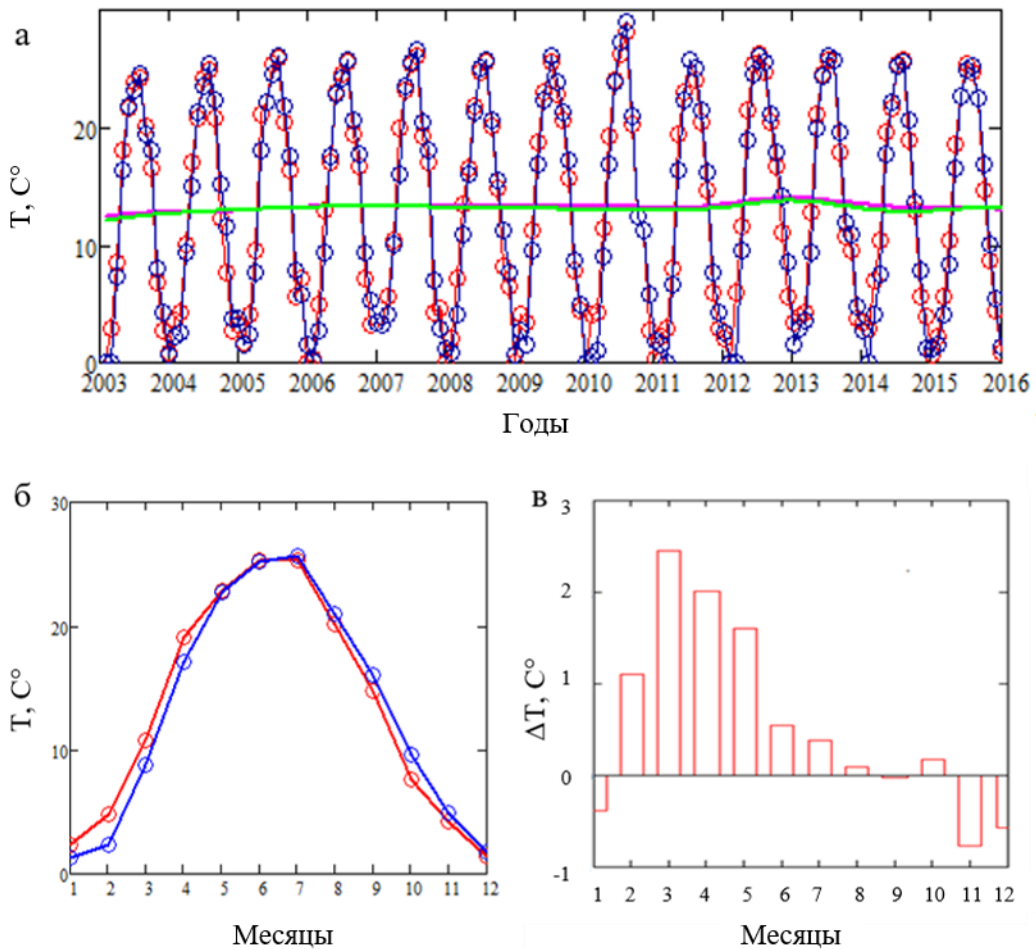


Рисунок 3.5 – Температурный режим залива Сиваш: Многолетняя изменчивость значений температур поверхности воды для Сиваша (красная линия) и Азовского моря (синяя линия) (а); внутригодовой ход температуры поверхности моря для Южного Сиваша (красная линия) и Азовского моря (синяя линия) (б); разность среднемесячных значений температуры поверхности моря Южного Сиваша и Азовского моря (в) [Щурова, 2013; Щурова и др., 2015, 2016б; Ерёмина и др., 2017а]

Были выделены наиболее теплый 2010 год (температура воды в августе достигала 30°C) и наиболее холодные (2006, 2008, 2012, 2015, 2016) годы, когда зимние температуры поверхности воды в Сиваше опускались ниже нуля, при этом наблюдался ледовый покров.

Сравнение температурного режима залива Сиваш и Азовского моря, показало разницу температур в 2–2,5 °С (Рисунок 3.5, в) во время весеннего

прогрева (март, апрель, май) и до 1–2 °С – во время осеннего похолодания (ноябрь, декабрь). Это связано с небольшими глубинами залива Сиваш, а, следовательно, с более быстрым прогревом и остыванием. В летние же месяцы поля температуры становились более однородными (Рисунок 3.5, б) [Щурова и др.,2015]. Разница в температурах в переходные сезоны и однородность полей в летний сезон 2016 г. отображена на картах-схемах, построенных в результате обработки спутниковых снимков NOAA-18, NOAA-15, МЕТОР-2 (Рисунок 3.6).

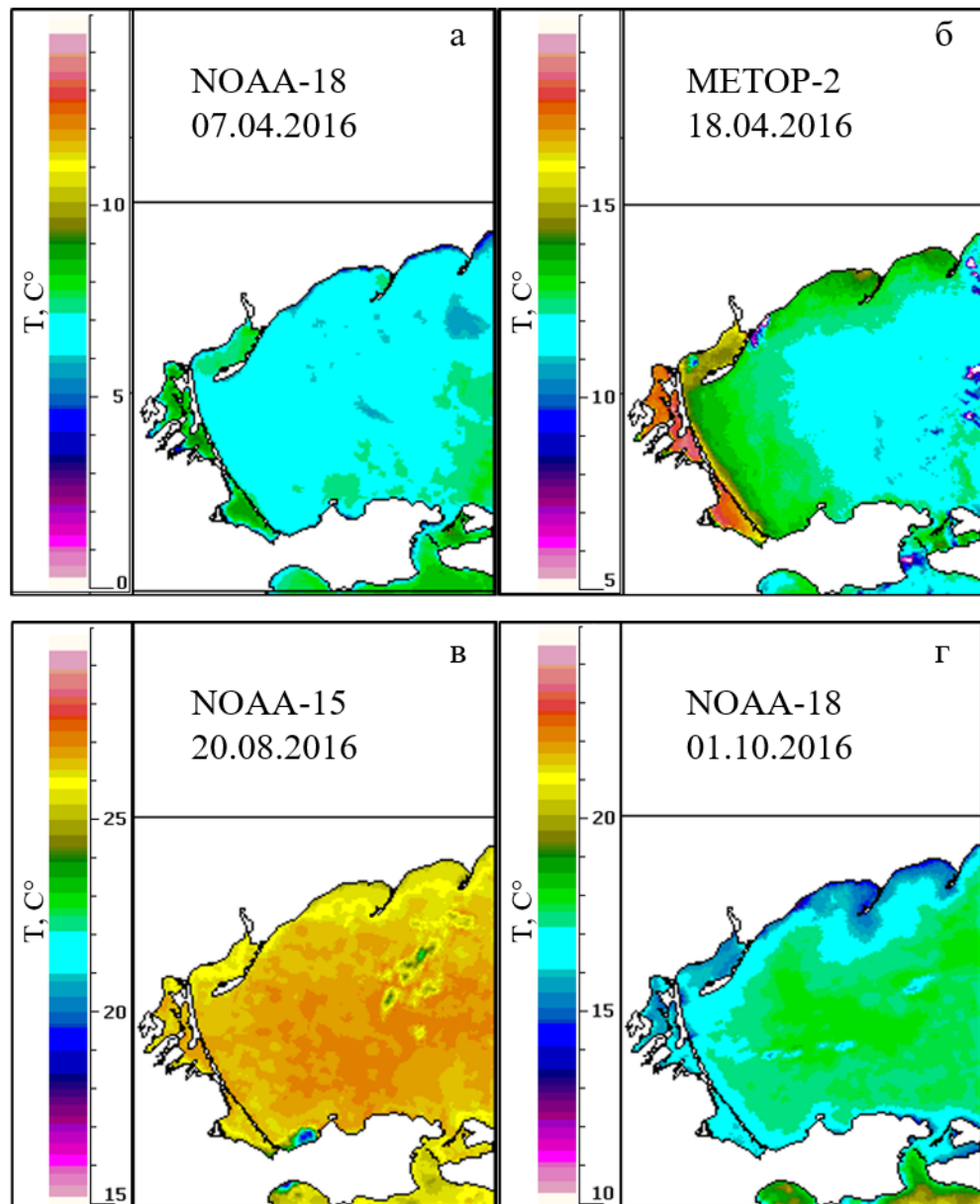


Рисунок 3.6 – Пространственное распределение полей температуры поверхности моря в Азовском море и заливе Сиваш в 2016 г. по спутниковым данным: 07.04 (а); 18.04 (б); 20.08 (в); 01.10 (г) [Морской портал МГИ]

Проведённый анализ межгодовых вариаций среднемесячных температур продемонстрировал наибольшую изменчивость в переходные сезоны (Рисунок 3.7). Так, средняя температура поверхности воды в период с 2001–2013 гг. в марте менялась в диапазоне от 4 до 8 °С, а в ноябре – от 6 до 12 °С.

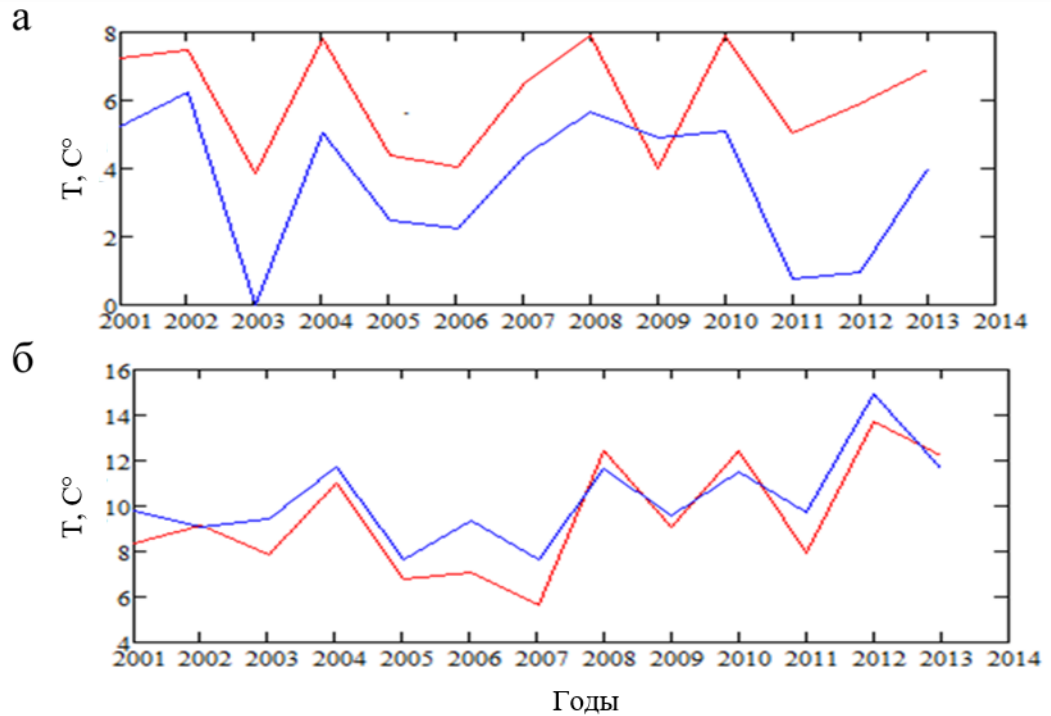


Рисунок 3.7 – Сезонная изменчивость значений температуры поверхности воды для марта (а) и для ноября (б). Красная линия – температура в Сиваше, синяя линия – в Азовском море [Щурова и др., 2016а, 2016б]

Как уже отмечалось выше, были выделены годы, когда температура воды опускалась ниже нуля, и наблюдался ледовый покров в Восточном Сиваше, первичные формы льда в Среднем Сиваше. Западный Сиваш и некоторые обособленные районы, такие как Ярошикский залив, не замерзали, по причине высокой солености (более 100 ‰) [Щурова и др., 2016а] и ограниченного водообмена (Рисунок 3.8).



Рисунок 3.8 – Снимок MODIS от 21.01.2006, демонстрирующий ледовый покров различных частей Сиваша в зависимости от солености. Синими стрелками показаны соответствующие значения солености для данных районов

Анализ ледового режима осуществлялся на основе 439 изображений MODIS-Aqua, часть данных была отсеяна из-за высокой облачности. Ледовый режим в Сиваше по продолжительности короче ледового режима Азовского моря, что связано с более высокой соленостью сивашских вод и, как следствие, более поздним замерзанием и ранним таянием ледового покрова. Так, например, зимой 2008 г. ледовый режим в Восточном Сиваше составил 77 дней (с 18.12.2007 до 04.03.2008) [Щурова и др., 2016a], а ледовый режим Азовского моря – 84 дня (с 18.12.2007. до 11.03.2008), данные представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Ледовый режим залива Сиваш и Азовского моря

	Сиваш				Азовское море			
	Год	Первое ледообразование	Полное очищение ото льда	Продолжительность ледового режима (дней)	Год	Первое ледообразование	Полное очищение ото льда	Продолжительность ледового режима (дней)
1	2006	21.01	23.03	61	2006	09.01	28.03	78
2	2008	18.12	04.03	77	2008	18.12	11.03	84
3	2012	28.01	25.03	57	2012	20.01	10.04	81
4	2014	01.02	03.03	30	2014	24.01	02.04	68
5	2015	01.01 19.02	25.01 23.02	28	2015	01.01	27.02	57
6	2016	01.01	07.02	37	2016	01.01	16.0.	46

Первый лед образуется в Сиваше в районе пролива Тонкого. При продолжительных отрицательных температурах льдом покрывается весь Восточный Сиваш, а также Южный Сиваш. Разрушается лед в первую очередь в Южном Сиваше, так как он глубже, и вода в нем более соленая. Дольше всего лед остается в первом плесе Восточного Сиваша. На Рисунке 3.9 представлен снимок MODIS-Aqua от 20.02.2008, в комбинации 7–2–1 каналов, на нем отображено типичное пространственное распределение ледового покрова в Сиваше на момент таяния: Южный Сиваш практически полностью освобожден ото льда, устойчивый слой льда наблюдается в первом и втором плесах Восточного Сиваша.

Наблюдаемый ледостав в проливе Тонком оказывает существенное влияние на водообмен с Азовским морем. Данные о ледовых условиях в проливе использовались при расчете расходов азово-сивашских вод в проливе.

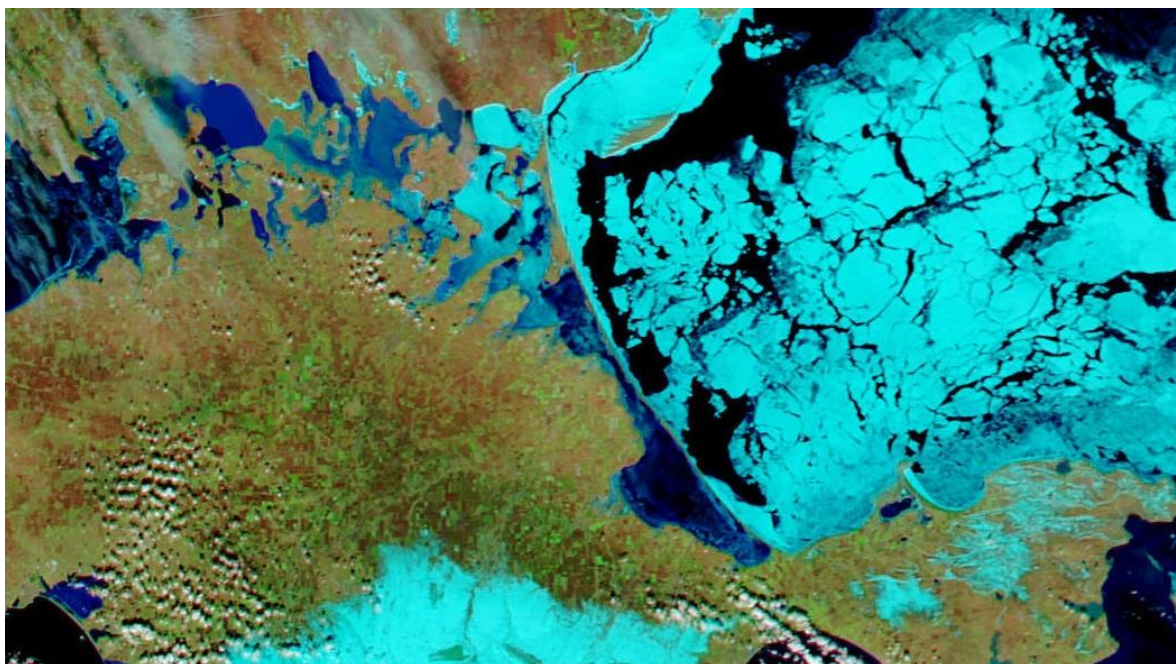


Рисунок 3.9 – Спутниковый снимок MODIS-Aqua от 20.02.2008,
в комбинации 7–2–1 каналов

После перекрытия Северо-Крымского канала ледовый режим в заливе Сиваш должен измениться, увеличение солености в Южном Сиваше отразится на характере образования льда в заливе. Так, Южный Сиваш, вероятнее всего, перестанет замерзать полностью, как это наблюдается в Среднем и Западном водоеме. К настоящему времени статистического материала по наблюдениям за ледовым режимом залива недостаточно.

3.2.2 Уровенный режим

В многолетнем ходе уровня на станциях побережья Азовского моря выделяют колебания с периодами 2–3 года и 25–30 лет [Гидрометеорологические условия ... , т. 1]. 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 (Рисунок 3.10). С июня по октябрь 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 [Eremina et al., 2020].

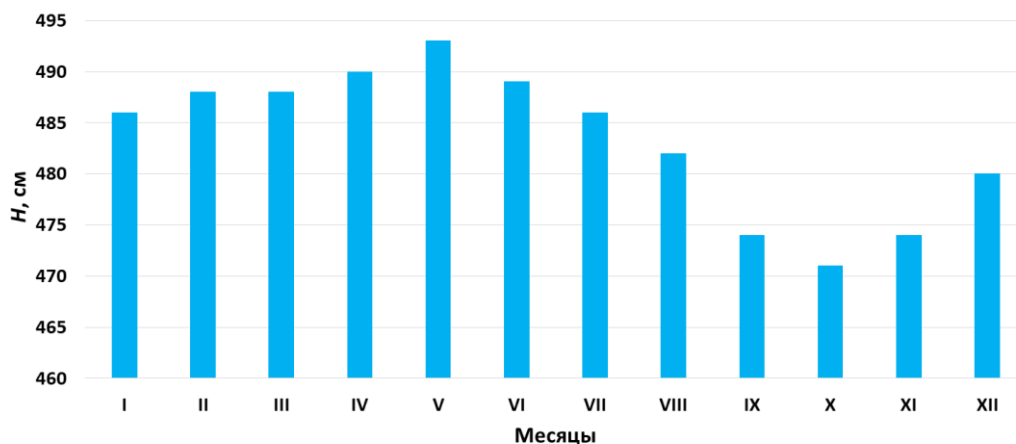


Рисунок 3.10 – Средний месячный уровень моря на станции в Геническе за 1966–2013 гг.

Синоптические колебания уровня определяются сгонно-нагонными процессами и характеризуются значительными амплитудами: на станции в Геническе возникают подъемы уровня, более чем на 2 м превышающие средне многолетние значения [Гидрометеорологические условия ... , т. 1; Eremina et al., 2020].

До 1969 г. разница уровней моря в заливе Сиваш и в районе Геническ была более или менее стабильная и составляла в среднем 13,5 см (Рисунок 3.11). 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 (Рисунок 3.11). В целом на обеих станциях наблюдалась тенденция к росту уровня воды.

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 [Eremina et al., 2020].

