К вопросу о горизонтальной циркуляции вод озера Севан (спутниковая информация)

А.И. Гинзбург¹, Н.А. Шеремет¹, А.Г. Костяной^{1,3,4}, О.Ю. Лаврова²

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия E-mails: ginzburg@ocean.ru, kostianoy@gmail.com, sheremet@ocean.ru ² Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

³ Московский университет им. С. Ю. Витте, Москва, 115432, Россия ⁴ Майкопский государственный технологический университет Майкоп, 385000, Россия

Исследуется изменчивость вихревой динамики в поверхностном слое оз. Севан в летний период совместно с изменчивостью скорости и направления ветра над бассейном. Исследование выполнено на основе анализа серии последовательных спутниковых изображений видимого диапазона MSI (англ. Multispectral Instrument) Sentinel-2A/B с высоким пространственновременным разрешением (10 м, 5-10 сут), с близкими по датам радиолокационными изображениями (РЛИ) SAR (англ. Synthetic Aperture Radar) Sentinel-1А/В и данными о скорости и направлении ветра ряда метеорологических станций (МС) в период с 11 июля по 15 августа 2019 г. Выполненный анализ показал, что в рассматриваемый период в Малом Севане при устойчивых северо-восточных ветрах проявлялся традиционный циклонический круговорот. Основные изменения циркуляции в Большом Севане имели место с 11 по 31 июля: 11 июля преобладающим элементом циркуляции был вихревой диполь из циклона в южной половине глубоководной части бассейна (~20 км в широтном направлении и ~15 км в меридиональном) и антициклона примерно такого же размера к северу от него; с 16 по 26 июля циклонический вихрь увеличивался в меридиональном направлении и включал в себя два взаимосвязанных циклонических вихря меньшего размера (~7 км); с 31 июля до 15 августа циклонический круговорот с присоединёнными антициклонами на его периферии неизменно занимал большую часть глубоководного бассейна. Локальные направления ветров над Большим Севаном, скорость которых на протяжении всего рассматриваемого периода не превышала в основном 2 м/с, заметно менялись на временных масштабах в сутки и, может быть, меньших. При этом, судя по РЛИ, часто наблюдались ветры восточных и юго-восточных направлений, информация о которых в доступных для нас архивах МС отсутствовала.

Ключевые слова: озеро Севан, циркуляция вод озера Севан, вихри, вихревые диполи, спутниковые изображения видимого диапазона, радиолокационные изображения, ветровое воздействие

> Одобрена к печати: 14.11.2023 DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-258-275

Введение

Высокогорное оз. Севан, самое крупное озеро на Кавказе и, как его называют, «Жемчужина Армении», за последние 90 лет претерпело существенные изменения в морфометрических параметрах (уровень, площадь, объём), физических, биохимических и других характеристиках (Интегральная..., 2011; Оганесян, 1994; Румянцев и др., 2012; Экология..., 2010; Babayan et al., 2005; Medvedev et al., 2020; Wilkinson, 2020). До 1933 г., когда начался плановый искусственный спуск воды из оз. Севан с целью использования его вод на нужды ирригации и энергетики, нулевая отметка озера в среднем находилась на высоте 1916,2 м в Балтийской системе высот (БС). Максимальные глубины Малого и Большого Севана, разделённых проливом между мысами Норатусским на западе и Артанишским на востоке (*рис. 1*, см. с. 259), составляли 98,7 и 58,7 м. Минимальный уровень озера (примерно 1896,3 м БС) был достигнут в конце 2001 г. – начале 2002 г., после чего в результате рационального водопользования он повышался со скоростью 25–45 см/год (Румянцев и др., 2012) до 2011 г., когда дальнейший рост

уровня был временно ограничен. Десятилетие 2010-х гг. — период относительно малого изменения уровня Севана (от 1900,00 до 1900,66 м БС на 1 января каждого года), и летом 2022 г. он находился на отметке 1900,66 м БС (Гинзбург и др., 2023; Почему..., 2022). Таким образом, современный уровень Севана на 15,5–16 м ниже естественного, а максимальные глубины Малого и Большого Севана равны примерно 83 и 43 м соответственно.



