

Е.А.Позаченюк¹, Е.Е.Совга²,
Т.В.Хмара², Л.В.Харитоновна², Е.С.Щурова²

¹Крымский федеральный университет им.В.И.Вернадского,
Таврическая академия, г.Симферополь

²Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

О МЕТОДАХ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ АКВАТОРИИ ЗАЛИВА СИВАШ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕКРЫТИЯ СЕВЕРО-КРЫМСКОГО КАНАЛА В 2014 ГОДУ

Предложены методы оценки современного состояния акватории залива Сиваш в условиях перекрытия Северо-Крымского канала в 2014 г. Показаны перспективы и возможности реализации рассмотренных в работе методов для оценки изменения ресурсного потенциала залива в новых условиях роста солености рапы в различных частях Восточного Сиваша и отдельных составляющих водного баланса акватории всего залива. На основе использования спутниковых данных показаны возможности оценки динамики береговой линии залива в новых условиях.

Ключевые слова: *динамика солености, водный баланс, ресурсный потенциал, Северо-Крымский канал, залив Сиваш*

Введение. Залив Сиваш является наиболее антропогенно и техногенно нагруженной акваторией прибрежной зоны Крыма со специфическими гидродинамическими и гидрохимическими процессами, обусловленными орографией берегов, особенностями рельефа дна и малыми глубинами, а также водообменом с Азовским морем.

При значительной протяженности береговой линии Сиваша (более 1000 км) вблизи его берегов располагаются крупные массивы сельскохозяйственных угодий, предприятия химической промышленности, объекты инфраструктуры, хозяйственная и экологическая деятельность которых должны быть в идеале уравновешены.

Важнейшим фактором нарушения естественного гидрологического режима залива является Северо-Крымский канал, который был построен в период с 1961 по 1971 гг. и принес в Крым не только блага, но и определенные экологические проблемы.

По мнению Ю.Ф.Безрукова [1] в целом правильная идея об ограниченном использовании вод Днепра для орошения в Крыму была реализована в экологически неприемлемой форме. Во-первых, увеличение объемов подаваемой воды не сопровождалось адекватными усилиями по техническому оснащению канала и очистке воды, во-вторых, не была внедрена водосберегающая технология поливов – потери воды составляли примерно 50 %. В результате значительные площади земель были подтоплены, происходило их вторичное засоление.

Вода Северо-Крымского канала геохимически чужда крымским ландшафтам [1]. Она резко изменила сложившееся природное гидрологическое

равновесие, вызвала активизацию процессов подтопления и карста. Следует отметить, что функционирование системы попусков дренажно-сбросных пресных вод Северо-Крымского канала способствовало разбавлению рапы Сиваша – ценнейшего объекта для химической промышленности и медицины. В результате за последние 30 лет общая минерализация рапы уменьшилась более чем в 2 раза, а содержание магния – в 1,8 раза. Создалась угроза существования Сиваша как гидроминерального месторождения и сырьевой базы для Перекопского бромного и Крымского содового заводов.

Однако за время эксплуатации Северо-Крымского канала в экосистеме залива Сиваш создались определенные условия природного равновесия. В связи с перекрытием канала в 2014 г. эти равновесия нарушились и начались изменения гидрохимического и гидрологического режимов залива, о чем свидетельствуют результаты экспедиционных исследований 2014 – 2016 гг.

В современных условиях необходимы исследования, результаты которых позволят научно обосновать возможные изменения в концепции природопользования региона, соблюдая сбалансированное экономическое развитие региона при минимизации экологического ущерба. Особого внимания требуют природоохранные зоны Сиваша с учетом вхождения Крыма в экономическое и социально-правовое поле РФ.

Объект исследований. Залив Сиваш разделен двумя регулируемыми искусственными дамбами на три обособленные части: Восточный, Центральный и Западный Сиваш (рис.1). Динамические процессы, различия в речной сети и искусственных водотоках территории Присивашья определили значительные различия экологических характеристик этих обособленных частей залива.