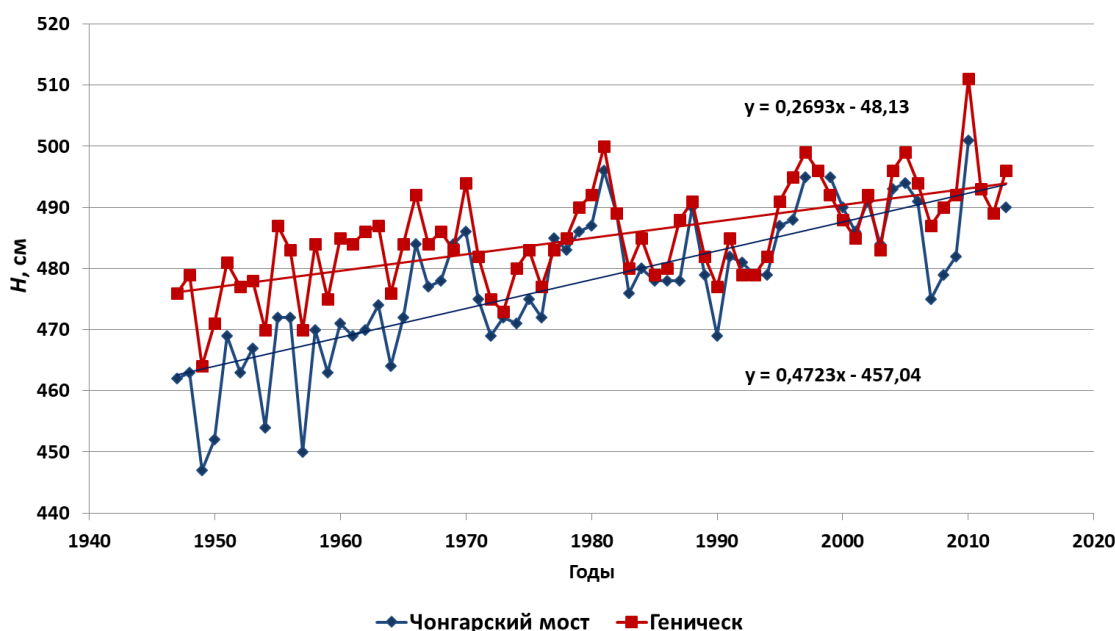


Рисунок 3.11 – Среднегодовые значения уровней на МГ Геническ и МГП Чонгарский мост за 1947–2013 гг. [Eremina et al., 2020]

3.2.3 Водообмен залива Сиваш с Азовским морем

На обмен водами между заливом Сиваш и Азовским морем оказывают влияние изменения уровня в районе пролива, направление, скорость и продолжительность ветров, испарение воды из водоема, поступление в Сиваш атмосферных осадков и поверхностных вод [Данильченко и др., 1954]. Так как величина водообмена залива Сиваш с Азовским морем через Промоину в настоящее время не должна быть значительна, но достоверно выяснить это пока не представляется возможным в силу полного отсутствия наблюдений и промерных работ в этом рукаве Генического пролива. [Дьяков и др., 2015а], далее в работе приводятся оценки водообмена через пролив Тонкий.

В настоящей работе были рассчитаны среднемесячные и среднегодовые величины стока азовских и сивашских течений в проливе Тонком по двум методикам – Слатинского и Раскина [Раскин, 1992; Слатинский, 1969]. 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 (Рисунок 3.12) 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 октябре [Ерёмина и др., 2019; Eremina et al., 2020].

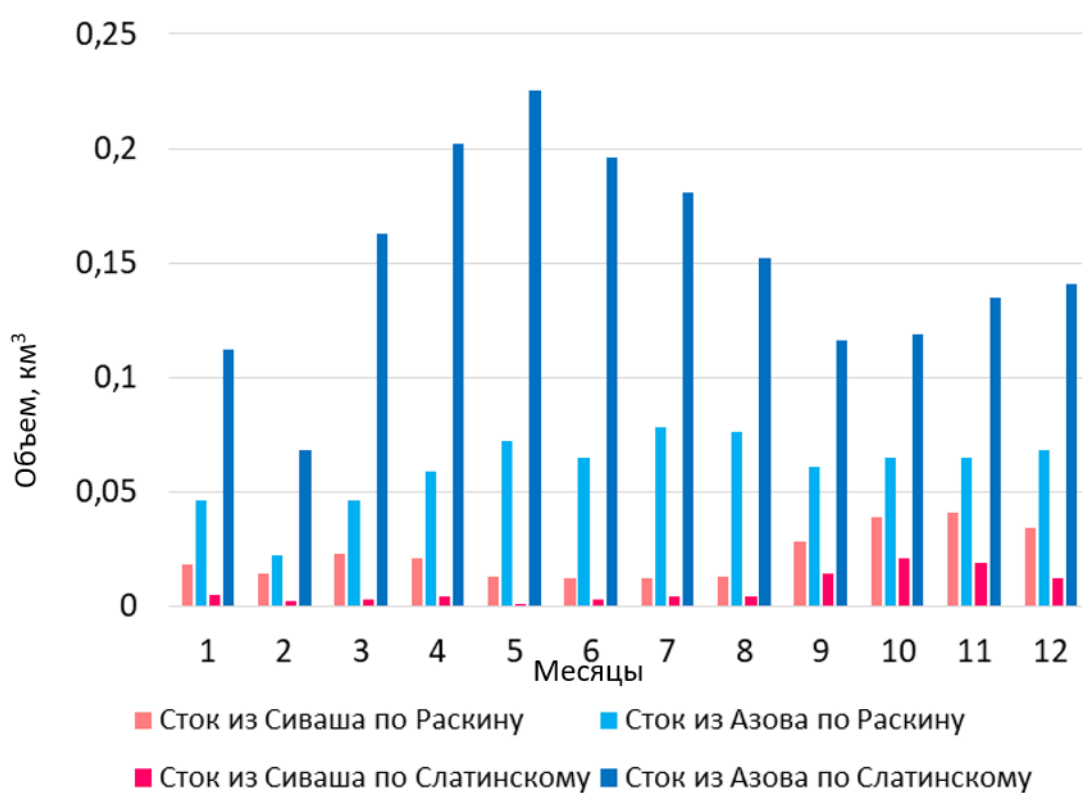


Рисунок 3.12 – Среднемесячные величины притока азовских и оттока сивашских вод в проливе Тонком за период 1966–2013 гг., рассчитанные по двум методикам [Раскин, 1992; Слатинский, 1969]

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 уровня поверхности моря и соответствует сезонной динамике уровня.

Рассчитанный по методу Слатинского среднегодовой приток азовских вод в Сиваш в 1966–2013 гг. составил $1,66 \text{ км}^3$, а отток сивашских вод – $0,08 \text{ км}^3$, полученные данные притока хорошо согласуются с оценками самого Ю.Г. Слатинского для периода 1961–1966 гг. По его расчетам в Сиваш поступает в среднем $1,7 \text{ км}^3$ азовских вод, однако сивашская составляющая водообмена в наших расчетах оказалась существенно ниже (Рисунок 3.13). Очевидно, это связано с недоучетом вклада пресной составляющей (СКК) в баланс Сиваша, вследствие чего возникали такие значительные отклонения в оценках реального водообмена. В связи с этим более целесообразно использовать методику Раскина.

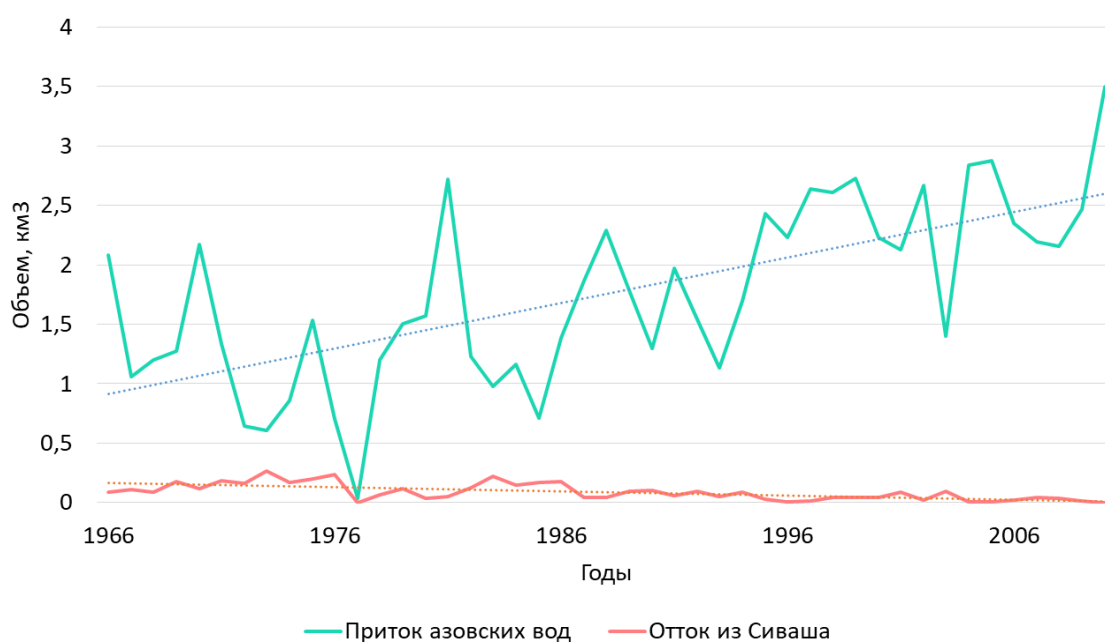


Рисунок 3.13 – Величина объемного стока сивашских (красная линия) и азовских (синяя линия) вод в проливе Тонком за 1966–2013 гг. Рассчитано по методу Ю.Г. Слатинского [Eremina, 2020]

Расчет по методу Раскина 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 3.5). Среднегодовой приток Азовских вод варьировал в широких пределах от $0,3$ до $1,18 \text{ км}^3$ [Eremina, 2020].

Таблица 3.5 – Среднемесячные величины притока азовских и оттока сивашских вод в проливе Тонком за период 1966–2013 гг., рассчитанные по двум методикам [Eremina, 2020]

Объем, км ³	Месяцы												Σгод
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Рассчитано по методу [Раскин, 1992]													
среднее Сиваш	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
среднее Азов	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 методу [Слатинский, 1969]													
среднее Сиваш	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
среднее Азов	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 гг. из Азовского моря в Сиваш поступало в среднем $0,81 \text{ км}^3$, с началом работы СКК приток сократился в среднем на $0,2 \text{ км}^3$ (Рисунок 3.14). С 2007 г. наблюдался рост в поступлении вод Азовского моря, и снижение оттока из Сиваша (Рисунок 3.14), что обусловлено резким перепадом уровней между заливом и морем в эти годы (Рисунок 3.11). Возможно, перепад уровней связан с сокращением поступления вод из Северо-Крымского канала, поскольку заметного увеличения количества выпадающих осадков над заливом Сиваш в эти годы не происходило [Евстигнеев и др., 2019]. Разница между притоком и оттоком вод в проливе характеризуется высокой межгодовой изменчивостью. В среднем за весь исследуемый период разница составила $0,45 \text{ км}^3$, в отдельные годы, когда уровень моря на МГП Чонгарский мост был выше или 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 [Eremina, 2020].

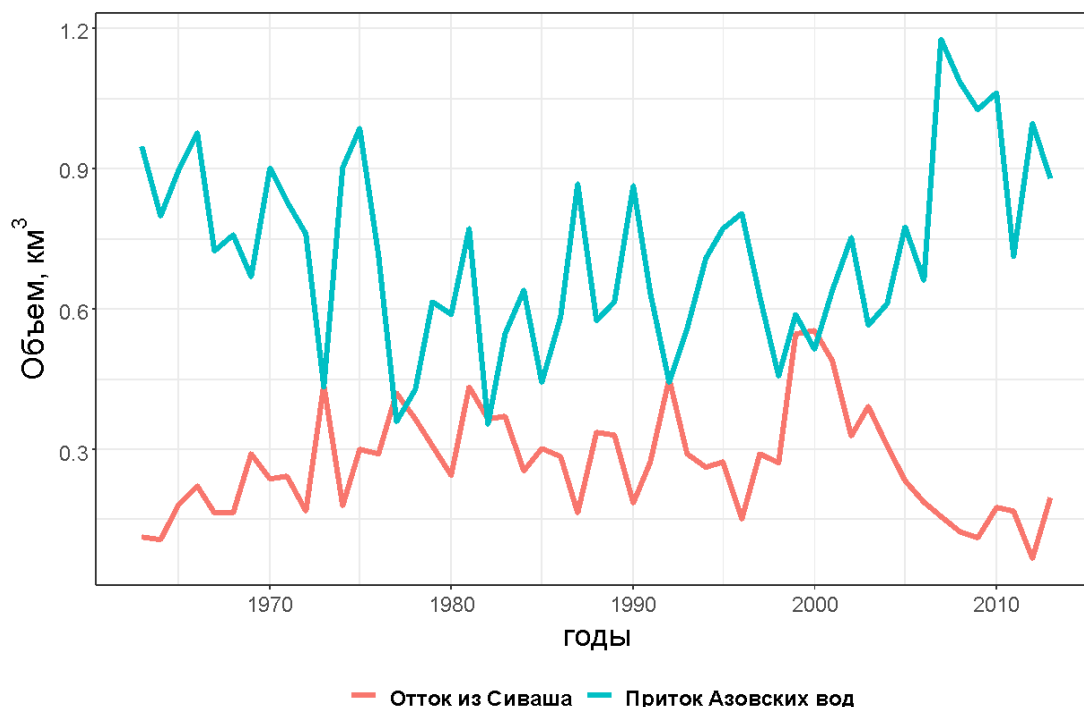


Рисунок 3.14 – Величина объемного стока сивашских (красная линия) и азовских (синяя линия) вод в проливе Тонком за 1966–2013 гг.

Расчитано по методу Л.Г. Раскина [Раскин, 1992]

Снижение объемов воды, поступающих из Азовского моря, связано с увеличением уровня Сиваша в отдельные годы и наоборот. Если принять среднюю соленость Азовского моря 11 ‰ с плотностью 1,008 т/м³, то ежегодное пополнение Сиваша солями в исследуемый период оценивается в пределах 8 млн тонн, а сброс в море сивашской воды с соленостью 20 ‰ и плотностью 1,014 т/м³ составляет в среднем 5 млн тонн. Для сравнения в период до работы Северо-Крымского канала ежегодное пополнение Сиваша солями оценивалось в 12–14 млн тонн [Понизовский, 1965].

3.2.4 Фильтрация вод Азовского моря через бар Арабатской Стрелки

Анализируя спутниковую информацию за 2014 и 2015 гг., в ряде случаев с марта по ноябрь, в настоящей работе был отмечен факт неоднородностей в поле температуры и особенностей в оптических свойствах воды Южного Сиваша вдоль Арабатской Стрелки [Shchurova E.S. et al., 2016; Щурова и др., 2016а, 2016б, 2016с]. Причём аномалии температуры, как правило, проявлялись в виде локальных направленных от берега струй, а в оптическом диапазоне в этом районе наблюдаются зоны с пониженным рассеянием (мутностью). Возможной причиной таких проявлений может быть явление интрузии азовских вод через бар Арабатской Стрелки, указанное в работе [Зенкович, 1962].

Пример такого проявления в поле температуры по данным сканера TIRS спутника Landsat 8 от 10.04.2015 г. показан на Рисунке 3.14, а. На снимках в оптическом диапазоне сканера MODIS за 08.08.2015 г. (Рисунок 3.15, б) и на изображении с сервера Google Earth [Google Earth] (Рисунок 3.15, в) хорошо выделяются области более прозрачных вод [Щурова и др., 2016а].

Использование данных NOMADS NOAA [Морской портал МГИ] позволило предположить, что просачивание вод через бар Арабатской Стрелки возможно связано с предшествующими ветровыми условиями, которые характеризовались сильными (>10 м/с) ветрами восточного и северо-восточного направления. Такого рода ветры приводят к повышению уровня воды с Азовской стороны бара и

соответствующему понижению со стороны Сиваша и способствуют усилению фильтрации (интрузии) вод через бар [Щурова и др., 2016а]. Пример поля ветра по данным NOMADS NOAA10 [Морской портал МГИ] за 08.08.2015 12GMT приведён на Рисунке 3.15, в.

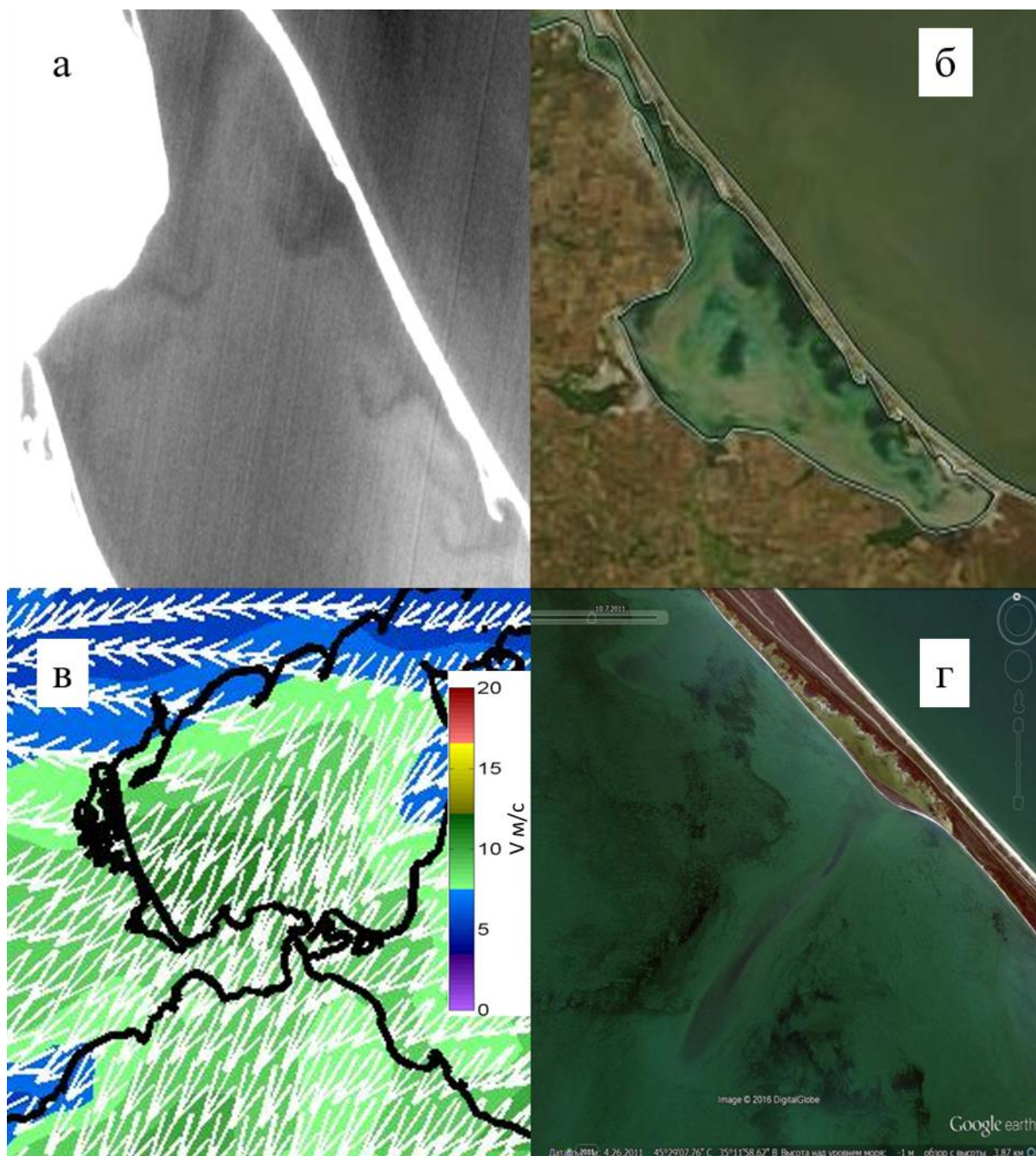


Рисунок 3.15 – Фильтрация Азовской воды через Арабатскую Стрелку 08.08.2015 г.: в инфракрасном диапазоне (сканер TIRS спутника Landsat 8) (а); в оптическом диапазоне (MODIS) (б); схема ветровых условий (м/с) по данным NOMADS NOAA10 (в); снимок [Google Earth] (г) [Щурова и др., 2016а]

Иловые отложения у береговых осушек Сиваша выклиниваются выше уровня Азовского моря и создают водонепроницаемый экран, который препятствует проникновению азовской воды в Сиваш. Однако, при определенных ветровых условиях и нагоне объемы азовских вод, поступающих в Южный Сиваш, увеличиваются.