Рис. 1. Сеть метеорологических станций в бассейне оз. Севан (рисунок заимствован из работы (Маргарян и др., 2022)); 1–3 — м. Норатусский, Артанишский п-ов, м. Цовинар соответственно

С 2018 г. в оз. Севан наблюдается интенсивное цветение сине-зелёных водорослей, связанное во многом с поступлением в воду большого количества биогенных элементов вследствие затопления неочищенных берегов при повышении уровня озера, неочищенных сточных вод сельхозугодий и животноводческих ферм и т.д. (Оганесян, 1994; Почему..., 2022; Nazaretyan, 2021). Очевидно, что основные источники загрязнения озера (особенно Большого Севана), приведшие к его антропогенной эвтрофикации, находятся в береговой зоне. Поэтому важно понимать, какие процессы определяют водообмен этой зоны с глубоководной частью озера. Внутрибассейновая циклоническая циркуляция в Большом Севане, выявленная ограниченными натурными измерениями в летне-осеннее время (Айнбунд, 1961) и подтверждённая результатами математического моделирования (Акопян, Демин, 1982; Акопян, Торгомян, 1980; Торгомян, 1975 и др.), не объясняет такого водообмена. Однако анализ спутниковых изображений видимого диапазона с высоким пространственным разрешением в летне-осенний сезон показал, что внутрибассейновый горизонтальный водообмен осуществляется интенсивной вихревой динамикой с размерами вихревых структур от нескольких километров до примерно 20 км (Гинзбург и др., 2023). Вихри, вихревые диполи и упаковки вихревых диполей (грибовидных течений) (Федоров, Гинзбург, 1988; Fedorov, Ginsburg, 1986) занимают практически весь Большой Севан, при этом характер горизонтальной циркуляции заметно меняется на временном масштабе в пять дней. Квазистационарной структурой в Большом Севане, проявляющейся на всех информативных спутниковых изображениях летне-осеннего периода, является циклонический круговорот (вихрь) в глубоководной части бассейна западнее м. Цовинар с меняющимся размером, пространственной ориентацией и положением центра. В Малом Севане квазистационарный элемент циркуляции — также циклонический круговорот севернее пролива с меняющимися присоединёнными элементами антициклонической завихренности.

Возникает вопрос: что обуславливает столь высокую (на временных масштабах в несколько дней) изменчивость вихревой картины в оз. Севан в тёплый сезон? Логично предполагать, что при неизменной донной топографии/орографии и стратификации вод озера механизмом, вызывающим столь быстрые изменения вихревых движений, являются разнонаправленные ветровые воздействия на приповерхностный слой водоёма (Гинзбург и др., 2023). В настоящей работе выполнено сопоставление картины вихревой циркуляции в оз. Севан с доступной информацией о поле ветра по спутниковым радиолокационным изображениям и измерениям на ряде береговых станций в бассейне озера.

Данные

Для анализа характера циркуляции вод озера в настоящем исследовании используется серия последовательных спутниковых изображений видимого диапазона высокого разрешения (10 м) MSI (*англ.* Multispectral Instrument) Sentinel-2A/B, доступных через интернет (NASA Worldview (*англ.* National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства — HACA), https://worldview. earthdata.nasa.gov), с 11 июля по 15 августа 2019 г. Периодичность изображений видимого диапазона — в основном пять дней. Каждое из них сопровождается близким по дате радиолокационным изображением (РЛИ) радара с синтезированной апертурой (*англ.* Synthetic Aperture Radar — SAR) спутников Sentinel-1A/B (пространственное разрешение — 10 м, периодичность — от 1 до 6 сут) (https://scihub.copernicus.eu/dhus). Обработка и анализ спутниковой информации проводились с использованием возможностей информационной системы See the Sea (STS) (Лаврова и др., 2019).

Пассивным трассером поверхностных течений на изображениях видимого диапазона является фитопланктон. Информацию о локальных направлении и относительной интенсивности ветрового воздействия на поверхность воды дают радиолокационные изображения: участкам со спокойной (невзволнованной) водной поверхностью соответствуют низкие значения обратно-рассеянного радиолокационного сигнала и, соответственно, тёмные области на РЛИ, участкам с взволнованной поверхностью — более высокие значения обратно-рассеянного сигнала и светлые области на РЛИ (Лаврова и др., 2011). При скоростях ветра в диапазоне 3–6 м/с над исследуемой акваторией на РЛИ могут проявляться вихревые структуры (см., например, работы (Лаврова и др., 2011; Dokken, Wahl, 1996; Lavrova, Mityagina, 2016)).