Западный Сиваш значительно преобразован крупными промышленными предприятиями. Плотина у Чонгарского п-ова накапливает воду в Западном Сиваше для промышленных целей и регулирует поступление воды из



Р и с . 1 . Схема акватории залива Сиваш. Красной линией обозначена граница республики Крым после вхождения в правовое поле РФ.

Азовского моря. Высокая соленость Западного Сиваша поддерживается искусственно, поскольку рапа Западного Сиваша используется в качестве сырья для химической промышленности.

Центральный Сиваш отделен от других частей залива регулируемые искусственными дамбами со плузами и насосными установками. Находясь в центре Азово-Черноморского побережья, Центральный Сиваш является неотъемлемым звеном в экологической цепи водно-болотных угодий этого региона.

Восточный и Южный Сиваш – самый крупный по площади (1650 км², или свыше 60 % общей площади Сиваша) и более глубоководный (глубины до 1 м занимают 41 % площади) участок залива. Восточный Сиваш наиболее сильно подвергся влиянию сбросов пресной воды. Большая часть акватории соляного месторождения много лет используется в качестве водоема для сбросных вод с рисовых полей, которые содержат пестициды. Под действием днепровских сбросных и дренажных вод на некоторых участках Восточного Сиваша рапа распреснилась до значений менее 35 ‰. В Южном Сиваше, соединенным с третьим плесом Восточного Сиваша Шакалинским сужением, отмечается увеличение солености воды, которое зависит от изменчивости антропогенных и природно-климатических факторов.

Цель настоящего исследования – проанализировать возможности современных методов исследования и показать перспективы их использования для оценки изменения ресурсного потенциала в новых условиях роста солености рапы и динамики водного баланса в различных частях Восточного Сиваша.

Для реализации цели исследования необходимо:

- провести комплексные экспедиционные исследования Восточной части залива в весенний, летний и осенний сезоны по оценке динамики солености плесов 3 и 4 Восточного Сиваша с учетом вхождения Крыма в экономическое и социально-правовое поле РФ (рис.1);
- осуществить анализ и обработку спутниковых данных для оценки динамики береговой линии, температурного режима и некоторых составляющих водного баланса залива;
- оценить возможность расчета гидродинамического режима залива с использованием математической модели.

Изменение режима солености рапы Восточного Сиваша в новых условиях. Соленость в различных участках Восточного Сиваша неодинакова, она изменяется во времени и зависит от течений, метеорологических, антропогенных и других факторов.

Вода Азовского моря соленостью 10 – 11 ‰, попадая из-за разницы уровней и нагонных явлений в залив Сиваш через пролив Тонкий и двигаясь с севера на юг и с востока на запад, постепенно концентрируется до рассолов.

Начиная с 1970 г., с развитием орошаемого земледелия в северном Крыму в залив Сиваш регулярно сбрасывалась часть стоков с полей орошения. По данным [2] средняя соленость Сиваша снизилась с 141 ‰ в 1955 г. до 22,6 ‰ к 1989 г., а в 1997 г. достигла минимального значения 17 ‰.

Для оценки современного солевого потенциала Сиваша необходимы регулярные полевые исследования, особенно в условиях меняющегося антропо-

погенного воздействия. Следует отметить, что залив Сиваш является весьма сложным с точки зрения экспедиционных исследований объектом. Это связано с его приграничным положением, труднодоступностью, низким качеством сообщения. Поэтому экспедиционные исследования по оценке динамики солености осуществляются в четырех плесах Восточного Сиваша, а использование спутниковых данных (снимки высокого разрешения) позволяют оценить динамику береговой линии, температурный режим и некоторые составляющие водного баланса для всей акватории залива.