Неоднородности в поле температуры и оптических данных наблюдаются в одних и тех же районах Арабатской Стрелки, что может свидетельствовать о существовании участков с повышенной проницаемостью [Щурова и др., 2016а]. В работе [Мысливец, 2015] приводятся исследования С.И. Варущенко и Г.А. Сафьянова, выполнивших структурно-геоморфологический анализ Арабатской Стрелки, показавший, что еще в средние века на месте этой формы был архипелаг островов, разделенных довольно широкими проливами. Возможно участки, через которые просачивается вода, это и есть места проливов, в таком случае вклад азовской воды в водном балансе Сиваша недооценен.

3.3 Водный баланс залива Сиваш при различных режимах работы Северо-Крымского канала

В настоящей работе под различными режимами работы СКК подразумеваются различные объемы сброса дренажных и сточных вод, поступающих в залив в процессе работы оросительных систем Крыма и Каховской оросительной системы, информация о которых представлена в первом разделе в Таблице 1.1.

Для расчета водного баланса использовались следующие уравнения, приведенные в работе [Дьяков и др., 2013] в виде:

$$F + Q_{AS} - Q_{SS} = \Delta B, \quad (3.1)$$

$$F = V_p + V_{СКК} + V_{OC} - V_{исп}, \quad (3.2)$$

где ΔB – изменение объема залива, км³;

F – пресноводная составляющая баланса, км³;

Q_{AS} – приток воды из Азовского моря, км³;

Q_{SS} – сток сивашской воды в Азовское море, км³;

V_p – сток рек, км³;

$V_{СКК}$ – приток дренажно-сбросных вод с СКК и Каховской оросительной системы, км³;

$V_{ос}$ – осадки, км³;

$V_{исп}$ – испарение с поверхности залива, км³ [Дьяков и др., 2013; Sovga et al., 2018].

В уравнении не используются следующие приходные составляющие: поступление азовоморских вод через Арабатскую Стрелку и приток вод через пролив Промоина. Так как пока нет подтвержденных количественных оценок, считается, что суммарный сток не должен быть значительным.

Для оценки изменчивости составляющих водного баланса и объема залива Сиваш использовались данные из литературных источников: объем речного стока, приток дренажно-сбросных вод, испарение, и данные, рассчитанные в настоящей работе: приток Азовских вод из Азовского моря, отток из Сиваша, атмосферные осадки. Для двух рассматриваемых периодов бралось одно значение испарения, с учетом того, что по данным [Гидрометеорологические условия ... , т. 1] изменчивость испарения в Азовском море за последние 40 лет не так значительна и определяется в большей степени циклическими вариациями глобальной атмосферной циркуляции. В Таблице 3.6 представлен водный баланс залива Сиваш и изменение его объема с учетом откорректированных в настоящей работе приходных и расходных статей. Составляющие водного баланса залива Сиваш за исследуемые периоды можно представить в виде схемы (Рисунок 3.16) [Sovga et al., 2018].

Анализируя данные составляющих водного баланса в различные периоды: до введения в строй СКК и во время его функционирования, можно сделать следующие основные выводы. В период условно-естественного состояния залива Сиваш, до работы канала, наблюдался дефицит пресноводной приходной составляющей. За

счет высокого испарения, в среднем $2,5 \text{ км}^3/\text{год}$, залив представлял собой естественный испаритель, в котором соли концентрировались до рассолов, величина изменения объема залива (ΔB) была отрицательная [Sovga et al., 2018]. Уровень моря в заливе Сиваш был ниже уровня Азовского моря, этот перепад обеспечивал приток Азовских вод в залив в количестве около $0,81 \text{ км}^3$ в год.

Таблица 3.6 – Водный баланс залива Сиваш и изменение его объема за исследуемые временные периоды [Sovga et al., 2018]

Приходные статьи баланса, км^3				Расходные статьи баланса, км^3		Изменение объема залива, ΔB^{**} , км^3	Изменение объема залива, ΔB^* , км^3
**Приток вод Азовского моря, Q_{as}	*Сток рек, V_p	**Атмосферные осадки, V_{oc}	*Дренаж, $V_{скк}$	**Сток сивашской рапы, Q_{ss}	*Испарение, $V_{исп}$		
период до постройки СКК 1966–1970 гг.							
0,81	0,25	1,42	0	0,20	2,5	-0,22	-0,59
период функционирования СКК 1970–2013 гг.							
0,61	0,12	1,5	0,6	0,32	2,5	0,01	-0,25

* – компоненты баланса по данным [Понизовский, 1965а; Дьяков и др., 2013; Сивашский регион ... , 2007].

** – статьи водного баланса, откорректированные в настоящей работе.

С началом работы канала пресноводная составляющая баланса выросла на $0,6 \text{ км}^3/\text{год}$, вырос уровень в заливе в среднем на 10 см, снизился перепад уровней между заливом и морем из-за чего уменьшился приток азовских вод в Сиваш в среднем на $0,2 \text{ км}^3/\text{год}$, что сократило поступление солей в Сиваш приблизительно на 2,2 млн тонн в год. Из-за поднятия уровня залива, который в отдельные годы даже превышал уровень Азовского моря, увеличился отток сивашских вод в море на $0,1 \text{ км}^3/\text{год}$. Пресноводная составляющая баланса увеличилась также за счет атмосферных осадков в среднем на $0,08 \text{ км}^3/\text{год}$.

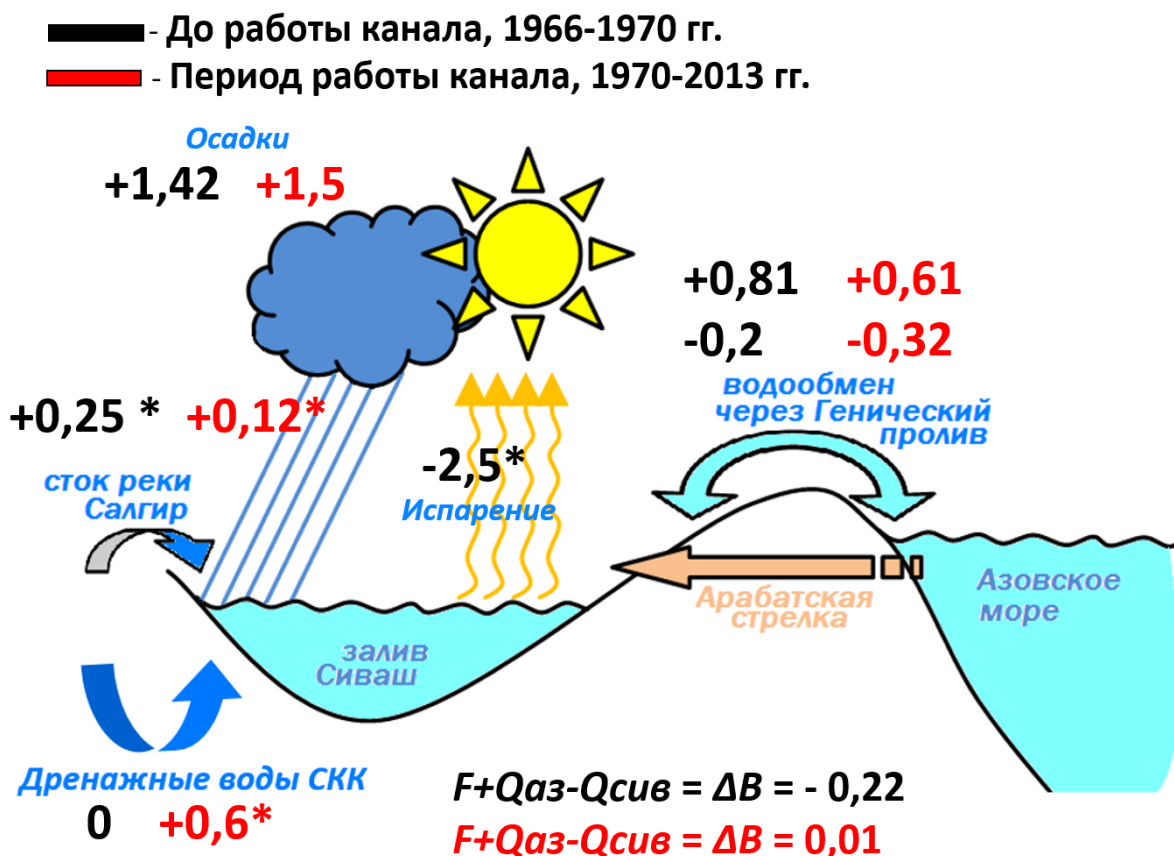


Рисунок 3.16 – Водный баланс залива Сиваш, условно разделённый на два периода: до введения в эксплуатацию СКК (цифры показаны черным цветом) и во время его функционирования (цифры показаны красным цветом);

* – компоненты баланса по данным

[Понизовский, 1965а; Дьяков и др., 2013; Сивашский регион ... , 2007]

Поступление пресных вод в Сиваш определяет уровень залива и влияет на приток вод из Азовского моря – с увеличением уровня в заливе уменьшается приток из моря и наоборот. Уточнение отдельных статей водного баланса позволило увидеть реальное изменение объема залива ΔV^{**} , полученного в данной работе, относительно ΔV^* , рассчитанного на основе данных других авторов (Таблица 3.6). Значение ΔV^{**} в период работы Северо-Крымского канала стало положительным так как приходная составляющая увеличилась за счет пресных вод и стала равняться или даже превышать расходную составляющую, что вызвало распреснение вод залива.

В 2014 г. Северо-Крымский канал был перекрыт, вместе с тем сократилась пресноводная приходная составляющая в водном балансе залива. В результате предполагается, что снизится уровень воды в Сиваше, изменится соотношение притока и оттока вод в проливе Тонком, в сторону увеличения поступления азовских вод. На сегодняшний день невозможно дать оценку компонентам современного водного баланса, так как после 2014 г. не поступают данные с пункта наблюдений в Геническе (Украина), пост МГП Чонгарский мост с того времени не функционирует вовсе, регулярный мониторинг происходящих изменений не проводится. Глобальная трансформация всей экосистемы залива Сиваш и нарушение установившегося природного равновесия подтверждается положительной динамикой солености в заливе, наблюдаемой по данным экспедиционных исследований и изменчивостью его морфометрических характеристик по спутниковым данным, которые будут рассмотрены в следующем разделе.

Выводы к разделу 3

В третьем разделе представлены полученные автором выводы о действии факторов, формирующих водно-солевой режим залива Сиваш при различных условиях работы Северо-Крымского канала.

При использовании современных методик осуществлена коррекция оценок объемов вод, поступающих в залив Сиваш из Азовского моря. До работы СКК через пролив Тонкий из Азовского моря поступало в среднем $0,81 \text{ км}^3/\text{год}$ вод. 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 на 10 см [Egemina et al., 2020]. Высокая изменчивость уровня, сокращение перепада между заливом и морем повлияли на ход водообмена в проливе – сократился приток вод из Азовского моря и увеличился отток сивашских вод. Суммарный сток (с учетом оттока из залива Сиваш) в этот период составлял $0,3 \text{ км}^3/\text{год}$, что в два раза ниже

значения стока до работы канала. Полученные в работе уточненные значения были использованы при расчетах водного баланса залива Сиваш и для оценки климатической изменчивости его составляющих.

Впервые в настоящей работе с помощью спутниковых данных зафиксированы случаи предполагаемого просачивания вод Азовского моря через бар Арабатской Стрелки как еще одного источника поступления азовоморских вод в залив Сиваш. Использование данных NOMADS NOAA позволило предположить, что наблюдаемое явление возможно связано с предшествующими ветровыми условиями, повышающими уровень воды с Азовской стороны бара при его понижении со стороны Сиваша.

Осуществленная в работе коррекция годовых объемов атмосферных осадков, выпадающих на поверхность залива [Sovga et al., 2020], показала, что во время работы канала вместе с другими факторами увеличение атмосферных осадков могло также повлиять на распределение вод залива Сиваш. Согласно с проведенным в работе анализом за период с 1966 по 2013 гг. среднемноголетнее значение годового объема осадков на поверхность залива составляло $1,45 \text{ км}^3/\text{год}$. Месячные суммы в среднем составляли величины от $0,09$ до $0,18 \text{ км}^3/\text{мес}$ [Евстигнеев и др., 2019]. Величина линейного тренда годовых объемов составила $0,016 \text{ км}^3/10 \text{ лет}$.

В третьем разделе проведено сравнение сезонной и межгодовой изменчивости температурного и ледового режимов акватории залива Сиваш с аналогичной изменчивостью в Азовском море с использованием спутниковых данных. Показано влияние мелководности залива на температуру воды по сравнению с Азовским морем: примерно на $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ в весенний и осенний сезоны. Отмечено сокращение продолжительности ледового режима в среднем на 30% из-за высокой солености в Восточном и Южном Сиваше, выделены незамерзающие районы залива.

Выполненное в работе уточнение отдельных статей водного баланса залива: атмосферных осадков, водообмена в проливе Тонком позволили оценить изменение объема залива (ΔV) как в период его условно-естественного состояния, так и при различных режимах работы СКК. В 1966–1970 гг. наблюдался дефицит

приходной составляющей, и залив представлял собой естественный испаритель, в котором соли концентрировались до рассолов. Показано что, в период функционирования Северо-Крымского канала (1970–2013 гг.) приходная составляющая водного баланса равнялась или превышала расходную, что повлекло за собой распреснение залива.

Результаты исследований, представленных в третьем разделе диссертации, опубликованы в статьях [Щурова, 2013; Щурова и др., 2016а; Позаченюк и др., 2016; Sovga et al., 2018, 2021; Евстигнеев и др., 2019; Eremina et al., 2020], тезисах и материалах конференций [Щурова, 2014; Щурова и др., 2015, 2016b, 2016c; Shchurova et al., 2016; Ерёмина и др., 2017а, 2019].

РАЗДЕЛ 4 ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВОДНО-СОЛЕВОГО РЕЖИМА ЗАЛИВА СИВАШ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕКРЫТИЯ СЕВЕРО-КРЫМСКОГО КАНАЛА

4.1 Изменчивость солености залива Сиваш после перекрытия Северо-Крымского канала в сравнении с ее многолетней динамикой

В первом разделе диссертационной работы был рассмотрен солевой режим в заливе Сиваш, охватывающий продолжительный период до начала работы Северо-Крымского канала и во время его интенсивной работы в 80-е годы 20-го века (1935–1988 гг.).

Автором настоящей работы были произведены определения солености воды в восточной и южной частях акватории залива Сиваш в 2013 г – в последний год функционирования Северо-Крымского канала. После перекрытия Северо-Крымского канала, за период 2014–2020 гг., при участии автора были реализованы еще 17 экспедиций в районы Восточного и Южного Сиваша, в результате которых более чем на 100 станциях отобраны пробы воды для определения солености различными методами [Позаченюк и др., 2016; Щурова, 2017].

4.1.1 Динамика солености Восточного Сиваша

По данным 2013 г. соленость в Восточном Сиваше возрастала в направлении с севера на юг от пролива Тонкого к Шакалинскому сужению. Анализ полученных данных и сравнение их с результатами прошлых лет показал, что соленость в заливе Сиваш в 2013 г. практически на всех станциях была выше, чем в 80-е годы 20-го века, однако оставалась существенно ниже солености воды, которая наблюдалась до постройки канала. Это говорит о том, что постепенный рост солености начался еще во время работы Северо-Крымского канала, что, вероятно, было связано с сокращением поступления объемов пресных вод в начале 2000-х гг. и увеличением поступления азовоморских вод через пролив Тонкий, что было показано в третьем разделе работы.

На станции, расположенной вблизи пролива Тонкого (станция 12 на Рисунке 4.1), было определено минимальное значение солености во всем заливе, которое составило 10 ‰. Азовоморские воды, поступающие через пролив, обеспечивают постоянство низкой солености в этом районе.

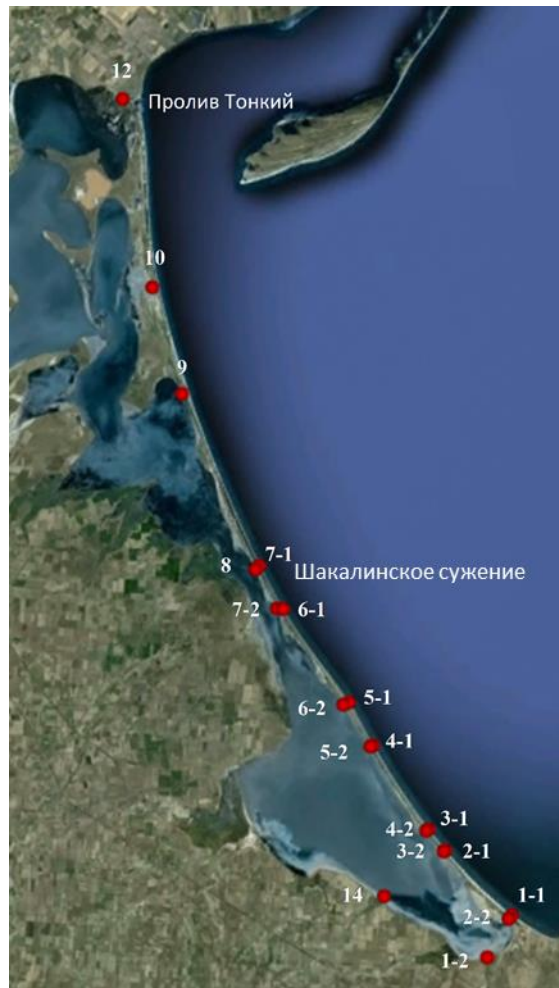


Рисунок 4.1 – Схема станций экспедиционных исследований в заливе Сиваш в 2013 г.

Изменчивость водно-солевого режима к северу от Шакалинского сужения в большей мере зависит от природно-климатических факторов: интенсивного летнего испарения и динамики атмосферных осадков. Это связано с тем, что акватория этого участка не замкнута, гидродинамические процессы и водообмен с азовскими водами, поступающими через пролив Тонкий, здесь более интенсивны. В Восточном Сиваше (станция 9 на Рисунке 4.1) в 2013 г. соленость составила 32 ‰. Из литературных данных нам известно, что соленость в этом районе в 50–

60-е гг. 20-го века до работы канала варьировала в широких пределах от 54 до 85 ‰; в 80-е гг. во время интенсивной работы СКК соленость здесь снизилась до 40 ‰, а по некоторым данным – до 20 ‰.

С 2014 г. станция 9 стала недоступна для экспедиционных исследований. В Восточном Сиваше измерения проводились на станциях 1–4 (Рисунок 4.2) Изменчивость солености на трех из четырех станций носила только сезонный характер. Если весной 2014 г. с севера на юг в Восточном Сиваше соленость менялась от 27 до 33 ‰, то в октябре на тех же станциях она изменялась от 26 до 38 ‰. Таким образом, размах сезонного хода солености на одних и тех же станциях может составлять от 2 до 8 ‰ [Ломакин и др., 2014а, 2014б; Щурова и др., 2016д]. В районе Шакалинского сужения (станция 4 на Рисунке 4.2) одновременно с выраженной сезонной изменчивостью наблюдался межгодовой рост солености: с 2014 г. по 2018 г. за осенние съемки соленость выросла с 46 до 55 ‰ (Рисунок 4.3, г).