Использованы также данные о скорости и направлении ветра с некоторых метеорологических станций (МС) в районе бассейна оз. Севан. Расположение МС, для которых в литературе наиболее часто приводится информация о повторяемости ветров различных направлений в разных районах бассейна озера (Айнбунд, 1961; Оганесян, 1994; Экология..., 2010), показано на *рис. 1.* К сожалению, доступной оказалась информация о скорости и направлении ветра в рассматриваемый период только для МС «Севан», «Камо» (Гавар), «Мартуни» и «Чамбарак» (севернее Шоржи) (данные предоставлены метеорологическими сайтами «Расписание погоды» (гр5.ги) и Гисметео (https://www.gismeteo.ru/)). Для МС «Севан» и «Камо», в архиве которых информация по ветру указывается через каждые 3 ч, использовались данные на 08:00 местного времени (MB), наиболее близкого ко времени пролёта спутников Sentinel-1A/B (примерно 03:00 GMT (*анга*. Greenwich Mean Time)) и, соответственно, времени используемых РЛИ (MB = GMT + 4 ч); для MC «Мартуни» и «Чамбарак», где для каждой даты указываются два значения (день, ночь), использовалась дневная информация (время пролёта над озером спутников Sentinel-2A/B — примерно 07:58 GMT, т.е. около 12:00 MB).

Анализ картины течений в озере и данных о ветре над его поверхностью

В данном разделе анализируются спутниковые изображения видимого диапазона, отражающие вариации горизонтальной циркуляции вод в оз. Севан летом примерно в течение месяца (с 11 июля по 15 августа 2019 г.), близкие к ним по датам РЛИ и информация о скорости и направлении ветра на МС в ряде упомянутых выше пунктах.

На цветосинтезированном изображении MSI Sentinel-2A (спектральные каналы 4, 3, 2), полученном 11 июля 2019 г., в Большом Севане отчётливо проявляются (puc. 2a): вихревой диполь с примерно горизонтальной струйной частью западного направления между циклоном (к югу) и антициклоном (к северу), занимающий всю глубоководную часть бассейна; вихревой диполь вблизи Артанишского п-ова, являющийся разветвлением антициклонической части глубоководного вихревого диполя; небольшой антициклонический вихрь за м. Цовинар; вихревой диполь в юго-восточной части озера. Циклоническая часть вихревого диполя в глубоководной части Большого Севана (размер в широтном направлении — ~20 км, в меридиональном — ~15 км) образует вихревую упаковку с антициклоном за м. Цовинар (~5 км) и диполем в юго-восточной части озера (вихри размером ~5 км). В Малом Севане циклонический круговорот (~8 км) едва различим, но его существование подтверждается вовлекаемой в циклоническое движение богатой хлорофиллом струёй вод из Большого Севана. Этот циклонический вихрь не виден ни на РЛИ SAR-C Sentinel-1A, полученном в предыдущий день, 10 июля (*puc. 26*, см. 262), ни на РЛИ от 11 июля (*puc. 28*, см. 262) при усилившемся здесь северо-восточном ветре, о чём свидетельствует яркая светлая полоса на РЛИ, соответствующая усилению отражённого радиолокационного сигнала. В северо-западной части Большого Севана 10 июля на РЛИ наблюдались поверхностные проявления западного ветра, а в его восточной части — ветер с юго-востока (см. рис. 26). На обоих РЛИ отчётливые проявления вихревых структур в Большом Севане отсутствуют, хотя распределение узких тёмных полос (сликов), связанных с наличием на поверхности биогенных плёнок, на фоне взволнованной поверхности на рис. 26 указывает на существование вихря в глубоководной части бассейна.



Рис. 2а. Изображение MSI Sentinel-2А от 11 июля 2019 г.



Рис. 26, в. SAR Sentinel-1А изображения от 10 июля 2019 г. 03:09 GMT (б) и 11 июля 2019 г. 14:54 GMT (в)

На MC «Севан» 11 июля зарегистрирован штиль, на MC «Камо» — южный ветер 1 м/с, на MC «Мартуни» 10 и 11 июля — северо-восточный и восточный ветры 1 и 2 м/с соответственно, на MC «Чамбарак» 10 и 11 июля — северный и западный ветры 2 и 1 м/с соответственно.