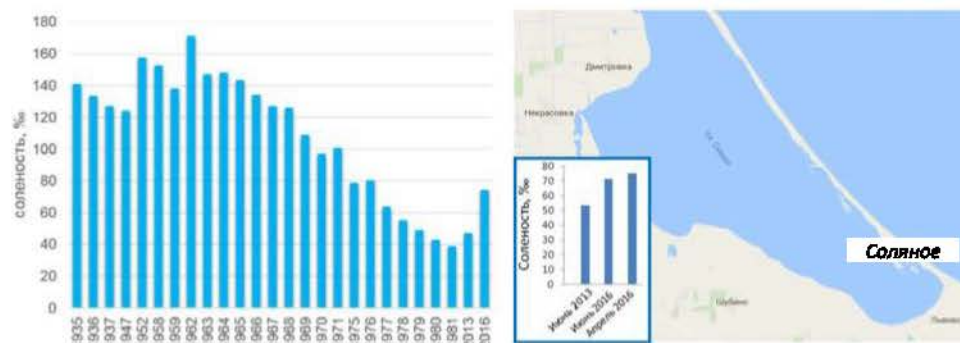
Снижение солености в акватории Восточного Сиваша ниже 35 ‰ создало благоприятные условия для воспроизводства и нагула глоссы и бычков [3]. Дальнейшее падение солености, сопровождавшееся сильным зарастанием макрофитами, стало неблагоприятным для воспроизводства рыбных запасов и для развития рыбного промысла в Восточном Сиваше. В местах интенсивного сброса пресных вод появились сугубо пресноводные виды.

В 2013 – 2016 гг. сотрудниками Морского гидрофизического института РАН (МГИ) были реализованы семь экспедиций в район Восточного Сиваша, в результате которых на 38 станциях отобраны пробы рапы для определения солености различными методами. В [4] представлены результаты экспедиционных исследований и показано, что пикнометрический метод является наиболее точным методом анализа, а рефрактометрический метод определения солености при калибровке перспективен для полевых работ.

В Южном Сиваше, соединенным с третьим плесом Восточного Сиваша Шакалинским сужением и находящимся полностью в юрисдикции Республики Крым (РФ), также отмечается увеличение солености воды, которое зависит от изменчивости антропогенных и природно-климатических факторов. На рис.2 приведена информация о динамике солености рапы за период с 1935 по 2016 гг. и включает различные ситуации в функционировании залива Сиваш. Это режим солености до введения в строй Северо-Крымского канала, режим солености во время эксплуатации канала и первые результаты изменения солености после перекрытия канала в 2014 г.

По данным экспедиции МГИ в июле 2016 г. (рис.2) наиболее высокие значения солености обнаружены в самой южной части (четвертый плес Восточного Сиваша), где значения солености превысили 73 ‰.

Исследование морфометрических характеристик Восточного Сиваша по спутниковым снимкам. В основе оперативного контроля состояния



Р и с . 2 . Многолетняя динамика солености на посту Соляное (Южный Сиваш).

водоемов лежат неконтактные методы наблюдений, которые осуществляются с помощью аэрокосмического мониторинга природных объектов [5, 6].

Для такого сложного объекта как залив Сиваш спутниковые методы исследования позволяют проводить наблюдения за пространственно-временными полями различных гидрологических параметров, биооптических характеристик, оценивать динамику береговой линии в условиях постоянно меняющихся антропогенных и природно-климатических факторов, выделять определяющие условия этих изменений, что особенно актуально, учитывая глобальную перестройку экосистемы Сиваша после перекрытия Северо-Крымского канала. Так, в [7] показана возможность использования спутниковых методов для оценки фильтрации азовских вод через Арабатскую стрелку как составляющего водного баланса залива.

Интенсивная хозяйственная деятельность на акватории и в береговой зоне залива Сиваш привела к изменению его морфометрических параметров. В периоды до, во время и после существования стока вод из Северо-Крымского канала менялся баланс воды в заливе, что существенно отразилось в изменении геометрии водного зеркала в эти периоды. Наиболее существенны изменения положения уреза воды Сиваша в летние сезоны, когда минимальны приходные составляющие водного баланса и велико испарение с поверхности водного зеркала. В сухие сезоны воды канала пополняли объем вод Южного Сиваша, в том числе увеличивая расход реки Салгир и заполняя рисовые чеки на побережье залива.