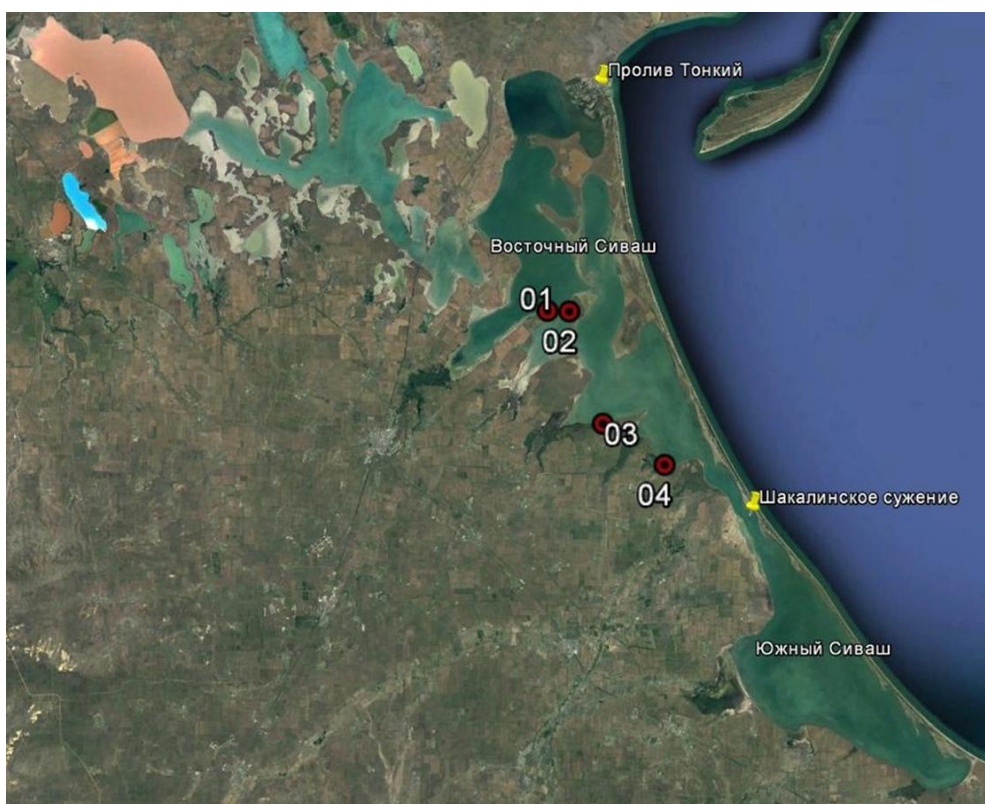


Рисунок 4.2 – Схема станций в Восточном Сиваше

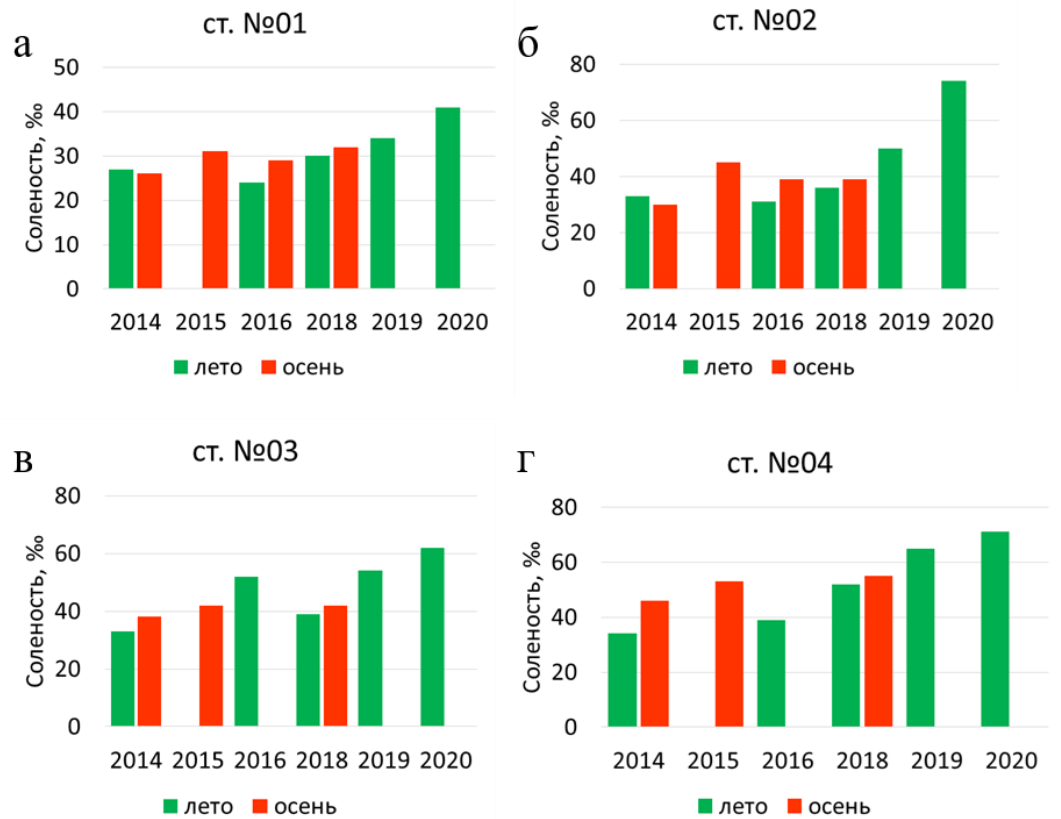


Рисунок 4.3 – Межгодовая и сезонная изменчивость солености на станциях в Восточном Сиваше за период 2014–2020 гг.: станция №01 (а); станция №02 (б); станция №03 (в); станция №04 (г)

По результатам экспедиции в 2020 г., спустя 6 лет после перекрытия канала, соленость значительно выросла на всех станциях: на станции 1 значение солености впервые превысило отметку 40 ‰; на всех остальных станциях соленость превышала 60 ‰; а на станциях 2 и 4 (Рисунок 4.3, б, г), впервые за 6 лет, в Восточном Сиваше значение превысило 70 ‰. Резкий скачок солености на станции 2, вероятно, связан еще и с тем, что гидродинамика этого района изменилась вследствие роста дистального конца аккумулятивной формы [Михайлов, 2019], затруднившей водообмен Князевского залива с акваторией Восточного Сиваша. Полученные данные солености в 2020 г. сопоставимы с соленостью вод Восточного Сиваша, которая наблюдалась в условно-естественный период: в 30-е гг. 20-го века соленость в районе станций 1 и 2 менялась в диапазоне 40–50 ‰, а на станциях 3 и 4 – 50–70 ‰ [Гидрологический справочник ... , т. 3, вып. 3]. Это позволяет сделать

заключение, что за 6 лет перекрытия Северо-Крымского канала соленость в Восточном Сиваше практически полностью восстановилась до естественных условий и, вероятно, будет продолжать возрастать (Рисунок 4.4.).

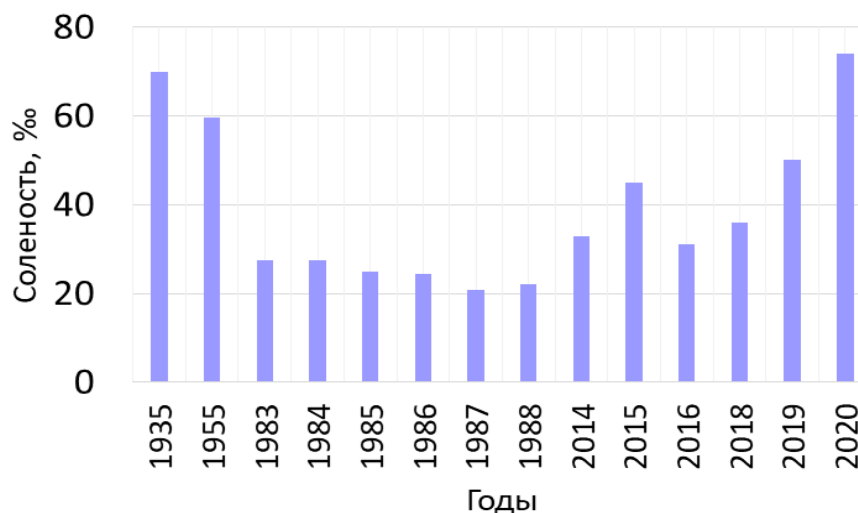


Рисунок 4.4 – Многолетняя динамика солености в Восточном Сиваше

4.1.2 Динамика солености Южного Сиваша

Максимальные значения солености в 2013 г. были определены в Южном Сиваше, в наиболее удаленных от пролива Тонкого районах. Соленость менялась с севера на юг от 38 до 54 ‰ на самой южной станции [Совга и др., 2013]. До работы канала в Южном Сиваше соленость составляла 125–150 ‰ (Рисунок 4.5, в), в среднем по имеющимся данным с 1935 –1969 гг. составляла 140 ‰ (измерения проводились в районе пос. Соляное). После начала работы канала произошло резкое снижение солености до 100 ‰, после чего соленость снижалась экспоненциально до 40 ‰ в 1981 г., а уже в 1988 г. соленость в Южном Сиваше составила 20 ‰ (Рисунок 4.5, в).

Прекращение работы Северо-Крымского канала в 2014 г. и искусственное уменьшение стока р. Салгир привело к обнаруженному в экспедиционных исследованиях росту солености в Южном Сиваше. В июне 2016 г. на тех же участках, что и в 2013 г. соленость возросла от 67 до 75 ‰ соответственно. Как показали результаты экспедиционных исследований МГИ РАН в мае и в ноябре

2018 г. соленость воды в Южном Сиваше на восьми из девяти станций варьировала от 75 до 82 ‰. [Позаченюк и др., 2016; Ерёмина и др. 2018а; Ерёмина, 2021; Sovga и et al. 2020, 2021]. Хотя на станциях в Южном Сиваше соленость отличалась мало, максимальные значения были определены на самой южной станции (станция 6 на Рисунке 4.5, а, б). После летнего сезона 2018 г. на восьми станциях соленость возросла на 11–17 ‰ и изменилась от 89 до 92 ‰. Такой значительный сезонный рост солености не наблюдался в Восточном Сиваше. В 2020 г. соленость практически на всех станциях Южного Сиваша впервые с момента запуска Северо-Крымского канала превысила 100 ‰. Такие значения солености были последний раз были определены в Южном Сиваше в 1969 г. (Рисунок 4.5, в).

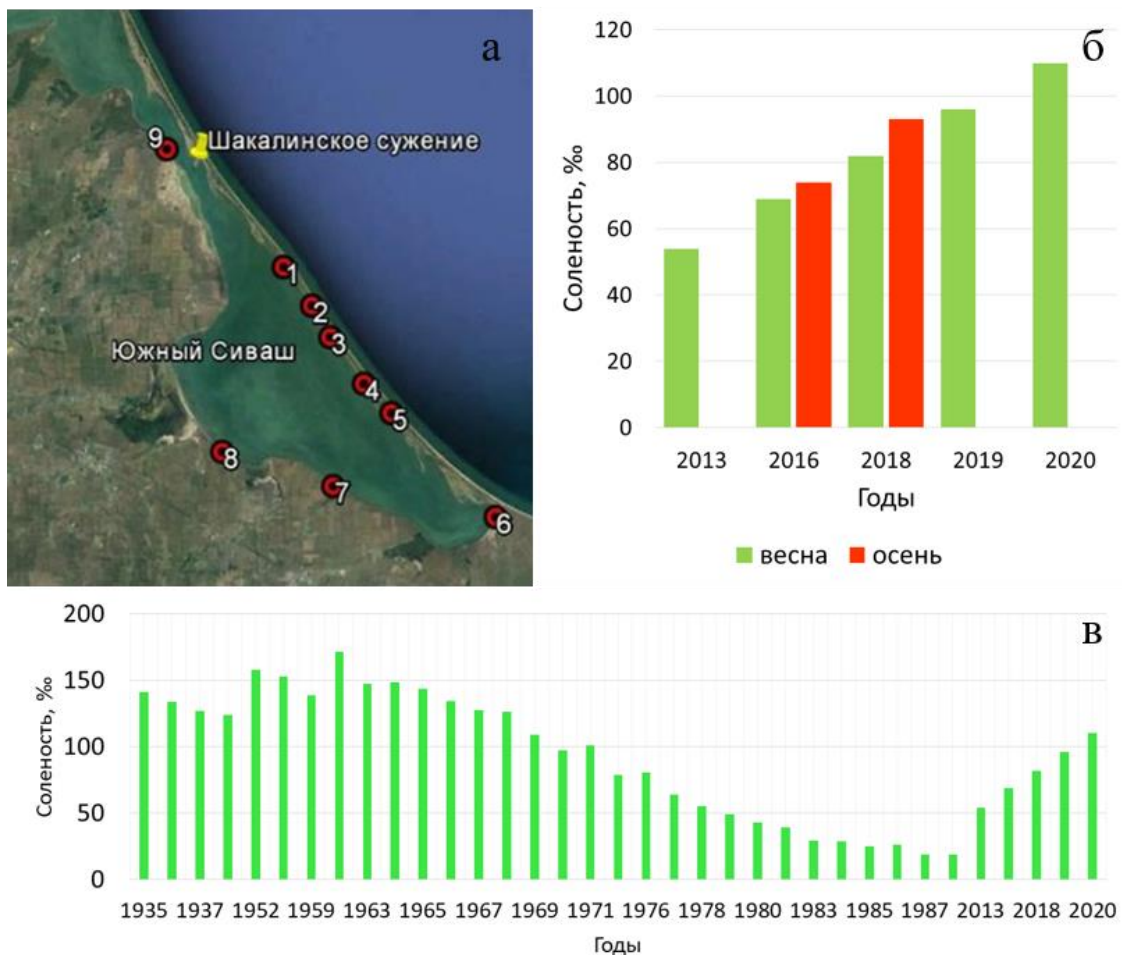


Рисунок 4.5 – Схема станций в Южном Сиваше (а). Изменчивость солености на станции № 6 (б). Межгодовая и сезонная изменчивость солености на станции Соляное в Южном Сиваше с 1935–2020 гг. (в)

4.1.3 Динамика содержания NaCl в разных районах Сиваша

Кроме экспедиционных данных МГИ и СО ФГБУ «ГОИН», в работе осуществлен анализ данных, полученных Крымским содовым заводом, по изменению среднегодовых концентраций NaCl в Западном, Среднем и Восточном Сиваше (Рисунок 4.6).

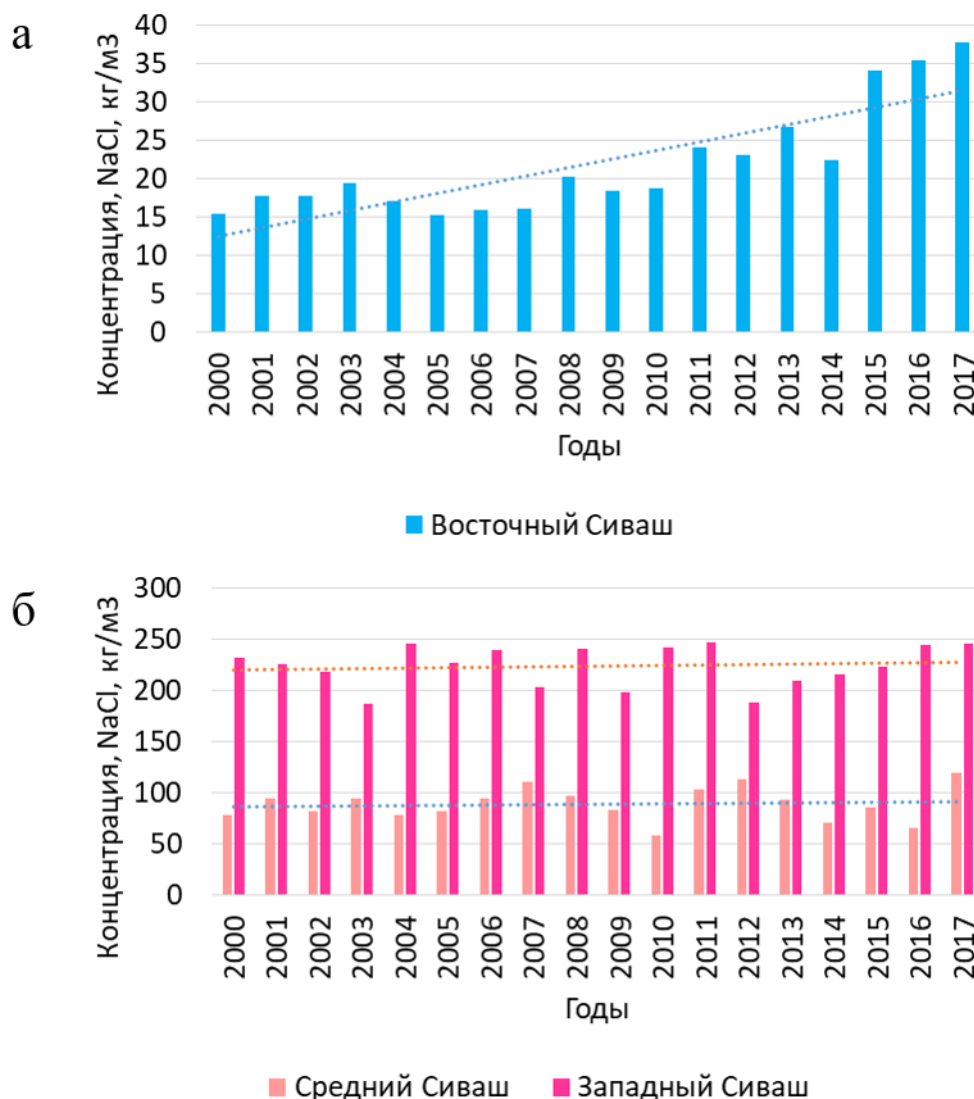


Рисунок 4.6 – Концентрация NaCl с 2000 по 2017 гг.: в Восточном Сиваше (а), в Среднем и Западном Сиваше (б)

Показано, что работа и перекрытие СКК не отразились на динамике солёности Среднего и Западного Сиваша, высокая изменчивость значений NaCl в

этих водоемах вызвана искусственным управлением гидрологическим режимом с помощью дамб. В акватории Восточного Сиваша концентрация NaCl начала расти: в 2000 г. она составляла 15,38 кг/м³, а в 2017 г. уже – 37,89 кг/м³, что в два раза выше прежних значений. Важно отметить, что по данным Крымского содового завода соленость в Восточном Сиваше начала постепенно расти после 2010 г. Вероятно это связано с сокращением притока пресных вод из СКК, снижением уровня в заливе и изменением водообмена в проливе Тонком.

Анализируя все данные о солености в заливе Сиваш, можно сделать вывод, что перекрытие Северо-Крымского канала в 2014 г. не в одинаковой мере отразилось на изменении солености воды разных его частей [Щурова, 2017; Совга и др., 2017, 2019]. В Восточном Сиваше рост солености отмечен в большей степени на станциях 3 и 4 (Рисунок 4.2) – в районах, расположенных дальше от пролива Тонкого. Наиболее высокие значения солености определены в Южном Сиваше, где в 2013 г. соленость составляла 54 ‰, уже осенью 2018 г. – 93 ‰, а в 2020 г. – 110 ‰. Таким образом минерализация залива постепенно приближается к естественной, какой она была до введения в строй Северо-Крымского канала [Ерёмина, 2021].