Пять дней спустя, 16 июля, вихревая картина заметно изменилась. В Малом Севане циклонический круговорот с двумя присоединёнными антициклоническими вихрями на его северо-западном и юго-восточном участках периферии проявляется на оптическом изображении (*puc. 3a*), но не виден на РЛИ того же дня (*puc. 36*). Здесь по-прежнему северо-восточный ветер, тогда как в Большом Севане — сложная система разнонаправленных ветров с запада, северо-северо-запада (от Артанишского п-ова) и юго-востока. Как видно на изображении MSI Sentinel-2B от 16 июля (см. *puc. 3a*), большую часть Большого Севана занимает дипольная структура из глубоководного циклонического вихря и антициклона в юго-восточном регионе (размер по горизонтали — ~8,5 км). При этом глубоководный циклон включает в себя два соединённых струёй и явно взаимодействующих циклонических вихря меньшего размера (~7 км). Диполь наблюдается также в Артанишском зал. (вихри ~3 км).





Рис. 3а, б. Изображение MSI Sentinel-2В от 16 июля 2019 г. (*a*); РЛИ SAR Sentinel-1В от 16 июля 03:08 GMT (б)



Рис. Зв, *г*. Изображения РЛИ SAR Sentinel-1А от 22 июля 03:09 GMT (*в*) и 23 июля 2019 г. 14:54 GMT (*г*)

На MC «Севан» 16 июля зарегистрирован северный ветер 4 м/с, на MC «Камо» — юго-юго-восточный ветер 1 м/с (в 08:00 MB, сменившийся к 11:00 MB на западно-юго-западный ветер 1 м/с), на MC «Мартуни» и «Чамбарак» — северо-восточные ветры 2 м/с.

РЛИ от 22 и 23 июля (*puc. 3в* и *г*) приведены для демонстрации изменчивых атмосферных процессов перед следующим оптическим изображением 26 июля (*puc. 4*, см. с. 265) (радиолокационной съёмки в более близкие даты не было). На *puc. 3в* проявляются очертания вихревых структур в Большом Севане. На МС «Севан» 22 и 23 июля зарегистрированы северные ветры 2 и 3 м/с соответственно, на МС «Камо» — штиль и северо-северо-западный ветер 1 м/с соответственно, на МС «Мартуни» — северо-восточные ветры 2 и 1 м/с соответственно, на МС «Чамбарак» — северо-восточный ветер 2 м/с и юго-западный 1 м/с соответственно.



Рис. 4. Изображение MSI Sentinel-2В от 26 июля 2019 г.

На цветосинтезированном изображении MSI Sentinel-2В от 26 июля (см. *рис. 4*) в глубоководном циклоническом круговороте Большого Севана можно видеть те же взаимосвязанные циклонические вихри, что и десятью днями раньше (см. *рис. 3a*), но изменившие ориентацию; в Артанишском зал. — небольшой диполь, в юго-восточной части — диполь за м. Цовинар и элемент циклонической завихренности в юго-восточной части, образующие, по-видимому, общую вихревую упаковку с глубоководным циклоном. В Малом Севане видны слабо различимый циклонический круговорот севернее пролива и чётко проявляющийся циклонический вихрь (или более сложная структура) в северной части озера.

На МС «Севан» 26 июля зарегистрирован северный ветер 2 м/с, на МС «Камо» — юго-юго-восточный ветер 1 м/с (в 08:00 MB, сменившийся к 11:00 MB на юго-юго-западный 1 м/с), на МС «Мартуни» — юго-западный ветер 2 м/с, на МС «Чамбарак» — северный ветер 4 м/с.

Следующему оптическому изображению MSI Sentinel-2A от 31 июля (рис. 5a, см. с. 266) предшествовали меняющиеся атмосферные воздействия, которые нашли своё проявление на РЛИ от 28 и 29 июля (рис. 5б и в, см. с. 266 и 267): к устойчивому восточно-северо-восточному ветру 28 июля в Малом Севане через день добавился северо-западный ветер в северной части этой акватории, а в Большом Севане восточный ветер в южной части (см. puc. 56) сменился сложной системой разнонаправленных ветров с восточными ветрами из многочисленных ущелий на восточном побережье и западно-юго-западными ветрами с западного берега. На оптическом изображении 31 июля (см. рис. 5а) циклонический круговорот вблизи пролива в Малом Севане с трудом различим, лучше проявляется циклон (или диполь) в его северной части. В циклоническом круговороте глубоководной части Большого Севана — хаотическое распределение трассера (повышенная концентрация фитопланктона), у северного участка периферии циклона — элемент антициклонической завихренности, заканчивающийся циклоническим вихрем в Артанишском зал., а на южной периферии глубоководного циклона — вытянутый вдоль берега антициклон. В юго-восточной части бассейна — вихревой диполь, антициклоническая составляющая которого также образует диполь с глубоководным циклоном.