Спутниковые снимки высокого разрешения фиксируют состояние водоема в определенный момент времени. Сопоставление снимков, полученных с временным интервалом, позволяет получать характеристики состояния водоема в динамике с последующей интерпретацией степени преобразования водного объекта.

Анализ спутниковых снимков позволяет получить описательно-распознавательные образы водоемов, главным образом в виде площади водного зеркала S_z и ее контура (длина береговой линии L). Зная площадь, максимальную и среднюю глубину H_{cp} , можно получить объем водного тела $V = S_z \cdot H_{cp}$. Характеристики V и S_z позволяют рассчитать т.н. удельную поверхность S_z/V . Этот параметр характеризует обмен веществом и энергией между водоемом и окружающей средой [8].

Для исследования морфометрических характеристик Восточного Сиваша формируется массив доступных спутниковых снимков высокого разрешения (15 – 30 м) *Landsat 4-5 TM*, *7 ETM+*, привязанных к системе координат *WGS-84* [9]. Метод решения поставленных задач состоит в анализе спутниковых снимков, скомбинированных последовательно из каналов: ближнего (0,78 – 0,89 мкм), среднего (0,90 – 1,57 мкм) ИК-каналов и красного видимого канала (0,63 – 0,69 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. С большой точностью дешифрируются водные объекты внутри суши. Эта комбинация дает возможность анализа влажности почв и состояния расти-

тельного покрова [10]. При анализе состояния лиманов обводненные грунты (ил – грязь) на осушаемой территории отображается розовым цветом, что позволяет его четко отделить от водного зеркала водоема, которое отображается оттенками синего. Такой метод исследований применялся авторами при изучении водного режима озер-лиманов Керченской группы с применением спутниковых данных [11].

Особенности гидродинамического режима акватории залива Сиваш и перспективы использования современных методов математического моделирования для его оценки. Для разработки планов водного и эколого-экономического развития залива Сиваш в связи с перекрытием Северо-Крымского канала необходима информация об особенностях современного гидрологического режима и динамики вод, а также определяющих их факторов.

Главной особенностью гидродинамического режима является трансформация ветрового волнения в сгонно-нагонные явления, непосредственно связанные с воздействием ветра на водную толщу [12], что особо значимо для наиболее мелководных его частей.

В заливе Сиваш существует собственная система течений, состоящая из двух видов. Дрейфовые течения возникают при трении ветра о воду и носят переменчивый в зависимости от его направления характер. Стоковые течения возникают из-за разностей уровней отдельных частей Сиваша вследствие интенсивного испарения (Тонкий и Чонгарский проливы, Шакалинское сужение), сгонно-нагонных явлений (компенсационные течения), стока рек и временных водотоков [12].

Существующие условия способствуют большому испарению с водного зеркала Сиваша и создают снижение уровня в нем по отношению к поверхности Азовского моря. По данным регистрации уровня по сезонам [13] в апреле уровень воды высок фактически на всей акватории Восточного Сиваша, летом он несколько снижается из-за испарения, а с августа по октябрь поднимается до весенней отметки благодаря осадкам. Общая тенденция снижения уровня воды весной связана еще и с длительным, устойчивым воздействием ветров западных румбов на участках Восточного Сиваша. Так, например, в [13] при воздействии западного ветра в течение двух недель в мае было зарегистрировано падение уровня воды на входе в русло р. Стальная на 12 см, а в общем по руслу – на 5 см.

Инструментом анализа и прогноза состояния экосистемы залива Сиваш должна стать модель функционирования экосистемы залива, которая будет учитывать:

- временную изменчивость направления и скорости ветра,
- распределение температуры и солености воды в начальный момент времени на основе данных наблюдений,
- падение отметки уровня воды за счет разницы месячных сумм атмосферных осадков и испарения,
- сток реки Салгир.