Наблюдаемый рост солености с одной стороны повышает ресурсный потенциал Восточного и особенно Южного Сиваша, что делает эти районы перспективными для галургического производства, с другой стороны вызывает трансформацию всей экосистемы залива, который является водно-болотным угодьем международного значения. Изменение гидрологического и гидрохимического режимов в результате воздействия антропогенного фактора требует дальнейшего мониторинга и пересмотра концепции природопользования в этой акватории.

4.2 Изменчивость морфометрических характеристик залива Сиваш по спутниковым данным

Процесс изменения водно-солевого режима залива Сиваш после перекрытия СКК также подтвердился в ходе анализа спутниковой информации. Определение изменчивости морфометрических характеристик залива Сиваш выявило сокращение площадей водоемов Присивашья.

Возможным инструментом оперативного контроля такого сложного, с точки зрения экспедиционных работ, объекта как залив Сиваш являются неконтактные методы наблюдений, которые осуществляются с помощью аэрокосмического мониторинга природных объектов. Использование современных спутниковых методов позволяет оценивать динамику морфометрических параметров залива Сиваш и фиксировать миграцию береговой линии в условиях постоянно меняющихся антропогенных и природно-климатических факторов [Позаченюк и др., 2016; Ерёмина и др., 2018d]. Географическое расположение залива, его труднодоступность делают дистанционные методы исследования ключевыми в понимании и прогнозировании изменений процессов во всей его акватории.

На основе данных оцифровки спутниковых изображений серии Landsat рассчитаны значения морфометрических характеристик площадей водного зеркала Восточного Сиваша (включая Южный Сиваш), прибрежных водоемов и рисовых чеков. Полученные результаты представлены в Таблице 4.1.

Как следует из данных Таблицы 4.1 сопоставление полученных значений морфометрических характеристик Восточного и Южного Сиваша и Присивашья показало, что общие площади озер-лагун, рисовых чеков и водоемов мелиоративной системы в меженный период (июль – август) сократились на 79,24 км², при этом 2,45 км² приходится на пресные и соленые водоемы, 76,79 км² – на рисовые чеки [Ерёмина и др., 2017b, 2018c, 2018d].

Таблица 4.1 – Морфометрические характеристики Восточного Сиваша, полученные по данным спутниковых снимков серии Landsat 8 [Ерёмина и др., 2018d]

	10 августа 2013 г.				02 августа 2016 г.			
	Площадь, км ²	Средняя глубина, м	Объем, км ³	Удельная поверхность, км ² / км ³	Площадь, км ²	Средняя глубина, м	Объем, км ³	Удельная поверхность, км ² / км ³
Восточный Сиваш	1262,2	1,5	1,89	667,83	1262,2	1,5	1,89	667,83
Водоемы	72,09	0,3	0,0216	3337,50	69,64	0,3	0,0208	3348,08
Рисовые чеки	76,79	0,7	0,053	1448,87	–	–	–	–
Сумма	1411,08	–	1,96	5454,2	1331,84	–	1,9108	4015,46

Сопоставление ИК-каналов разновременных изображений до и после 2014 г. и их анализ позволили выделить участки прибрежной зоны Среднего, Восточного и Южного Сиваша, подвергшиеся наибольшим изменениям после прекращения работы СКК. Для иллюстрации приведены RGB-композиции ИК-каналов изображений сканера Landsat-5 и Landsat-8 в периоды половодья (май) и межени (август) для районов Среднего и Северной части Восточного Сиваша (Рисунки 4.7–4.8) и центральной части Восточного Сиваша (Рисунок 4.9). Красным цветом обозначены обмелевшие участки ранее затопленной суши, голубым – области подтопления.

Для береговой зоны Среднего Сиваша, отделенного от остальной части залива дамбами, прекращение поступления вод по СКК привело к перестройке водного режима. В период половодья (Рисунок 4.7) за счет атмосферных осадков происходит заполнение чаши водоема и прибрежных лагун в тех же границах, что и ранее, с незначительными вариациями от года к году. Активное испарение в

летний период приводит к осушению в первую очередь отмелей участков водоема.

Без дополнительной подпитки водами СКК площади осушаемых участков значительно увеличились. На Рисунке 4.8, отражающем изменения в меженный период, обращают на себя внимание обширные области красного цвета в западной части Среднего Сиваша: практически полностью высохли прибрежные отмели, заливы и проливы, отделяющие острова, сократились площади прибрежных водоемов. Согласно картам Генштаба по состоянию местности на 1988 год глубины их составляли до 0,4 м.

Восточный Сиваш имеет ограниченный водообмен с Азовским морем через пролив Тонкий, представляющий собой открывающуюся в залив разветвленную дельту [Совга и др., 2018] в северной части Арабатской Стрелки. Основное поступление вод осуществляется через 2 главных рукава. Недостаток приходной составляющей вод из СКК в водном балансе Восточного Сиваша должен частично компенсироваться увеличением притока вод из Азовского моря. В настоящее время происходит перестройка дельты, отражающаяся в увеличении площади осушек как в период межени (Рисунок 4.7), так и в период половодья (Рисунок 4.8). При этом основные пути поступления воды из моря в залив, имея большую глубину чем окружающие участки, пока не меняют своего положения и размера.

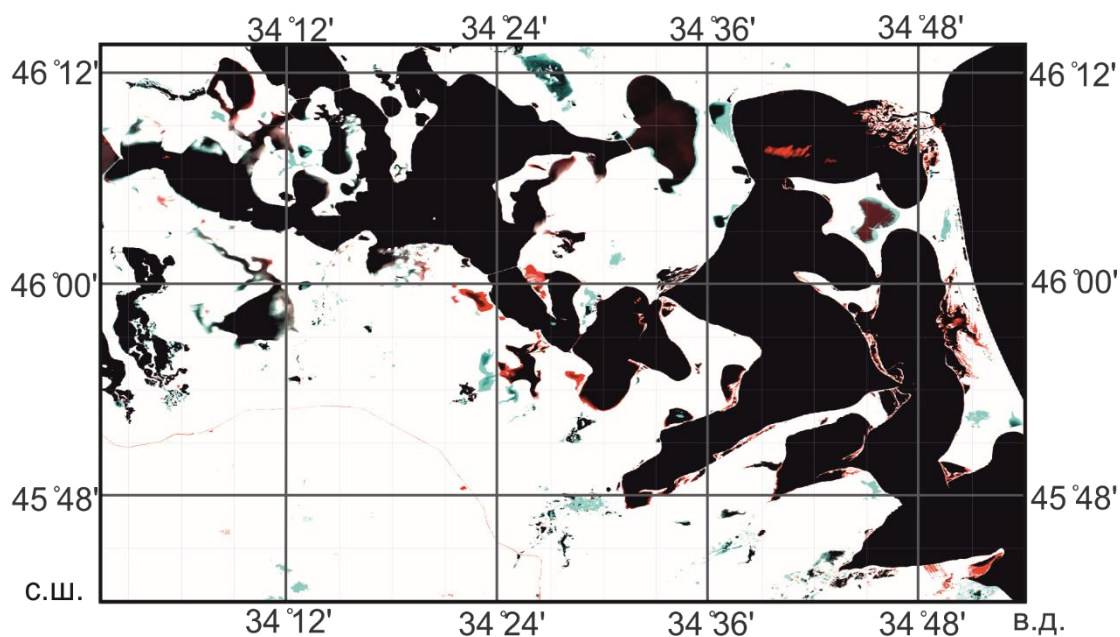


Рисунок 4.7 – RGB-композит ИК-каналов изображений сканера Landsat-8 от 22 мая 2013 г. и 12 мая 2015 г. Среднего и северной части Восточного Сиваша. Красным цветом обозначены обмелевшие участки ранее затопленной суши, голубым – области подтопления [Ерёмина и др., 2018d]

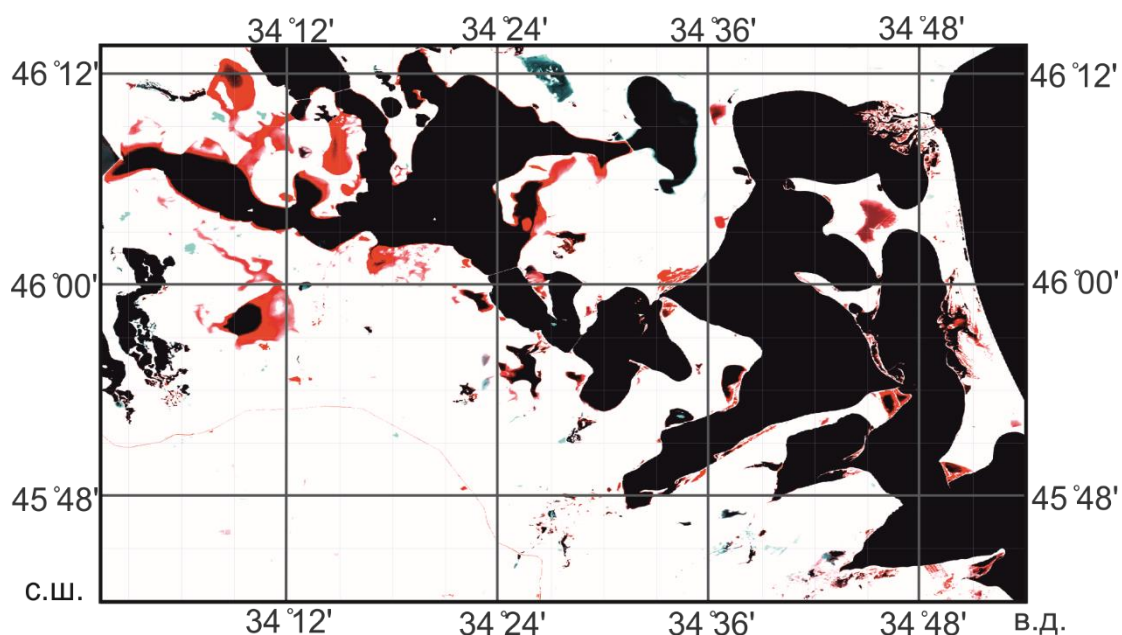


Рисунок 4.8 – RGB-композит ИК-каналов изображений сканера Landsat-8 от 10 августа 2013 г. и 02 августа 2016 г. Среднего и северной части Восточного Сиваша. Красным цветом обозначены обмелевшие участки ранее затопленной суши, голубым – области подтопления [Ерёмина и др., 2018d]

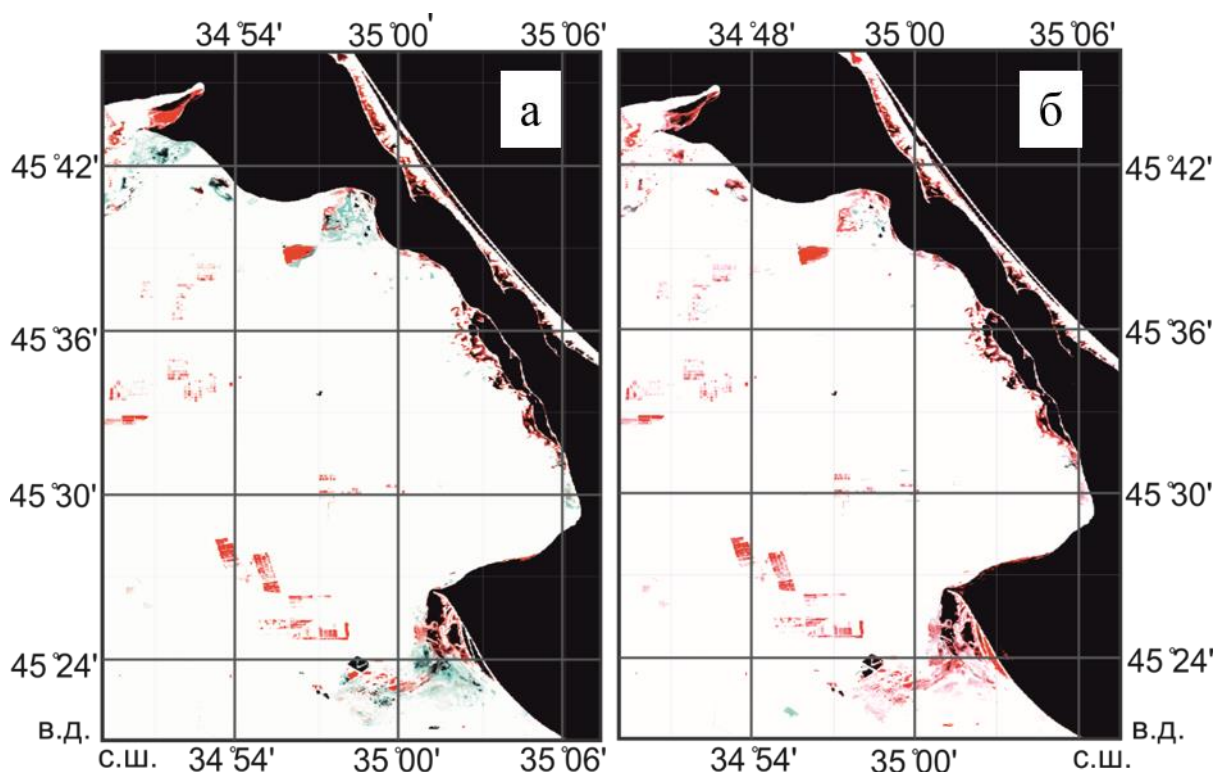


Рисунок 4.9 – RGB-композит ИК-каналов изображений сканера Landsat-5 и Landsat-8: от 22 мая 2013г. и 12 мая 2015г. (а), от 10 августа 2013 г. и 02 августа 2016 г. (б). Красным цветом обозначены обмелевшие участки ранее затопленной суши, голубым – области подтопления [Ерёмина и др., 2018d]

Анализ RGB-композитов ИК-каналов разновременных изображений показал, что залив Восточный Сиваш после перекрытия СКК практически не изменил своих границ, изменения площади водного зеркала незначительны (Таблица 4.1). Осушению подверглись отделенные от залива пересыпями и косами прибрежные мелководные лагуны и заливы (Рисунки 4.8–4.9). В Северной части Восточного Сиваша в летний период за счет интенсификации испарения увеличились площади осушек. В районе Шакалинского сужения сезонные изменения высохших участков осушек не отмечены [Ерёмина и др., 2018с; Ерёмина и др., 2018d].

Существенным изменениям подверглись площади водоемов Восточного Присивашья, рисовых чеков и искусственных мелиоративных сооружений, полное или частичное питание которых осуществлялось за счет вод СКК. Так к

северо-западу от Шакалинского сужения интенсивным красным цветом отображен накопительный водоем (Рисунок 4.9), существовавший до 2014 г. В период максимального поступления вод СКК в залив Сиваш (до середины 90-х гг. 20-го века) он имел в несколько раз большую площадь.

При наложении изображений до и после 2014 г. отчетливо идентифицируются поля для выращивания риса (рисовые чеки), затоплявшиеся водой по технологии выращивания культуры (Рисунок 4.9).

Таким образом, использование спутниковых снимков высокого разрешения позволило выявить изменения в структуре береговой линии залива Сиваш и оценить сокращение величин площадей озер-лагун, рисовых чеков и водоемов мелиоративной системы Восточного и Южного Сиваша и Присивашья после перекрытия СКК [Ерёмина и др., 2018с; Ерёмина и др., 2018d].

4.3 Динамика площади тростниковых зарослей в заливе Сиваш после перекрытия Северо-Крымского канала по спутниковым данным

Во время работы Северо-Крымского канала поступающие из него воды содержали значительные концентрации биогенных элементов и органических веществ. В местах, занятых до середины прошлого века ветровыми осушками («засухами»), стали развиваться водно-болотные тростниковые комплексы, которые получили очень широкое распространение во всей зоне интенсивного орошения и рисосеяния – от Перекопа и берегов Каркинитского залива до самых восточных заливов Сиваша у Ак-Монайского перешейка [Костин, 2019].

Северо-Крымский канал в 2014 г. был перекрыт, в результате изменился водно-солевой режим, сократилось поступление пресных вод в залив, соленость начала расти в Восточном и Южном Сиваше. Такие изменения в солевом режиме залива отразились на всей его экосистеме, в том числе на тростниковых зарослях, начавших активно отмирать, сокращаясь в площади, что было отмечено в работах [Shadrin et al., 2018, 2019], где уделено внимание изменению видового состава

биоты в заливе после перекрытия канала и обсуждалось возможное влияние отмирания тростника на динамику берега.

Сопоставление разновременных снимков показало, что в целом с 2015 г. отмечается значительное сокращение площади тростниковой растительности. В 90-е гг. 20-го века она составляла 20–40 км², но с конца 1990-х и в начале 2000-х, гг. отмечается ее существенное уменьшение. В настоящее время площадь тростниковой растительности вблизи берегов Центрального Присивашья составляет около 15 км² [Ерёмина и др., 2020, Совга и др., 2020].

Наибольшую площадь плавни занимали в Рогачинском заливе (между полуостровами Тюп-Тархан и Тюп-Джанкой) – более 8 км² (Рогачинский залив обозначен цифрой 1 на Рисунке 4.10). При этом их площадь в исследуемый период сокращалась незначительно – это связано с тем, что в верховье залива открываются русла балок Победной (где проложен главный коллектор СКК № 5 (ГК-5)) и Мирновки (ГК-4-1). Балки Мирновка и Степная (ГК-4), проходят через крупнейший город Равнинного Крыма – Джанкой. Поэтому, несмотря на прекращение сбора дренажных вод, русла этих балок обводнены за счет сброса сточных вод. Это подтверждается и незначительным увеличением солёности в заливе: по данным, приведенным в настоящей работе в Разделе 4, в Рогачинском заливе она возростала незначительно с 26 до 34 ‰ и только в 2020 г. достигла 41 ‰ при отсутствии явных сезонных скачков [Ерёмина и др., 2020].

Князевский залив расположен южнее, между п-овами Тюп-Кангил и Тюп-Джанкой и дальше от пролива Тонкого. Площадь, занимаемая тростниковыми сообществами, здесь значительно уменьшилась еще в 2000-х гг. Дальнейшее ее сокращение фиксируется на спутниковых снимках в связи с уменьшением поступления дренажных вод (Рисунок 4.10). За этот период отмечается рост солёности вод данного залива.