Информация по данным метеостанций в эти три дня: 28 и 29 июля на MC «Севан» — восточно-северо-восточный ветер 3 м/с и северо-западный ветер 1 м/с соответственно, на MC «Камо» — северо-северо-восточный ветер 1 м/с и штиль соответственно, на MC «Мартуни» —

северо-восточные ветры 2 и 1 м/с соответственно, на МС «Чамбарак» — северо-западный и северный ветры 2 м/с; 31 июля на МС «Севан» и «Камо» зарегистрировано отсутствие ветра (штиль), на МС «Мартуни» — западный ветер 1 м/с, на МС «Чамбарак» — юго-западный ветер 3 м/с.





б

Рис. 5а, б. Изображение MSI Sentinel-2А от 31 июля 2019 г. (а); РЛИ SAR Sentinel-1В от 28 июля (б)



в

Рис. 5в. Изображение SAR Sentinel-1А от 29 июля 2019 г.

В течение двух дней, предшествовавших 5 августа, направления ветров, судя по РЛИ, заметно менялись: северо-восточный ветер в Малом Севане 3 августа (*puc. 66*, см. 268) сменился северным в более широкой полосе (*puc. 66*, см. с. 268); вместо комбинации западного ветра с южным, переходящим в восточный (полукруг с циклоническим поворотом) 3 августа в Большом Севане (см. *puc. 66*), на РЛИ от 4 августа отразились поверхностные проявления преобладающих северо-восточных ветров с восточного побережья (см. *puc. 66*).



Рис. 6а. Изображение MSI Sentinel-2В от 5 августа 2019 г.



Рис. 66, в. Изображения РЛИ SAR Sentinel-1А от 3 августа 2019 г. (б) и 4 августа 2019 г. (в)

Картина течений в Большом Севане при этом мало изменилась, что следует из анализа оптического изображения MSI Sentinel-2A от 5 августа: большую часть бассейна занимает циклонический круговорот с антициклонами на юго-восточном, северном и северо-западном участках периферии (*рис. 6a*, см. с. 267). В Малом Севане хорошо различим циклон, возможно с двумя присоединёнными элементами антициклонической завихренности на восточном и западном участках периферии. В центре этого циклона наблюдается повышенная концентрация фитопланктона.

Информация с метеостанций: 3 и 4 августа на MC «Севан» наблюдались северо-северозападный ветер 2 м/с и юго-восточный ветер 1 м/с соответственно, на MC «Камо» — штиль, на MC «Мартуни» — северный и северо-восточный ветры 1 м/с соответственно, на MC «Чамбарак» — юго-западный и северо-восточный ветры 2 м/с соответственно; 5 августа на MC в той же последовательности зарегистрированы северный ветер 2 м/с, западно-юго-западный ветер 1 м/с, северо-восточный ветер 2 м/с. За день до 10 августа — дня, картина течений для которого проявилась на изображении MSI Sentinel-2A (*puc. 7a*), над Малым Севаном имели место северо-восточные ветры, а над Большим Севаном, как следуют из анализа РЛИ, — сложная система встречных ветров (*puc. 7b*), интенсивность которых к следующему дню уменьшилась. В Малом Севане 10 августа на оптическом изображении хорошо различим вихревой диполь из циклона вблизи пролива и присоединённого антициклона с северо-западной стороны, который практически не проявляется на РЛИ того же дня (*puc. 7b*, см. с. 270). В Большом Севане при этом наблюдается та же, что и пятью днями раньше, структура — тетраполь из глубоководного циклона с тремя присоединёнными антициклонами (см. *puc. 7a*). Очертания этого циклона на фоне взволнованной поверхности видны на РЛИ того же дня (см. *puc. 7b*), а днём раньше (см. *puc. 7b*) на РЛИ проявляется антициклонический вихрь за м. Цовинар.





Рис. 7а, б. Изображение MSI Sentinel-2A от 10 августа 2019 г. (*a*); РЛИ SAR Sentinel-1B от 9 августа 2019 г. (*б*)



Рис. 7в. Изображение SAR Sentinel-1А от 10 августа 2019 г.

Информация с метеостанций: 9 и 10 августа на МС «Севан» наблюдались восточно-северо-восточный ветер 1 м/с и штиль соответственно, на МС «Камо» — штиль, на МС «Мартуни» — северо-восточные ветры 2 м/с, на МС «Чамбарак» — северо-восточный ветер 3 м/с и северный ветер 2 м/с соответственно.