Для изучения особенностей динамики вод, пространственно-временной изменчивости температуры и солености воды используется численная, нестационарная гидротермодинамическая модель [14]. Математическое моделирование осуществляется на основе прямоугольной расчетной сетки, ох-

ватывающей акваторию залива Сиваш, при этом глубины задаются при отметке уровня воды в заливе минус 0,4 м БС.

Модельные расчеты выполняются в три этапа. Первая серия численных экспериментов проводится для исследования особенностей ветровой циркуляции вод в заливе при отсутствии водообмена с Азовским морем. Расчеты установившихся ветровых течений выполняются при заданных ветрах восьми основных румбов силой 10 м/с.

Во второй серии численных экспериментов моделируется пространственно-временная изменчивость уровня воды в заливе и термохалинной структуры вод. Расчеты производятся в период с начала мая по конец августа при отсутствии водообмена с морем. При этом учитывается сток р. Салгир, разница месячных сумм атмосферных осадков и испарения. Сток реки Салгир задается в соответствии с особенностям его формирования: в апреле $6 \text{ м}^3/\text{с}$, в мае $3 \text{ м}^3/\text{с}$ и в июне – августе $1 \text{ м}^3/\text{с}$. Значения температуры воздуха, направлений и скорости ветра (с дискретностью 3 часа), месячных сумм атмосферных осадков задается на основе данных наблюдений, выполненных на ГМС «Геническ». Испарение с водной поверхности залива задается на основе среднемесячных данных наблюдений.

В третьей серии численных экспериментов учитывается водообмен залива с Азовским морем через Генический пролив. Глубина и ширина пролива при отметке уровня воды в заливе минус 0,4 м БС полагались равными 4 м. Как и в предыдущей серии экспериментов, моделируется наиболее критический для экосистемы залива отрезок времени года – с начала мая по конец августа. Временная изменчивость солености и температуры морской воды (среднедекадные значения) на морской открытой границе соединительного канала задаются на основе данных наблюдений.

Начальная отметка уровня моря принимается равной минус 0,15 м БС, а уровня воды в заливе минус 0,4 м БС. Учитывается падение отметки уровня воды в заливе за счет разницы месячных сумм атмосферных осадков и испарения. Вертикальное распределение температуры и солености воды в заливе в начальный момент времени задается на основе данных наблюдений и полагается однородным в горизонтальной плоскости.

Заключение. Соленость в Восточном Сиваше начала расти, что говорит о трансформации гидрологического и гидрохимического режимов в результате воздействия антропогенного фактора и требует дальнейшего мониторинга в соответствии с границами Республики Крым. При дальнейшем росте солености рапы в Южном Сиваше в перспективе возможно использование его для добычи соли, которое существовало до строительства Северо-Крымского канала и было утрачено при его функционировании.

Показаны возможности и перспективы использования дистанционных методов и математического моделирования для оценки гидродинамического режима залива Сиваш.

Спутниковые снимки высокого разрешения позволяют получать характеристики состояния всей акватории залива Сиваш с интерпретацией степени преобразования водного объекта в динамике, что особенно актуально, учитывая глобальную перестройку экосистемы Сиваша после перекрытия Северо-Крымского канала.

Использование современных математических моделей позволяет оценить особенности гидродинамического режима акватории залива Сиваш по различным сценариям ветрового режима и изменчивости составляющих водного баланса залива, а также при наличии водообмена с Азовским морем и без него.