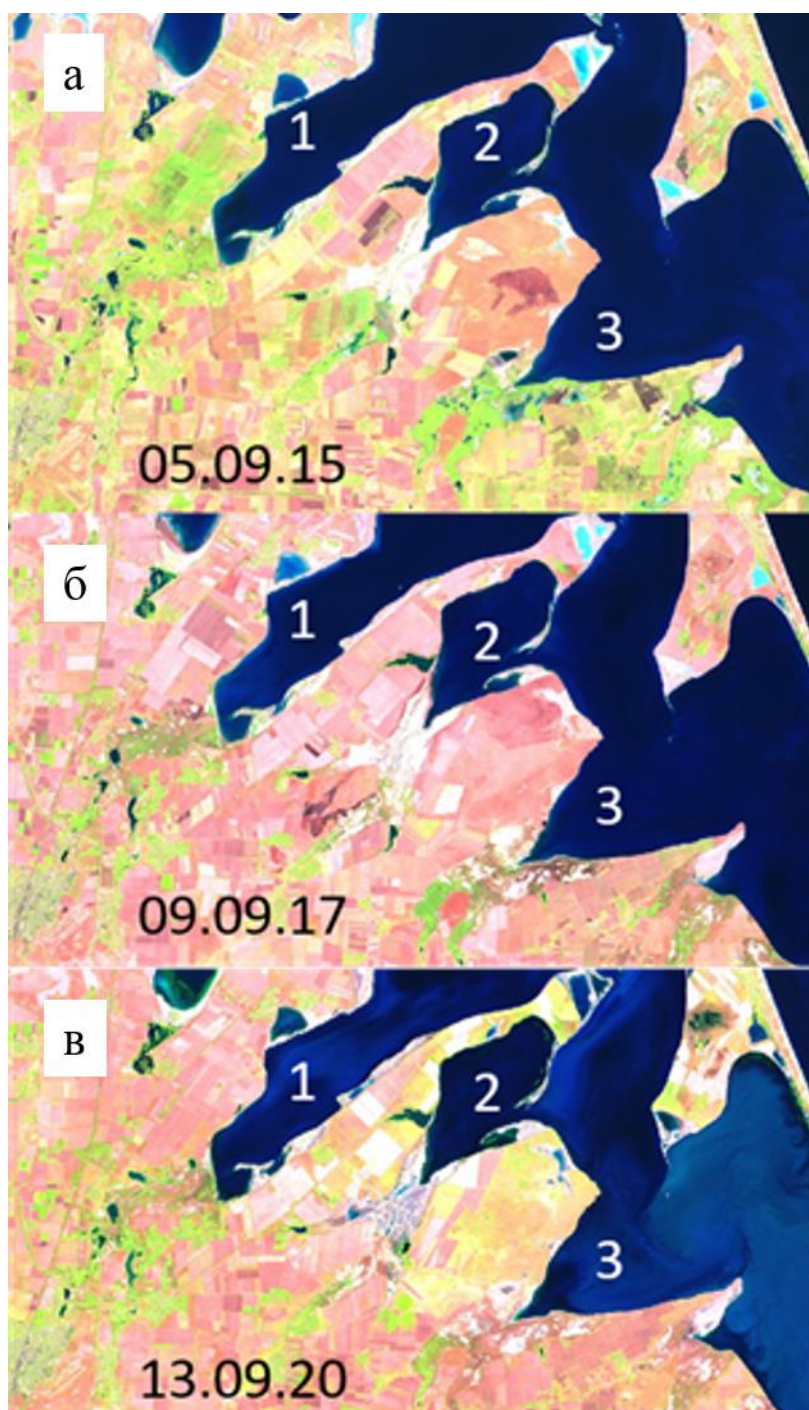


Рисунок 4.10 – Спутниковые снимки Sentinel-2 L1C (сочетание каналов 11:8:4) акватории Восточного Сиваша от 05.09.2015 (а), от 09.09.2017 (б), от 13.09.2020 (в). Тростниковая растительность отражена темно-зеленым цветом (1 – Рогачинский залив; 2 – Князевский залив; 3 – Балагановский залив)

[Ерёмина и др., 2020]

В Балагановском заливе (между полуостровами Тюп-Кангил и Кут) площадь тростниковой растительности в 1995 г. составляла 15 км², а в 2017 г. –

всего 5 км². В этом заливе сокращение ее площади с 2014 г. было наиболее значительным. Это связано с тем, что вблизи залива ранее располагались районы рисосеяния, на которых использовалось значительное количество поливной воды, сбрасываемой в виде дренажных вод в Сиваш. Поэтому и соленость вод в заливе возросла с 33 ‰ в 2014 г. до 62 ‰ в 2020 г. Пространства прибрежной территории залива, где ранее произрастала тростниковая растительность, трансформировались в ветровую осушку («засуху») [Ерёмина и др., 2020].

В Южном Сиваше был рассмотрен район Алексеевской засухи (Рисунок 4.11). В этой части лагуны отмечена самая высокая изменчивость солености после перекрытия СКК. Весной 2018 г. соленость здесь составляла 75 ‰, в 2019 г. – 87 ‰, а летом 2020 г. доросла до отметки 108 ‰. Поэтому сокращение тростниковой растительности происходило особенно интенсивно (Рисунок 4.11). Отмирание тростникового берега в этом районе было отмечено визуально во время экспедиционных исследований. На спутниковом снимке (Рисунок 4.11, б) видно, что полностью пересох пресный искусственный водоем в северо-западной части засухи. Значительные пространства, ранее занятые растительностью, в настоящий момент представляют с собой ветровую осушку, как это было до начала работы СКК.



Рисунок 4.11 – Спутниковые снимки Sentinel-2 L1C (сочетание каналов 11:8:4) в акватории Алексеевской засухи Южного Сиваша от 02.09.2015 (а), 13.09.2020 (б). Тростниковая растительность отражена темно-зеленым цветом [Ерёмина и др., 2020]

Таким образом, сокращение занятых тростниковой растительностью (плавнями) площадей в верховьях заливов Восточного и Южного Сиваша в целом коррелирует с ростом солености, вызванным снижением пресной составляющей водного баланса водоема. Однако эта связь имеет сложный характер и зависит от современного поступления пресных вод (в том числе сбросных канализационных и дренажных), солености, конфигурации побережья и удаленности от пролива Тонкого. Уменьшение площади тростниковой растительности на современном этапе продолжает тенденцию, начавшуюся с конца 90-х гг. [Ерёмина и др., 2020].

4.4 Практические рекомендации по научно-обоснованной сети наблюдений как части экологического мониторинга залива Сиваш

На основании анализа имеющейся информации о состоянии акватории залива Сиваш, полученной после перекрытия СКК как автором настоящей работы, так учреждениями и организациями различной ведомственной подчиненности предлагаются рекомендации [Совга и др., 2018] для системы мониторинга водно-солевого режима залива Сиваш в условиях вхождения Крыма в социально-правовое поле Российской Федерации. В данных рекомендациях учитываются современные границы водно-болотного угодья международного значения «Восточный Сиваш» в соответствии с приказом Министерства экологии и природных ресурсов республики Крым от 18 декабря 2017 года № 2919 «Об утверждении Положения о водно-болотном угодье (ВБУ) «Восточный Сиваш». Предложения по созданию предварительной системы мониторинга восточной части залива Сиваш с учетом его современного состояния были представлены в работах автора [Ерёмина и др. 2018b; Совга и др., 2018].

Схема береговых станций для проведения полевых работ в Восточном и Южном Сиваше в пределах современной юрисдикции республики Крым представлена на Рисунке 4.12. За ее основу были взяты пункты наблюдений МГИ и СО ФГБУ «ГОИН», на которых уже проводились наблюдения с 2014 г. Выполненные работы включали определение термohалинных и гидрохимических

показателей. Не маловажным фактором является то, что к станциям есть автомобильный доступ. В проведенных ранее экспедициях гидрологические станции выполнялись на Арабатской Стрелке, в частности, вблизи Арабатской крепости, на участке бывшего Сольпрома. В этом районе ранее Гидрометслужбой проводились регулярные наблюдения на МГП Соляное. Представляется необходимым Крымскому УГМС восстановить здесь регулярные наблюдения (с дискретностью по времени 12 часов) за соленостью и температурой воды, уровнем моря, метеорологическими условиями. Сезонные съемки гидрологических и гидрохимических условий Южного Сиваша может выполнять МГИ РАН в рамках соответствующего Государственного задания и СО ФГБУ «ГОИН» - организации, обладающие необходимыми кадрами, оборудованием, транспортными средствами и аккредитованной химической лабораторией [Совга и др., 2018].

В Восточном Сиваше Крымскому УГМС рекомендуется восстановить регулярные наблюдения на МГП Чонгарский мост, прерванные в 2014 г. Наблюдения на этом посту проводились почти 80 лет, их восстановление позволит получать оценки изменений гидрометеорологических и гидрологических условий этой части залива на различных масштабах (от синоптического до межгодового).

Кроме восстановления наблюдений на МГ Чонгарский мост, следует разместить одну – две дополнительные станции севернее по Арабатской Стрелке (Рисунок 4.12). В этих районах на спутниковых снимках наблюдаются изменения в гидрооптических свойствах воды, что, возможно, вызвано фильтрацией вод через бар Арабатской Стрелки. Интрузии Азовских вод могут вносить существенный вклад в водный баланс Сиваша, поэтому контроль солености именно в этом районе необходим [Совга и др., 2018].



Рисунок 4.12 – Предлагаемая схема станций в районе Восточного и Южного Сиваша. Красная линия – граница ВБУ «Восточный Сиваш»; черная линия – государственная граница; ▲ – места станции; цифрами обозначены наиболее ценные участки территории ВБУ по приказу № 2919: Калиновский полигон с прилегающими акваториями (1); устьевая зона р. Победная (2); система островов и заливов Коянлы у м. Тюп-Тархан (3); участок между Арабатской Стрелкой и с. Дмитровка (4); отдельные участки Индольского залива (5); Арабатская Стрелка, МГП Соляное (6); Арабатская Стрелка, острова Сольпрома (7); МГП Чонгарский мост (8) [Совга и др., 2018]

На основе проведенного анализа информации о состоянии акватории залива Сиваш в предлагаемой системе наблюдений учтены те изменения, которые произошли в акватории и в береговой зоне залива Сиваш после перекрытия СКК. Очень важным для оценки пресноводной составляющей баланса залива Сиваш является контроль за поступлением вод реки Салгир особенно в период паводков. В предлагаемой системе наблюдений целесообразно осуществлять оценку возможного поступления вод Салгира в Сиваш весной, станция должна быть расположена в районе устья реки в Шакалинском сужении (Рисунок 4.12).

В рамках данной системы наблюдений предполагается продолжить анализ спутниковых снимков Восточного и Южного Сиваша с целью дальнейшей оценки возможной деградации тростниковой растительности после перекрытия СКК.

В качестве информационной основы исследования ледовых условий в прибрежной зоне залива до 2014 г., кроме спутниковых снимков, использовались данные регулярных наблюдений за ледовым покровом на морских гидрометеорологических постах побережья Восточного Сиваша (Чонгарский мост, Стрелковое) и пролива Генический – МГ Геническ [Дьяков и др., 2013]. На сегодняшний день данные наблюдений в МГ Геническ (Украина) получить не представляется возможным, поэтому мониторинг ледовой обстановки предлагается вести с помощью восстановленных наблюдений на МПП Чонгарский мост и спутниковой информации. Анализ данных сканеров MODIS спутников Terra (EOS AM) и Aqua (EOS PM), которые существуют в открытом доступе [Архив Modis; Архив Giovanni], позволяет оценить продолжительность ледового режима и пространственное распределение ледового покрова. Данные сканеры выполняют съемку местности 1–2 раза в день, что во многом решает задачу мониторинга термических и ледовых условий в Сиваше. Следует отметить, что анализ ледовой обстановки и пространственное распределение ледового покрова в условиях роста солености после перекрытия СКК приобретают особую актуальность.

В рамках системы наблюдений предлагается осуществлять расчёты площадей водного зеркала залива Сиваш, прибрежных водоемов и положения

береговой линии затопляемых и осушаемых территорий с целью отслеживания динамики их изменений после перекрытия СКК в 2014 г. [Совга и др., 2018].

Предложенная МГИ РАН научно-обоснованная сеть станций отбора проб была практически реализована в экспедиционных исследованиях МГИ РАН в 2018–2020 гг. и планируется к реализации в будущих исследованиях.

Результаты работы по заливу Сиваш после перекрытия СКК доложены на заседании комиссии Министерства экологии и природных ресурсов республики Крым 21 ноября 2018 г. Дано научное обоснование необходимости восстановления в акватории залива Сиваш работы морского гидрометеопоста (МГП) Чонгарский мост и МГП Соляное. Получены одобрение и поддержка Министерства в этом вопросе. На сегодняшний день филиал ФГБУ «Крымское УГМС» получил указания к разработке проекта по восстановлению одного или двух постов, что является практическим приложением проделанной работы.

Выводы к разделу 4

В разделе 4 приведены впервые полученные автором данные об изменении водно-солевого режима залива Сиваш после перекрытия Северо-Крымского канала в 2014 г.

В результате сокращения поступления пресных вод в залив, существенно возросла соленость воды, отмеченная в ходе экспедиционных исследований в 2014–2020 гг. Сравнение полученных в ходе полевых работ, данных показало, что перекрытие Северо-Крымского канала не в одинаковой мере отразилось на изменении солености воды разных частей залива Сиваш. В Восточном Сиваше соленость возростала с севера на юг, по мере отдаления от пролива Тонкого. Весной 2014 г. соленость менялась от 27 до 33 ‰, а уже в 2020 г., спустя 6 лет после перекрытия канала, соленость значительно выросла на всех станциях, достигая 60–70‰. В Южном Сиваше наблюдался высокий сезонный рост солености – до 17‰ и межгодовой рост: за 6 лет после перекрытия канала соленость возростала вдвое и приблизилась к значению, соответствующему 1969 г.

На динамику солености воды Западного и Среднего Сиваша, гидрологический и гидрохимический режимы которых регулируются искусственно дамбами, перекрытие Северо-Крымского канала не повлияло, что было отмечено нами при анализе данных, представленных Крымским содовым заводом.

Сопоставление полученных значений морфометрических характеристик Восточного, Южного Сиваша и Присивашья во время функционирования и после перекрытия Северо-Крымского канала с использованием спутниковых снимков показало, что общие площади озер-лагун, рисовых чеков и водоемов мелиоративной системы в меженный период (июль–август) сократились на 79,24 км² (5,6% от общей площади акватории Восточного Сиваша и водоемов Присивашья), при этом 2,45 км² приходится на пресные и соленые водоемы, 76,79 км² – на рисовые чеки.

Площадь, занятая тростниковой растительностью, определенная по спутниковым снимкам, в Восточном и Южном Сиваше после перекрытия СКК в 2014 г. испытывает тенденцию к уменьшению. Основной причиной этого явилось сокращение сброса пресной воды по дренажно-коллекторной сети. Это подтверждается постоянным ростом солености в акватории Восточного и Южного Сиваша, который впервые был зафиксирован в 2014 г. и продолжается в настоящее время. Сокращение площади тростниковой растительности продолжает тенденцию, наметившуюся в конце 90-х гг. На рассматриваемом участке Присивашья максимальное сокращение площади характерно для Князевского и Балагановского заливов, а также Алексеевской засухи (Южный Сиваш). В Рогачинском заливе, несмотря на прекращение сброса дренажных вод, сохраняется сток сточных вод, поэтому здесь тростниковые сообщества сохранились лучше всего.

Залив Сиваш является трансграничным водоемом, водно-болотным угодьем международного значения с огромным ресурсным потенциалом. Несмотря на это, с 2014 г. в акватории залива не существует ни одного гидрометеопоста, где выполнялись бы регулярные наблюдения. Экспедиционные исследования

выполняются разрозненно, не во все сезоны, и количество станций не позволяет оценить динамику тех изменений, которые происходят в заливе, после перекрытия Северо-Крымского канала в условиях глобальной перестройки его экосистемы.

Результаты настоящей работы позволили предложить научно-обоснованную сеть станций отбора проб в заливе Сиваш, которая была практически реализована в экспедиционных исследованиях МГИ в 2018–2020 гг.

Итоги работы МГИ РАН по заливу Сиваш после перекрытия СКК доложены на заседании комиссии Министерства экологии и природных ресурсов республики Крым 21 ноября 2018 г. Дано научное обоснование восстановления сети наблюдений Росгидромета на МГП Чонгарский мост и Соляное. Получены одобрение и поддержка Министерства в этом вопросе, на сегодняшний день филиал ФГБУ «Крымское УГМС» получил указания к разработке проекта по восстановлению одного или двух постов, что является практическим приложением проделанной работы.

Результаты исследований, представленных в четвертом разделе диссертации, опубликованы в статьях [Ломакин и др., 2014а; Позаченюк и др., 2016; Ерёмина и др., 2018d, 2020; Sovga et al., 2018, 2020, 2021; Совга и др. 2013, 2018; Ерёмина, 2021], тезисах и материалах конференций [Ломакин и др., 2014b; Щурова и др., 2016d; Щурова, 2017; Совга и др., 2017, 2019, 2020; Ерёмина и др., 2017а, 2017b, 2018а, 2018b, 2018c].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Объект исследования диссертационной работы – залив Сиваш Азовского моря. Это уникальное восстанавливаемое месторождение минеральных солей, наиболее антропогенно и техногенно преобразованная акватория прибрежной зоны Крыма, которая является при этом водно-болотным угодьем международного значения, внесенным в Рамсарскую конвенцию в 1978 году.

Диссертационная работа посвящена комплексному изучению природно-климатических и антропогенных факторов, формирующих водно-солевой режим залива Сиваш, его водный баланс. Основные научные результаты представленной работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. Проведенный в работе анализ всех доступных данных из научной литературы не только показал фрагментарность проведенных ранее исследований, но и позволил выделить те природно-климатические и антропогенные факторы, уточнение и корректировка которых необходима как при установлении причин изменчивости водно-солевого режима залива, так и при расчетах его водного баланса.

2. Водно-солевой режим залива Сиваш формируется объемами поступающих вод из Азовского моря, как одной из основных приходных статей его водного баланса. При использовании современных методик в диссертационной работе осуществлена коррекция оценки объемов вод, поступающих в залив из Азовского моря через пролив Тонкий. До работы Северо-Крымского канала через пролив в залив Сиваш поступало в среднем $0,81 \text{ км}^3/\text{год}$ азовоморских вод, которые приносили около 8 млн тонн солей. С началом работы канала, и поступлением больших объемов пресных вод с сельскохозяйственных угодий ($0,6 \text{ км}^3/\text{год}$), уровень воды в заливе значительно вырос, а перепад уровней между Азовским морем и Сивашом сократился в среднем на 10 см. Высокая изменчивость уровня моря, сокращение перепада между заливом и морем повлияли на ход водообмена в проливе, сократился приток вод из Азовского моря и увеличился отток сивашских вод, суммарный сток (с учетом оттока из залива Сиваш) составлял $0,3$

км³/год, это в два раза ниже значения стока до работы канала. Полученные в работе уточненные значения были использованы в воднобалансовых расчетах для залива Сиваш и для оценки климатической изменчивости его составляющих.

3. Впервые в настоящей работе с помощью спутниковых данных зафиксированы случаи предполагаемого просачивания вод Азовского моря через бар Арабатской Стрелки, как еще одного источника поступления азовоморских вод в залив Сиваш и фактора, влияющего на его водно-солевой режим. Использование данных NOMADS NOAA позволило предположить, что просачивание вод через бар Арабатской Стрелки возможно связано с предшествующими ветровыми условиями, которые характеризовались сильными, >10м/с, ветрами восточного и северо-восточного направления.

4. В работе проведено сравнение сезонной и межгодовой изменчивости температурного и ледового режимов акватории залива Сиваш с аналогичной изменчивостью в Азовском море с использованием спутниковых данных. Показано влияние мелководности залива на температуру воды по сравнению с Азовским морем: примерно на 2,5 °С в весенний и осенний сезоны. Отмечено сокращение продолжительности ледового режима в среднем на 30 % из-за высокой солености в Восточном и Южном Сиваше, выделены незамерзающие районы залива.

5. Осуществленная в работе коррекция годовых объемов атмосферных осадков, выпадающих на поверхность залива, показала, что во время работы канала вместе с другими факторами увеличение атмосферных осадков могло также повлиять на распределение вод залива Сиваш. Согласно с проведенным в работе анализом за период с 1966 по 2013 гг., среднемноголетнее значение годового объема осадков на поверхность залива составляло 1,45 км³/год. Месячные суммы в среднем составляли величины от 0,09 до 0,18 км³/мес. Величина линейного тренда годовых объемов составила 0,016 км³/10 лет.

6. Выполненное в настоящей работе уточнение отдельных статей водного баланса залива: объема выпадающих атмосферных осадков, стока азовоморских вод, поступающих через пролив Тонкий, позволили оценить изменение объема залива ΔВ, как в период его условно-естественного состояния, так и при

различных режимах работы СКК. Показано, что в период условно-естественного состояния залива (1966–1970 гг.) наблюдался дефицит приходной составляющей, и залив представлял собой естественный испаритель, в котором соли концентрировались до рассолов. В период функционирования Северо-Крымского канала (1970–2013 гг.) приходная составляющая водного баланса превышала расходную, что повлекло за собой распреснение залива.