а

Рис. 8а. Изображение MSI Sentinel-2В от 15 августа 2019 г.



Рис. 86. Изображение РЛИ SAR Sentinel-1А от 15 августа 2019 г.

Те же элементы вихревой динамики наблюдаются и через пять дней, 15 августа, на изображении MSI Sentinel-2B (*puc. 8a*, см. с. 270) при северо-восточном и восточном ветрах в Малом Севане и встречных ветрах разных направлений в Большом Севане (*puc. 86*). На РЛИ на фоне взволнованной поверхности проявляются циклонический круговорот в Малом Севане и очертания циклонического круговорота в Большом Севане. В этот день на МС «Севан» зарегистрирован северный ветер 2 м/с, на МС «Камо» — штиль, на МС «Мартуни» северо-восточный ветер 1 м/с, на МС «Чамбарак» — южный ветер 2 м/с.

Обсуждение и выводы

Задачей настоящей статьи было исследование изменения картины вихревой циркуляции в поверхностном слое оз. Севан в период наибольшего прогрева поверхностного слоя и выраженной стратификации вод в озере (июль–август) (Оганесян, 1994; Экология..., 2010) и его связи с меняющимися ветровыми условиями. Для анализа использовалась серия последовательных спутниковых изображений видимого диапазона MSI Sentinel-2A/B с 11 июля по 15 августа 2019 г. с интервалом в основном пять дней вместе с близкими по датам радиолокационными изображениями SAR Sentinel-1A/B и доступными данными о направлении и скорости ветра ряда метеостанций в бассейне оз. Севан (MC «Севан», «Камо», «Мартуни», «Чамбарак»).

Выполненный анализ оптических спутниковых изображений показал, что рассматриваемый период с точки зрения вихревой динамики был относительно спокойным. В Малом Севане традиционно проявлялся циклонический круговорот севернее пролива между Малым и Большим Севаном, иногда с присоединёнными антициклоническими вихрями и вихревыми структурами в северной части озера. В Большом Севане доминирующей структурой в глубоководной части был циклонический круговорот, образующий вихревые упаковки с элементами антициклонической завихренности на его периферии и диполями в юго-восточной части озера. Основные изменения циркуляции в глубоководной части Большого Севана имели место с 11 по 31 июля: циклонический круговорот (~20 км в широтном направлении и ~15 км в меридиональном), занимавший южную половину глубоководной части бассейна и составлявший диполь с примерно такого же размера антициклоном к северу от него 11 июля (см. *puc 2a*), заметно увеличивался в меридиональном направлении и в центре него наблюдались взаимосвязанные циклонические вихри меньшего размера (см. *puc. 3a, 4a*). (Заметим, что спутниковые изображения позволяют судить только о циркуляции поверхностного слоя озера.) Августовские изображения демонстрируют практически неизменную картину с циклоническим круговоротом, занимающим практически всю глубоководную часть Большого Севана. Меняющаяся концентрация фитопланктона в центре этого циклонического круговорота в рассматриваемый период не была предметом настоящего исследования.

Поле ветра в Малом Севане, судя по РЛИ, на протяжении всего периода было довольно устойчивым по направлению: преобладали северо-восточные ветры, что согласуется с известной информацией по данному району (Айнбунд, 1961; Экология.., 2010). (Заметим, что информация о направлении ветра по МС «Чамбарак» не всегда соответствовала близкому по времени РЛИ и, по-видимому, неинформативна из-за её удалённости от побережья.) В Большом Севане поле ветра, в соответствии с приведёнными РЛИ, заметно менялось на временных масштабах в сутки и, может быть, меньших. Известно, что преобладающие направления ветров в разных районах озера различны и соответствуют в основном направлениям окружающих котловину озера горных массивов (горнодолинные ветры) (Оганесян, 1994; Румянцев и др., 2012), что хорошо видно на приведённых в данной статье РЛИ. К сожалению, информация о ветре по данным МС на восточном и юго-восточном побережье Большого Севана в доступных для нас архивах отсутствует, но на РЛИ видно, что ветры восточных направлений в рассматриваемый период в Больщом Севане наблюдались часто, и, по данным работы (Экология..., 2010), в пункте Масрик (см. *рис. 1*) преобладающее направление ветра — восточное.