Реализация представленных в работе современных методов оценок состояния залива Сиваш в условиях перекрытия Северо-Крымского канала позволит научно-обосновано разработать концепцию природопользования ресурсным потенциалом залива в новых условиях.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме 0827-2014-0010 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей на основе современных методов контроля состояния морской среды и гидротехнологий», а также частично при поддержке РФФИ, грант 16-45- 910582р_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Безруков Ю.Ф.* Тексты лекций по курсу «Экологические проблемы Крыма» <http://www.tnu.in.ua/study/downloads.php?do=file&id=4290>
2. *Сивашский регион: краткая социально-экономическая характеристика* / Под ред. Костюпина В.А., Фесенко Г.В.– Киев: Черноморская программа Ветландс Интернешнал, 2007.– 183 с.
3. *Болтачев А.Р., Карпова Е.П., Саксаганский В.В.* Трансформация ихтиоцены Восточного Сиваша (Азовское море) под влиянием антропогенных факторов // IV міжнародна іхтіологічна науково-практична конференція «Сучасні проблеми теоретичної та практичної іхтіології ОНУ ім.І.І.Мечнікова (7-11.09 2011 р.). – Одеса: Фенікс, 2011.– С.40-43.
4. *Ломакин П.Д., Совга Е.Е., Щурова Е.С. Овсяный Е.И.* Экспедиционные исследования МГИ в Восточном Сиваше летом и осенью 2014 года // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, 2014.– вып.28.– С.138-145.
5. *Курбатова И.Е.* Спутниковый мониторинг побережья Азовского моря.– реальные возможности и специфика // Исследования Земли из космоса.– 2000.– 3.– С.34-56.
6. *Степанов П.А., Горбатюк В.М.* Особенности организации мониторинга пересыпей и кос Азовского моря. http://www.rusnauka.com/17_AND_2010/Geographia/69335.doc.htm
7. *Shchurova E.S., Stanichnaya R.R., Stanichny S.V.* Satellite data for investigation of recent state and processes in the Sivash Bay // Proceedings of International Conference "Managing risks to coastal regions and communities in a changing world" (EMEC'S'11 – SeaCoasts XXVI, St. Petetsburg, 22-27.08.2016).– Moscow: RIOR Publ., 2016. (*in press*)
8. *Ястреб В.П., Иванов В.А., Хмара Т.В.* К вопросу о классификации водоемов зоны сопряжения суши и моря Азово-Черноморского побережья // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, 2007.– вып.15.– С.326-346.
9. <http://glovis.usgs.gov/>
10. *Лабутина И.А.* Дешифрирование аэрокосмических снимков.– М.: Аспект Пресс, 2004.– 184 с.

11. *Ястреб В.П., Харитонова Л.В., Хмара Т.В.* Морфометрические характеристики озер-лиманов Керченской группы для оценки изменчивости их бальнеологического ресурсного потенциала / Морские ресурсы прибрежной зоны Украины / Под ред. акад. НАНУ П.Ф. Гожика, акад. НАНУ В.А. Иванова.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012.– С.248-256.
12. *Михайлов В.А.* Про характер берегов Сиваша // Ученые записки Таврического Национального университета им. В.И.Вернадского. Серия «География».– 2005.– т.20 (59), № 2.– С.322-333.
13. *Кирикова Т.А., Антоновский А.Г.* Макрозообентос Восточного и Центрального Сиваша как кормовая база тундровых куликов в период миграции // Збірник праць Зоологічного музею.– 2010.– № 41.– С.210-235.
14. *Иванов В.А., Тучковенко Ю.С.* Прикладное математическое моделирование качества вод шельфовых морских экосистем.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006.– 368 с.

Материал поступил в редакцию 07.11.2016 г.

Е.А.Pozachenyuk, Е.Е.Sovga, Т.У.Khmara, L.V.Kharitonova,
Е.S.Schurova

METHODS OF ASSESSMENT OF THE SIVASH LAGOON STATE UNDER THE NORTH CRIMEAN CANAL OVERLAP IN 2014

The methods of assessment of the Sivash Lagoon current state under the North-Crimean Canal overlap in 2014 are suggested. The prospects and possibilities are discussed how to implement the methods for assessing the changes of the Sivash Lagoon resource potential under growth of brine salinity in the different parts of the Eastern Sivash and for estimation of separate water balance components of the Lagoon in whole. Using satellite images the possibility of assessing the coastline dynamics of the Lagoon under new environment is demonstrated.

KEYWORDS: salinity dynamics, water balance, resource potential, the North Crimean canal, the Sivash Lagoon