7. Перекрытие Северо-Крымского канала в 2014 г. привело не только к значительным изменениям в водно-солевом режиме залива Сиваш, но и глобальной перестройке всей его экосистемы. Сокращение пресноводной составляющей водного баланса залива вызывало рост солености, который был подтвержден в ходе экспедиционных исследований в 2014–2020 гг. По данным экспедиции в 2020 г., спустя 6 лет после перекрытия канала, значение солености в Восточном Сиваше превысило 70 ‰, это в два раза выше значений 2014 г. В Южном Сиваше, где еще в 2013 г. соленость составляла 54‰, в 2018 г. выросла до 93 ‰, а летом 2020 г. уже составляла 110 ‰, что в два раза выше показателей 2013 г. Такое значение солености было характерно для Южного Сиваша до введения в работу Северо-Крымского канала и последний раз было зафиксировано в 1969 г. Таким образом, впервые проанализирована динамика солености в заливе Сиваш после перекрытия Северо-Крымского канала. Для Восточного и Южного Сиваша впервые показаны отличия в сезонной и межгодовой динамике роста солености в различных частях акваторий по мере удаления от пролива Тонкого. Показано, что водно-солевой режим залива Сиваш возвращается к своему естественному состоянию.

8. Впервые, с использованием спутниковых данных, после перекрытия Северо-Крымского канала рассчитаны общие площади озер-лагун, рисовых чеков и водоемов мелиоративной системы Присивашья, которые сократились на 79,24 км² (5,6% от общей площади акватории Восточного Сиваша и водоемов Присивашья), при этом 2,45 км² приходится на пресные и соленые водоемы, 76,79 км² – на рисовые чеки. Также впервые получены предварительные оценки

изменения площадей тростниковой растительности в Восточном и Южном Сиваше за период 2015–2020 гг., с явной тенденцией к уменьшению.

9. Предложена современная структура научно-обоснованной сети расположения 14 пунктов наблюдений за изменениями водно-солевого режима залива Сиваш, включающей особо охраняемые территории водно-болотного угодья «Восточный Сиваш» в его современных границах, что актуально для системы экологического мониторинга Восточного Сиваша. Предложенная структура сети наблюдений была практически реализована в экспедиционных исследованиях МГИ в 2018–2020 гг.

10. По результатам работы по заливу Сиваш после перекрытия СКК получено научное обоснование необходимости восстановления работы морских гидрометеопостов Чонгарский мост и Соляное, о чем был сделан доклад на заседании комиссии Министерства экологии и природных ресурсов республики Крым 21 ноября 2018 г. Получены одобрение и поддержка Министерства в этом вопросе, на сегодняшний день филиал ФГБУ «Крымское УГМС» получил указания к разработке проекта по восстановлению одного или двух постов, что является практическим приложением проделанной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артюхин, Ю.В. Волновое разрушение обвальных берегов Азовского моря / Ю.В. Артюхин // Геоморфология. – 1982. – №4. – С. 51–58.
2. Архив Giovanni. – <https://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 10.03.2017)
3. Архив метеоданных. – <https://rp5.ru/> (дата обращения 14.02.2020)
4. Архив MODIS. – <https://modis.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 23.03.2016)
5. Барабаш, М.Б. Современные изменения климата / М.Б. Барабаш // Природа Украинской ССР. Климат. – Киев: Наукова думка, 1984. – С. 160–169.
6. Баранник, В.П. Гидрохимические исследования Сиваша (Сообщение I) / В.П. Баранник, В.А. Жоров, А.А. Безбородов, В.И. Мишарев // Морские гидрофизические исследования. – 1973. – №3(62). – С. 178–181.
7. Баранник, В.П. Гидрохимические исследования Сиваша и озер Присивашья (Сообщение II) / В.П. Баранник, В.А. Жоров, Е.Е. Совга, С.В. Ляшенко, А.А. Безбородов, В.И. Мишарев // Морские гидрофизические исследования. – 1974. – №1(64). – С. 184–193.
8. Богданова, Э.Г. Новая модель корректировки измеренных осадков и ее применение в полярных районах России / Э.Г. Богданова, В.С. Голубев, Б.М. Ильин, И.В. Драгомилова // Метеорология и гидрология. – 2002. – № 10. – С. 68–94.
9. Боровская, Р.В. Особенности ледовых условий в Азовском море и Керченском проливе в зимний сезон 2005/06 г. / Р.В. Боровская, П.Д. Ломакин // Метеорология и гидрология. – 2008. – № 7. – С. 67–72.
10. Боровская, Р.В. Экологическое состояние акватории Восточного Сиваша в раннелетний сезон 2020 года / Р.В. Боровская, С.С. Жугайло, Д.О. Кривогуз, В.А. Шляхов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2021. – № 1. – С. 84–98.

11. Браславский, А.П. Методика определения исправленных величин атмосферных осадков при срочных наблюдениях / А.П. Браславский, Л.Р. Струзер, К.Б. Шергина // Труды ГГО. – 1975.– Вып. 341. – С. 32–50.
12. Браславский, А.П. Определение исправленных величин атмосферных осадков по методике ГГО-КазНИИ / А.П. Браславский, С.П. Чистяева // Труды КазНИИ. – 1980. – Вып. 65. – С. 3–93.
13. Бурдиян, Н.В. Микробиологические показатели донных отложений залива Сиваш (Крым) / Н.В. Бурдиян, А.Б. Боровков, Е.А. Тихонова, С.В. Алемов // Пресноводные экосистемы – современные вызовы: тезисы докладов и стендовых сообщений Международной конференции, 10-14 сентября, 2018. – Иркутск : ООО «Мегапринт», 2018. – С. 118.
14. Ветро-волновые условия прибрежной зоны Азово-Черноморского региона / В.П. Евстигнеев [и др.]. – Севастополь: ИПТС, 2017. – 320 с.
15. Воскресенский, П.И. Техника лабораторный работ / П.И. Воскресенский. – М.–Л.: Химия, 1964. – 552 с.
16. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме / Под ред. А.В. Фролова. – М.: Росгидромет, 2014. – 60 с.
17. Геологическая Служба США (U.S. Geological Survey). – <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 21.10.2017)
18. ГК «СКАНЭКС» – <http://www.scanex.ru/data/satellites/terra-aqua-modis/> (дата обращения 23.03.2016)
19. Гидрометеорологические условия морей Украины. Том 2: Черное море / Ю.П. Ильин [и др.]. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. – 421 с.
20. Гидрометеорологические условия морей Украины. Том 1: Азовское море / Ю.П. Ильин [и др.]. – Севастополь, 2009. – 402 с.
21. Гидрологический справочник морей СССР. Том 3: Азовское море, Вып. 3 / под ред. Н.М. Книповича, Г.Р. Брегмана. – Л.: Гидрометеиздат, 1937. – 853 с.

22. ГОСТ 17.1.5.05-85. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб поверхностных и морских вод, льда и атмосферных осадков.
23. ГОСТ 18481-81. Ареометры и цилиндры стеклянные. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2007. – 23 с.
24. Груза, Г.В. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха / Г.В. Груза, Э.Я. Ранькова. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. – 194 с.
25. Давыдов, А. В. Современный гидрологический режим залива Сиваш как доминирующий фактор развития береговой зоны / А.В. Давыдов, Т.Н. Крючкова, А.Н. Роскос // Вестник ОНУ. – 2008. – Т. 13, Вып. 6. – С.56–66.
26. Данильченко, П.Т. Гидрохимия Сиваша / П.Т. Данильченко, А.М. Поздновский. – М.: Изд-во АН СССР, 1954. – 129 с.
27. Дзенс-Литовский, А.И. Минеральные озера СССР, их типы и географическое распределение / А.И. Дзенс-Литовский // Популярный естественно-исторический журнал «Природа». – Л.: Типография Академии Наук СССР, 1938а. – №11–12. – С.37–51.
28. Дзенс-Литовский, А.И. Пересыпи и лиманы Азово-Черноморского побережья степного Крыма / А.И. Дзенс-Литовский // Популярный естественно-исторический журнал «Природа». – Л.: Типография Академии Наук СССР, 1938б. – №6. – С.22–33.
29. Дзенс-Литовский, А.И. История геологического изучения минеральных озер СССР / А.И. Дзенс-Литовский // Популярный естественно-исторический журнал «Природа». – Л.: Типография Академии Наук СССР, 1946. – №9. – С.59–65.
30. Дзенс-Литовский, А.И. Проблема Крымских Сивашей / А.И. Дзенс-Литовский // Популярный естественно-исторический журнал «Природа». – Ленинград: Типография Академии Наук СССР, 1954. – №10. – С.100–104.
31. Дзенс-Литовский, А.И. Богатства Сиваша / А.И. Дзенс-Литовский // Популярный естественно-исторический журнал «Природа». – Л.: Типография Академии Наук СССР, 1956а. – №3. – С.122.

32. Дзенс-Литовский, А.И. Комплексное использование солей Сиваша / А.И. Дзенс-Литовский // Популярный естественно-исторический журнал «Природа». – Л.: Типография Академии Наук СССР, 1956b. –№12. – С. 110.
33. Друмева, М.А. К вопросу об минерализации вод Северного Сиваша / М.А. Друмева // Труды ГОИН. – М.: Гидрометеиздат, 1991. – С. 67–72.
34. ДСТУ ISO 3696-2003. Вода для использования в лабораториях. Требования и методы проверки. – К.: Держспоживстандарт Украины, 2004. – 7 с.
35. ДСТУ ISO 5667-1-2003. Качество воды. Отбор проб. Часть 1. Методические указания по проекту программ проведения отбора проб (ISO 5667-1:1980, IDT). – К.: Держспоживстандарт Украины, 2004. – 17 с.
36. ДСТУ ISO 5667-2:2003. Качество воды. Отбор проб. Часть 2. Методические указания по методам отбора проб. (ISO 5667-2:1991 IDT). – К.: Держспоживстандарт Украины, 2004. – 10 с.
37. ДСТУ ISO 5667-3:2001. Качество воды. Отбор проб. Часть 3. Руководство по хранению и обращению с пробами. (ISO 5667-3:1994 IDT). – К.: Держстандарт Украины, 2002. – 34 с.
38. ДСТУ ISO 5667-9:2005. Качество воды. Отбор проб. Часть 9. Руководство по отбору проб морской воды. (ISO 5697-9:1992, IDT). – К.: Держспоживстандарт Украины, 2004. – 9 с.
39. Дьяков, Н.Н. Современный водообмен Азовского моря с заливом Сиваш через пролив Тонкий / Н.Н. Дьяков, В.В. Фомин, С.Б. Горбач, Т.Ю. Тимошенко // Сборник докладов и статей Всеукраинской научно-практической конференции «Экология городов и рекреационных зон». – Одесса: ТОВ "ІНВАЦ", 2011. – С. 80–83.
40. Дьяков, Н.Н. Современный метод расчета количества атмосферных осадков, выпадающих на поверхность Азовского моря / Н.Н. Дьяков, В.В. Фомин, С.Б. Горбач, Т.Ю. Тимошенко // Сборник докладов и статей Всеукраинской научно-практической конференции «Экология городов и рекреационных зон». – Одесса: ТОВ "ІНВАЦ", 2012. – С.60–61.

41. Дьяков, Н.Н. Оценка составляющих водного баланса залива Сиваш / Н.Н. Дьяков, А.А. Белогудов, Т.Ю. Тимошенко // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2013. – Вып. 27. – С. 439–445.
42. Дьяков, Н.Н. Водообмен залива Сиваш с Азовским морем через пролив Тонкий / Н.Н. Дьяков, А.А. Белогудов // Труды ГОИН. – 2015а. – Вып. 216. – С. 240–253.
43. Дьяков, Н.Н. Ледовый режим залива Восточный Сиваш / Н.Н. Дьяков, Т.Ю. Тимошенко // Труды ГОИН. – 2015б. – Вып. 216. – С. 188–196.
44. Дьяков, Н.Н. Современные гидрометеорологические условия в Черном и Азовском морях / Н.Н. Дьяков, А.Е. Липченко, А.И. Рябинин // Труды ГОИН. – 2016. – Вып. 217. – С.222–240.
45. Евстигнеев, В.П. Расчет количества осадков, выпадающих на поверхность залива Сиваш / В.П. Евстигнеев, Е.С. Ерёмина // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2019. – № 2. – С.19–29.
46. Евстигнеев, В.М. Влияние климатических изменений на годовой сток рек Восточно-Европейской равнины в XXI в. / В.М. Евстигнеев, А.В. Кислов, М.В. Сидорова // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2010. – № 2. – С.3–10.
47. Евстигнеев, В.П. Расчет количества выпадающих на поверхность Азовского моря осадков как составляющей его водного баланса / В.П. Евстигнеев, Д.В. Мишин, Л.П. Остроумова // Метеорология и гидрология. – 2018. – №8. – С. 39–52.
48. Ерёмина, Е.С. Современный термохалинный режим залива Сиваш на основе спутниковой информации и данных натурных наблюдений / Е.С. Ерёмина, С.В. Станичный // Тезисы докладов пятнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», [Электронный ресурс]. – Москва: ИКИ РАН, 2017а. – С. 250. URL: <https://tinyurl.com/vnsm37cw> (дата обращения 20.04.2021).

49. Ерёмина, Е.С. Мониторинг изменений водного баланса Южного Сиваша по спутниковым снимкам / Е.С. Ерёмина, Л.В. Харитонова // Сборник: Крым – эколого-экономический регион. Пространство ноосферного развития. Материалы I Международного экологического форума в Крыму, [Электронный ресурс]. – 2017b. – С. 267–269. URL: https://sev.msu.ru/wp-content/uploads/2017/07/SBORNIK_FORUM_2017.543_pdf.pdf (дата обращения 15.04.2021).

50. Ерёмина, Е.С. Оценка изменения гидрологического режима водно-болотного угодья «Восточный Сиваш» / Е.С. Ерёмина, Е.Е. Совга // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Моря России: методы, средства и результаты исследований». – Севастополь: ФГБУН МГИ. – 2018а. – С. 242–243.

51. Ерёмина, Е.С. Рекомендации по организации системы экологического мониторинга залива Сиваш в условиях перекрытия Северо-Крымского канала / Е.С. Ерёмина, Е.Е. Совга, Н.Н. Дьяков // Материалы Всероссийской научно-практической юбилейной конференции с международным участием, в сб. «Геоэкология и природопользование: актуальные вопросы науки, практики и образования, [Электронный ресурс]. – Симферополь. – 2018b. – С. 125–128. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36287805> (дата обращения 20.04.2021).

52. Ерёмина, Е.С. Современное состояние прибрежных водоемов Присивашья после перекрытия Северо-Крымского канала / Е.С. Ерёмина, Л.В. Харитонова // Процессы в геосредах. – № 3(17). – 2018с. – С. 58–59.

53. Ерёмина, Е.С. Оценки влияния перекрытия Северо-Крымского канала на изменчивость морфометрических характеристик залива Сиваш по спутниковым данным / Е.С. Ерёмина, Л.В. Харитонова, С.В. Станичный // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018d. – Т. 15, № 7. – С. 175–183.

54. Ерёмина, Е.С. Оценки стоков азово-сивашских вод в проливе Тонком / Е.С. Ерёмина, В.П. Евстигнеев // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Моря России: фундаментальные и прикладные исследования». – Севастополь: ФГБУН МГИ, 2019. – С. 194–195.

55. Ерёмина, Е.С. Динамика площади тростниковых зарослей в заливе Сиваш (Азовское море) по спутниковым данным / Е.С. Ерёмина, Е.Е. Совга, С.В. Станичный, В.А. Михайлов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2020. – № 4. – С. 54–65.

56. Ерёмина Е.С. Восстановление солёности в заливе Сиваш до естественного уровня после перекрытия Северо-Крымского канала / Е.С. Ерёмина // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2021. – № 3. – С. 84–93.

57. Зенкович, В.П. Основы учения о развитии морских берегов / В.П. Зенкович. – М., 1962. – 712 с.

58. Каблуков, И.А. Крымские солёные озера / И.А. Каблуков, А.С. Каблуков. – М.: Типолитография Товарищества И.Н. Кушнерев и К⁰, 1915. – 103 с.

59. Колесникова, Е.А. *Mesochra rostrata gurney*, 1927 (Copepoda, Harpacticoida) в заливе Сиваш (Азовское море): новый вид-вселенец или реликт Тетиса? / Е.А. Колесникова, Е.В. Ануфриева, А.А. Латушкин, Н.В. Шадрин // Российский журнал биологических инвазий. – 2016. – Т. 10, № 2. – С. 61–68.

60. Костин, С.Ю. Динамика населения птиц Крыма под влиянием гидромелиорации. Сообщение 2. Плавневый комплекс / С.Ю. Костин // Наука Юга России. – 2019. – Т. 15, № 4. – С. 78–87.

61. Курнаков, Н.С. Соляные озера Крыма / Н.С. Курнаков [и др.]. – М.-Л.: Издательство Академии Наук СССР, 1936. – 278 с.

62. Курнаков, Н.С. Избранные труды / Н.С. Курнаков. – М.: Издательство Академии Наук СССР, 1963. – Т. 3. – 573 с.

63. Лабутина, И.А. Дешифрирование аэрокосмических снимков / И.А. Лабутина. – М.: Аспект Пресс, 2004. – 184 с.

64. Леонтьев, В.К. Основные черты геоморфологии Сивашской лагуны / В.К. Леонтьев, О.К. Леонтьев // Вестник Московского университета, Серия география. – 1956. – № 2. – С. 185–194.

65. Ломакин, П.Д. Экспедиционные исследования МГИ в Восточном Сиваше весной и осенью 2014 года / П.Д. Ломакин, Е.Е. Совга, Е.С. Щурова, Е.И. Овсяный // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. – 2014а. – Вып. 28. – С. 138–145.

66. Ломакин, П.Д. Современный гидрохимический режим и ресурсный потенциал Восточного Сиваша / П.Д. Ломакин, Е.Е. Совга, Е.С. Щурова, Е.И. Овсяный // Тезисы докладов международной научной конференции «Современное состояние и перспективы наращивания морского ресурсного потенциала юга России». – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014б. – С. 87–92.

67. Ломакин, П.Д. Океанологическая характеристика прибрежной зоны залива Сиваш (Азовское море) / П.Д. Ломакин // Геополитика и экогеодинамика регионов, 2020. – Т. 6 (16). – Вып. 4. – С. 170–180.

68. Малинников, В.А. Мониторинг природной среды аэрокосмическими средствами / В.А. Малинников, А.Ф. Стеценко, А.Е. Алтынов, С.М. Попов // Учебное пособие для студентов вузов. – М.: Изд. МИИГАиК, 2008. – 145 с.

69. Марушевский, Г.Б. Сиваш: природа и люди / Г.Б. Марушевский, В.А. Костюшин, В.Д. Сионих. – Киев: Черноморская программа Ветландс Интернешнл, 2005. – 80 с.

70. Методические указания по определению плотности высокоминерализованных природных вод (рассолов). – Севастополь: МГИ НАНУ, 2014. – 15 с. (рукопись).

71. Методы анализа рассолов и солей. [ВНИИ галургии] / под ред. Ю.В. Морачевского, Е.М. Петровой. – М.-Л.: Химия, 1964. – 403 с.

72. Михайлов, В.А. О характере берегов Сиваша / В.А. Михайлов // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. География. – 2007. – Т. 20 (59), № 2. – С. 322–332.

73. Мохов, И.И. Гидрологические аномалии и тенденции изменения в бассейне реки Амур в условиях глобального потепления / И.И. Мохов // Доклады Академии наук. – 2014. – Т. 455, № 5. – С.585–588.