Направления ветров по данным МС и РЛИ в один и тот же день (но в разное время) часто не совпадали, что связано, по-видимому, с изменчивым полем ветра. Однако, судя по использованным данным метеорологических станций, на протяжении всего рассматриваемого периода скорость ветра в основном не превышала 2 м/с, что согласуется с информацией о среднемноголетней скорости ветра (1,0-2,0 м/с) в районе Большого Севана (Оганесян, 1994). В частности, в период с 11 по 16 июля 2019 г., когда произошли заметные изменения в циркуляции вод Большого Севана (см. *рис. 2a* и *3a*), на МС «Камо» скорость ветров разных направлений была в пределах 1 м/с, на МС «Мартуни» — в пределах 2 м/с. Радиолокационные изображения в этот период отсутствовали. Малые скорости ветра являются, по-видимому, причиной нечёткого проявления вихрей на радиолокационных спутниковых изображениях.

На основании вышеизложенного можно заключить, что имевшаяся в нашем распоряжении спутниковая информация с временным интервалом между последовательными оптическими изображениями пять дней (в лучшем случае) и недостающая информация с МС в восточной части озера не позволили проследить изменение вихревой картины в Большом Севане, имевшее место в период с 11 по 16 июля и далее до 31 июля. Картина циркуляции в первой половине августа в основном не менялась: наблюдался устойчивый циклонический круговорот, занимающий большую часть глубоководного бассейна.

А. И. Гинзбург, Н.А. Шеремет и А. Г. Костяной выполнили настоящее исследование (анализ спутниковых изображений видимого диапазона высокого пространственного разрешения) в рамках госзадания № FMWE-2021-0002 «Механизмы формирования циркуляционных структур Мирового океана: ключевые процессы в пограничных слоях и их роль в динамике океана на основе экспедиционных исследований, дистанционного зондирования, численного и лабораторного моделирования». О. Ю. Лаврова проводила обработку и анализ радиолокационных изображений в рамках Государственного задания Института космических исследований РАН, тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8.

Литература

- 1. *Айнбунд М. М.* К вопросу о термическом режиме озера Севан // Результаты комплексных исследований по Севанской проблеме. Ереван: Изд-во АН Армянской ССР, 1961. Т. 1. С. 324–335.
- 2. *Акопян М.А., Демин Ю.Л.* Численное моделирование течений озера Севан // Метеорология и гидрология. 1982. № 8. С. 68–74.
- 3. *Акопян М.А., Торгомян Г.М.* Расчет поля скоростей озера Севан методом математического моделирования // Изв. Акад. наук Армянской ССР. Сер. техн. наук. 1980. Т. 33. № 1. С. 34–39.
- 4. Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А., Кураев А. В. Горизонтальная циркуляция вод и морфометрические параметры озера Севан в современный период (спутниковая информация) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 230–243. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-230-243.
- 5. Интегральная оценка экологического состояния озера Севан (GEO Lake Sevan) / Ассоциация «За УЧР»/UNEPCom. Ереван, 2011. 42 с. https://gridarendal-website-live.s3.amazonaws.com/produc-tion/documents/:s_document/92/original/sevan-report---fin.pdf?1483646517.
- 6. Лаврова О. Ю., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Митягина М. И., Гинзбург А. И., Шеремет Н. А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 470 с.
- 7. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Уваров И. А., Лупян Е. А. Текущие возможности и опыт использования информационной системы See the Sea для изучения и мониторинга явлений и процессов на морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 266–287. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
- 8. *Маргарян В. Г., Аветисян Г. Д., Саргсян А. Т., Маргарян П. Н.* Закономерности пространственно-временного распределения абсолютных минимальных температур приземного слоя воздуха в бассейне озера Севан // Изв. Российской акад. наук. Сер. географ. 2022. Т. 86. № 2. С. 232–242. DOI: 10.31857/S2587556622020078.
- 9. Оганесян Р.Г. Озеро Севан вчера, сегодня... Ереван: Изд-во НАН РА «Гитутюн», 1994. 478 с.
- Почему «цветет» Севан и как с этим бороться Минокружающей среды пояснило // SPUTNIK, Армения. 31 июля 2022. https://ru.armeniasputnik.am/20220730/pochemu-tsvetet-sevan-i-kak-s-etimborotsya--minokruzhayuschey-sredy-poyasnilo-45912598.html.
- 11. Румянцев В.А., Драбкова В.Г., Измайлова А.Г. Озеро Севан // Великие озера мира. СПб.: Лема, 2012. С. 271-280.
- 12. *Торгомян Г. М.* Течения озера Севан // Изв. Акад. наук Армянской ССР. Сер. техн. наук. 1975. Т. 28. № 3. С. 45–50.
- 13. Федоров К. Н., Гинзбург А. И. Приповерхностный слой океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 304 с.
- 14. Экология озера Севан в период повышения его уровня. Результаты исследований Российско-Армянской биологической экспедиции по гидроэкологическому обследованию озера Севан (Армения) (2005–2009). Махачкала: Наука ДНЦ, 2010. 348 с.
- 15. Babayan A., Hakobyan S., Jenderedjian K., Muradyan S., Voskanov M. Lake Sevan: Experience and Lessons Learned Brief. 2005. P. 347–362. https://iwlearn.net/resolveuid/6af5017fa3a56bc7b8428f71c100362e.
- 16. *Dokken S. T., Wahl T.* Observations of spiral eddies along the Norwegian Coast in ERS SAR images. FFI Rapport 96/01463. 1996.
- 17. *Fedorov K.N., Ginsburg A.I.* "Mushroom-like" currents (vortex dipoles) in the ocean and in a laboratory tank // Annales Geophysicae. 1986. V. 4B. No. 5. P. 507–516.
- Lavrova O. Yu., Mityagina M. I. Manifestation specifics of hydrodynamic processes in satellite images of intense phytoplankton bloom areas // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. V. 52. No. 9. P. 974–987.
- 19. *Medvedev A.*, *Telnova N.*, *Alekseenko N. et al.* UAV-derived data application for environmental monitoring of the coastal area of Lake Sevan, Armenia with a changing water level // Remote Sensing. 2020. V. 12. Article 3821. DOI: 103390/rs12223821.
- 20. *Nazaretyan H*. The Ups and Downs of Lake Sevan // EVN Report. July 26, 2021. https://evnreport.com/ magazine-issues/the-ups-and-downs-of-lake-sevan/.
- 21. *Wilkinson I. P.* Lake Sevan: Evolution, Biotic Variability and Ecological Degradation // Large Asian Lakes in a Changing World / ed. S. Mischke. Springer Water Book Ser. Cham: Springer, 2020. Ch. 2. P. 35–63. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42254-7_2.