74. Михайлов, В.А. Пространственная организация ландшафтов и ее оценка (на примере Крымского Присивашья) / В.А. Михайлов // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. География. – 2011. – Т. 24 (63), № 2-3. – С. 296–301.

75. Михайлов, В.А. Использование данных ДЗЗ для изучения динамики берегов залива Сиваш / В.А. Михайлов // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 9-4. – С. 831–834.

76. Михайлов, В.А. Свободные и отчлененные береговые аккумулятивные формы залива Сиваш / В.А. Михайлов // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. География. – 2014. – Т. 27, № 2. – С. 65–74.

77. Михайлов, В.А. Абразия как фактор деградации земельных ресурсов Крымского Присивашья / В.А. Михайлов // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. – 2015. – Т. 1, № 2. – С. 52–58.

78. Михайлов, В.А. Береговые аккумулятивные формы залива Сиваш / В.А. Михайлов // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. – 2019. – Т. 5, № 2. – С. 80–88.

79. Морские берега Крыма / Ю.Н. Горячкин, В.В. Долотов // Монография. – Севастополь: ООО «Колорит», 2019. – 256 с.

80. Морской портал МГИ. Архив данных по Черному морю. – [Электронный ресурс] URL: http://dvs.net.ru/mp/data/main_ru.shtml (дата обращения 10.09.2018).

81. Мысливец, В.И. Дельта пролива Тонкого (Генического) в заливе Сиваш, Азовское море / В.И. Мысливец, Л.М. Шипилова // В сборнике: Береговая зона – взгляд в будущее. Материалы XXV Международной береговой конференции. – 2014. – С. 103–105.

82. Мысливец, В.И. Морфоструктурный парадокс лагуны Сиваш, Азовское море / В.И. Мысливец // В сборнике: Геоморфологические ресурсы и

геоморфологическая безопасность: от теории к практике. Всероссийская конференция. – 2015. – С. 469–472.

83. Овсяный, Е.И. О применении единиц измерения количества и состава вещества в океанологии. / Е.И. Овсяный, А.С. Романов, В.И. Забурдаев // Морской гидрофизический журнал. – 2004. – №2. – С. 61–72.

84. Остроумова, Л.П. Определение действительных величин атмосферных осадков по наблюдениям на метеорологических станциях, используемых в водном балансе Северного Каспия / Л.П. Остроумова // Труды ГОИН. – 2015. – Вып. 215. – С. 257–276.

85. Очерк месторождений полезных ископаемых в европейской России и на Урале. Издание Горного Департамента. Санкт-Петербург: Типография В.О. Демакова, 1881. – 258 с.

86. Паллас, П.С. Наблюдения, сделанные во время путешествия по южным наместничествам Русского государства в 1793-1794 годах / П.С. Паллас перевод с немецкого. – М.: Наука, 1999. – 246 с.

87. Пассет, Б.В. Практикум по техническому анализу и контролю в производстве химико-фармацевтических препаратов и антибиотиков / Б.В. Пассет, М.А. Антипов. – М.: Медицина, 1981. – 272 с.

88. Позаченюк, Е.А. Ландшафтное планирование территории Джанкойского района республики Крым / Е.А. Позаченюк, В.А. Табунщик // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. География. – 2014. – Т.27(66), № 2. – С139–162.

89. Позаченюк, Е.А. О методах оценки современного состояния акватории залива Сиваш в условиях перекрытия Северо-Крымского канала в 2014 году / Е.А. Позаченюк, Е.Е. Совга, Е.С. Щурова, Т.В. Хмара, Л.В. Харитонова // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2016. – №4. – С41–49.

90. Понизовский А.М. Соляные ресурсы Крыма / А.М. Понизовский. Симферополь: «Крым», 1965а. – 163с.

91. Понизовский, А.М. Исследование физико-химических процессов формирования рассолов соляных водоемов Крыма и пути их промышленного освоения: автореф. дисс. ... докт. хим. наук / А.М. Понизовский. – М., 1965b. – 36 с.
92. Приказ Министерства экологии и природных ресурсов республики Крым от 18 декабря 2017 года № 2919 "Об утверждении Положения о водно-болотном угодье «Восточный Сиваш»".
93. Раскин, Л.Г. О водообмене через пролив Тонкий / Л.Г. Раскин // Труды государственного океанографического института. – М.: Гидрометеиздат, 1992. – Вып. 205. Комплексные исследования южных морей. – С. 21–31.
94. Резников, А.А. Методы анализа природных вод / А.А. Резников, Е.П. Муликовская. – М.: Госгеолтехиздат, 1954. – 236 с.
95. Семенова, Е.А. Исследование водообмена через мелководный пролив / Е.А. Семенова // Сборник работ ГМО ЧАМ. – 1962. – Вып. 1. – С. 53–63.
96. Семенова, Е.А. Водообмен Сиваша с Азовским морем / Е.А. Семенова // Сборник работ ГМО ЧАМ. – 1964. – Вып. 2. – С. 10–24.
97. Сивашский регион: краткая социально-экономическая характеристика / Под общ. ред. В.А. Костюшина, Г.В. Фесенко. – К.: Черноморская программа Ветландс Интернешнл, 2007. – 178 с.
98. Слатинский, Ю.Г. Об обмене вод между Сивашом и Азовским морем через пролив Тонкий / Ю.Г. Слатинский // Сборник работ БГМО ЧАМ, 1969. – Вып. 7. – С. 38–54.
99. Совга, Е.Е. Ресурсный потенциал озера Сиваш и современное экологическое состояние его акватории / Е.Е. Совга, Е.С. Щурова // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. – 2013. – Вып. 27. – С. 276–283.
100. Совга, Е.Е. Современное экологическое состояние и ресурсный потенциал залива Сиваш / Е.Е. Совга, Е.С. Ерёмкина, Т.В. Хмара // Тезисы докладов научной конференции «Моря России: наука, безопасность, ресурсы». – Севастополь: ФГБУН МГИ. – 2017. – С.103.

101. Совга, Е.Е. Система экологического мониторинга залива Сиваш в современных условиях / Е.Е. Совга, Е.С. Ерёмина, Н.Н. Дьяков // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2018. – № 2. – С. 22–38.

102. Совга, Е.Е. Экспедиционные исследования в Восточном Сиваше за 2018 г. / Е.Е. Совга, Е.С. Ерёмина // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Моря России: фундаментальные и прикладные исследования». – Севастополь: ФГБУН МГИ, 2019. – С.272–273.

103. Совга, Е.Е. Динамика фитогенных берегов в заливе Сиваш по спутниковым данным / Е.Е. Совга, Е.С. Ерёмина, С.В. Станичный // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Моря России: исследования береговой и шельфовой зон». – Севастополь: ФГБУН ФИЦ МГИ, 2020. – С. 475.

104. Современное состояние Сиваша. Сборник научных статей / под ред. Г.А. Городиской. – К.: Wetlands International - АЕМЕ, 2000. – 104 с.

105. Справочник химика, т. III. – Л.: Химия, 1966. – 675 с.

106. Станичная, Р.Р. Внутрисезонная изменчивость береговой линии Сиваша, вызванная ветровыми условиями / Р.Р. Станичная, Е.С. Щурова // Тезисы докладов научно-практической конференции «Пути решения проблемы сохранения и восстановления пляжей Крымского полуострова». – Севастополь, 2015. – С. 144–145.

107. Станичная, Р.Р. Методика анализа изменчивости береговой линии по спутниковым данным / Р.Р. Станичная, С.В. Станичный, Ю.Н. Горячкин // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2016. – Вып. 1. – С.22–28.

108. Стащук, М.Ф. Минералогия, геохимия и условия формирования донных отложений Сиваша / М.Ф. Стащук, В.А. Супрычев, М.С. Хитрая. – К.: Наукова думка, 1964. – 174 с.

109. Страбон. География в 17 книгах / пер. Г.А. Стратановского. – М.: Наука, 1964, – 944 с.

110. Толмачева, Н.И. Средства измерений гидрометеорологического назначения: учеб. пособие / Н.И. Толмачева, А.Г. Тимофеева; Институт повышения квалификации Росгидромета. – М., 2017. – 223 с.

111. Филиппео, В.М. Испаряемость естественных соляных рассолов на Крым-Элийской и Генической станциях 1934 г. / В.М. Филиппео // Фонды Крымской лаборатории ГИПХ, 1935.

112. Шадрин, Н.В. Трансформация залива Сиваш (Азовское море) в условиях роста солености: изменения мейобентоса и других компонент экосистемы (2013–2015 гг.) / Н.В. Шадрин, Н.Г. Сергеева, А.А. Латушкин, Е.А. Колесникова, Л.М. Киприянова, Е.В. Ануфриева, А.А. Чепьженко // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. – 2016. – Т. 9, № 4. – С. 452–466.

113. Шустов, Б.С. Восточный Сиваш и его берега / Б.С. Шустов // Ученые записки МГУ. – 1938. – №19.

114. Щурова, Е.С. Изменчивость характеристик озера Сиваш по данным спутникового дистанционного зондирования / Е.С. Щурова // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. – 2013. – Вып. 27. – С. 302–305.

115. Щурова, Е.С. Анализ ледового режима залива Сиваш по спутниковым данным / Е.С. Щурова // Тезисы докладов международной научной конференции «Современное состояние и перспективы наращивания морского ресурсного потенциала юга России». – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. – 2014. – С. 148–151.

116. Щурова, Е.С. Пространственная и временная изменчивость поля температуры поверхности воды Сиваша и Азовского моря с использованием спутниковых данных / Е.С. Щурова, С.В. Станичный // Тезисы докладов IX Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых (с международным участием) по проблемам водных экосистем, посвященной 100-

летию со дня рождения д.б.н., проф., чл.-кор. АН УССР В.Н. Грезе «Pontus Euxinus 2015». – Севастополь. – 2015. – С. 202–203.

117. Щурова, Е.С. Использование спутниковых данных для исследования современного состояния залива Сиваш / Е.С. Щурова, Р.Р. Станичная, С.В. Станичный // Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон моря. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. – 2016а. – №3. – С.61–64.

118. Щурова, Е.С. Применение спутниковых данных в исследовании залива Сиваш / Е.С. Щурова, Р.Р. Станичная, С.В. Станичный // Материалы всероссийской молодежной научной конференции «Комплексные исследования морей России, [Электронный ресурс]. – 2016б. – Севастополь. С. 219–224. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26198145> (дата обращения: 20.04.2021).

119. Щурова, Е.С. Исследование интрузий азовских вод через Арабатскую стрелку / Е.С. Щурова, С.В. Станичный // Тезисы докладов I Черноморской научно-практической конференции МГУ «Проблемы безопасности в современном мире», [Электронный ресурс]. – Севастополь. – 2016с. – С. 102–103. URL: <http://conf.sev.msu.ru/> (дата обращения: 15.03.2021).

120. Щурова, Е.С. Изменения ресурсного потенциала залива Сиваш (Азовское море) после перекрытия Северо-Крымского канала в 2014 году / Е.С. Щурова, Е.Е. Совга, Т.В. Хмара, П.Д. Ломакин // Сборник материалов конференции «Экология. Экономика. Информатика. Азовское море, Керченский пролив и предпроливные зоны в Черном море: проблемы управления прибрежными территориями для обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования». – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2016д. – С. 296–307.

121. Щурова, Е.С. Мониторинг влияния перекрытия Северо-Крымского канала на залив Сиваш / Е.С. Щурова // Сборник тезисов II Всероссийской конференции молодых ученых «Комплексные Исследования Мирового Океана конференции КИМО-2017», [Электронный ресурс]. – Москва. – 2017. – С. 617. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30063397> (дата обращения: 15.03.2021).

122. Ястреб, В.П. К вопросу о классификации водоемов зоны сопряжения суши и моря Азово-Черноморского побережья / В.П. Ястреб, В.А. Иванов, Т.В. Хмара // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. – Вып. 15. – С. 326–346.

123. Ястреб, В.П. Морфометрические характеристики озер-лиманов Керченской группы для оценки изменчивости их бальнеологического ресурсного потенциала / В.П. Ястреб, Л.В. Харитонова, Т.В. Хмара // в монографии Морские ресурсы прибрежной зоны Украины. Под ред. П.Ф. Гожики, В.А. Иванова. – Севастополь. – 2012. – С. 248–256.

124. Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems / M. Waycott [et al.] // PNAS. USA. – 2009. – Vol. 106, iss. 30. – P. 12377–12381. – <https://doi.org/10.1073/pnas.0905620106>.

125. Adler, R.F. The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979–Present) / R.F. Adler [et al.] // Journal of Hydrometeorology. – 2003. – Vol. 4(6). – P. 1147–1167.

126. Anufriieva, E.V. The long-term changes in plankton composition: is Bay Sivash transforming back into one of the world's largest habitats of *Artemia* Sp. (Crustacea, Anostraca)? / E.V. Anufriieva, N.V. Shadrin // Aquaculture Research. – 2020. – Vol. 51, iss. 1. – P. 341–350. – <https://doi.org/10.1111/are.14381>.

127. Carstensen, J. Phytoplankton blooms in estuarine and coastal waters: Seasonal patterns and key species / J. Carstensen, R. Klais, J.E. Cloern // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2015. – Vol. 30. – P. 1–12. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2015.05.005>.

128. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Ed. by T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley – Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2013. – 1535 p.

129. Duck, R.W. Coastal lagoons and their evolution: A hydromorphological perspective / R.W. Duck, J. F. da Silva // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. – 2012. – Vol. 110. – P. 2–14.

130. Eremina, E.S. Inter-annual variability of water exchange between the Azov Sea and the Sivash bay through the Tonky strait / E.S. Eremina, V.P. Evstigneev // *Physical Oceanography*, [e-journal]. – 2020. – № 27(5). – P. 489–500. – <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2020-5-489-500>.

131. Fisher, R.A. Applications of "Student's" Distribution / R.A. Fisher // *Metron*. – 1925. – Vol. 5. – P. 90–104.

132. Friedemann, G.T. Reise in die Steppen des südlichen Russlands / Unternehmen von Fr. Göebels / G.T. Friedemann. – Dorpat, 1837–1838. – P.88–89.

133. Google Earth. – <https://earth.google.com/web/> (дата обращения 10.03.2019)

134. Haylock, M.R. A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006 / M.R. Haylock, N. Hofstra, A.M.G. Klein Tank, E.J. Klok, P.D. Jones, M. New // *Journal of Geophysical Research*. – 2008. – Vol. 113. – D 20119.

135. Largier, J.L. Seasonally hypersaline estuaries in Mediterranean-climate regions / J.L. Largier, J.T. Hollibaugh, S.V. Smith // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. – 1997. – Vol. 45. – P. 789–797.

136. Low-frequency variability of storms in the northern Black Sea and associated processes in the ocean–atmosphere system / A.B. Polonsky [et al.] // *Regional Environmental Change*. – 2014. – Vol. 14, iss. 5. – P. 1861–1871. – <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0546-z>

137. Nohara, D., Impact of climate change on river discharge projected by multimodel ensemble / D. Nohara, A. Kitoh, M. Hosaka, T. Oki // *Journal of Hydrometeorology*. – 2006. – Vol. 7, iss. 5. – P. 1076–1089. – <https://doi.org/10.1175/JHM531.1>.

138. Potter, I. C. 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. – P. 497–500. – <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.01.021>.

139. Prazukin A.V., Anufriieva E.V., Shadrin N. V. Cladophora mats in a Crimean hypersaline lake: structure, dynamics, and inhabiting animals / A.V. Prazukin, E.V. Anufriieva, N. V. Shadrin // Journal of Oceanology and Limnology. – 2018. – Vol. 36. – P. 1930–1940. – <https://doi.org/10.1007/s00343-018-7313-4>.

140. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2013. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.R-project.org/> (дата обращения 15.04.2019).

141. Sen, P.K. Estimates of regression coefficient based on Kendall's tau / P.K. Sen // Journal of the American Statistical Association. – 1968. – Vol. 63. – P. 1379–1389.

142. Sergeeva, N. Records of sessile ciliates (Ciliophora, Peritrichia) on the green filamentous algae cladophora sivashensis in the Sivash Bay (the Sea of Azov) / N. Sergeeva, N. Shadrin, A. Abibulaeva, I. Dovgal // Protistology. – 2020. – Vol. 14, iss. 2. – P. 89–94. <https://doi.org/10.21685/1680-0826-2020-14-1-6>.

143. Shadrin, N. Do separated taxa react differently to a long-term salinity increase? The meiobenthos changes in Bay Sivash, largest hypersaline lagoon worldwide / N. Shadrin, E. Kolesnikova, T. Revkova, I. Drapun, E. Anufriieva, A. Latushkin, A. Chepyzhenko, N. Dyakov // Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems. – 2019. – Vol. – 420. – P. 36. – <https://doi.org/10.1051/kmae/2019028>.

144. Shadrin, N.V. Macrostructure of benthos along a salinity gradient: The case of Sivash Bay (the Sea of Azov), the largest hypersaline lagoon worldwide / N.V. Shadrin [et al.] // Journal of Sea Research. – 2019. – Vol. 154. – 101811. – <https://doi.org/10.1016/j.seares.2019.101811>.

145. Shadrin, N.V. The political decision caused the drastic ecosystem shift of the Sivash Bay (the Sea of Azov) / N.V. Shadrin [et al.] // Quaternary International. – 2018. – Vol. 475. – P. 4–10. – <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.12.009>.

146. Shchurova, E.S. Satellite data for investigation of recent state and processes in the Sivash bay / E.S. Shchurova, R.R. Stanichnaya, S.V. Stanichny // Proceedings of

International Conference "Managing risks to coastal regions and communities in a changing world" EMECS'11 - SeaCoasts XXVI. – St. Petersburg, 2016. – P. 773–780.

147. Soloveva, O. V. Ecological State of the Southeastern Part of Sivash Bay (Sea of Azov) under Conditions of Changing Salinity / O.V. Soloveva [et al.] // Contemporary Problems of Ecology. – 2019. – Vol. 12, iss. 2. – P. 179–188.

148. 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, no. 1. – P. 67–76. – <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2018-1-67-76>.

149. Sovga, E.E. Research expeditions performed by Marine hydrophysical institute in the Sivash bay waters in Spring and Autumn, 2018 / E.E. Sovga, E.S. Eremina, A.A. Latushkin // Physical Oceanography, [e-journal]. – 2020. – № 27(2). – P.161–170.

150. Sovga, E.E Current Water and Salt Regime of the Sivash Bay / E. E. Sovga, E. S. Eremina, L. V. Kharitonova, T. V. Khmara // Processes in GeoMedia – Volume II. Springer Geology. – 2021. – P. 225–234.

151. Van den Besselaar, E.J.M. Trends in European precipitation extremes over 1951–2010 / E.J.M. Van den Besselaar, A.M.G. Klein Tank, T.A. Buishand // The International Journal of Climatology. – 2013. – Vol. 33. – P. 2682–2689. – <https://doi.org/10.1002/joc.3619>.

152. Webster, I.T. The hydrodynamics and salinity regime of a coastal lagoon – The Coorong, Australia – Seasonal to multi-decadal timescales / I.T. Webster // Estuarine, Coastal and Shelf Science. – 2010. – Vol. 90, iss.4. – P. 264–274. – <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.09.007>.

153. Winant, C.D. Dynamics of Hypersaline Estuaries: Laguna San Ignacio / C.D. Winant, L. Jolla // Elsevier Inc. – Mexico. – 2011. – P. 141–149.

154. Wooldridge, T.H., Biotic responses to extreme hypersalinity in an arid zone estuary, South Africa / T.H. Wooldridge, J.B. Adams, M. Fernandes // South African Journal of Botany. – 2016. – Vol. 107. – P. 160–169. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.sajb.2016.05.004>.