On horizontal water circulation in Lake Sevan (satellite information)

A. I. Ginzburg¹, N.A. Sheremet¹, A. G. Kostianoy^{1,3,4}, O. Yu. Lavrova²

 ¹ Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia E-mails: ginzburg@ocean.ru, kostianoy@gmail.com, sheremet@ocean.ru
² Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: olavrova@iki.rssi.ru
³ Moscow Witte University, Moscow 115432, Russia
⁴ Mavkop State Technological University, Maykop 385000, Russia

The article examines the variability of eddy dynamics in the surface layer of Lake Sevan in summer, together with the variability of wind speed and direction over the basin. The study was carried from analysis of a series of sequential Sentinel-2A/B MSI (Multispectral Instrument) visible satellite images with high spatiotemporal resolution (10 m, 5-10 days) with close-in-dates Sentinel-1A/B SAR radar images and data on wind speed and direction of a number of meteorological stations (MS) in the period from July 11 to August 15, 2019. The analysis showed that during the period under review in Small Sevan, with stable northeastern winds, a traditional cyclonic circulation was observed. The main changes in circulation in Large Sevan took place from July 11 to July 31: on July 11, the predominant circulation element was an eddy dipole from a cyclone in the southern half of the deep-water part of the basin (~20 km in the latitudinal direction and ~15 km in the meridional direction) and an anticyclone of approximately the same size to the north of it; from July 16 to July 26, the cyclonic eddy increased in the meridional direction and included two interconnected cyclonic eddies of a smaller size $(\sim 7 \text{ km})$; from July 31 to August 15, the cyclonic gyre with attached anticyclones on its periphery invariably occupied most of the deep-sea basin. Local wind directions over Large Sevan, the speed of which throughout the entire period under review generally did not exceed 2 m/s, changed noticeably on time scales of a day and, perhaps, smaller. At the same time, according to the radar images, winds of eastern and southeastern directions were often observed, information about which was absent in the MS archives available to us.

Keywords: Lake Sevan, water circulation of Lake Sevan, eddies, eddy dipoles, visible satellite images, radar images, wind effects

Accepted: 14.11.2023 DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-258-275

References

- 1. Ainbund M. M., On the issue of the thermal regime of Lake Sevan, In: *Rezul'taty kompleksnykh issledovanii po Sevanskoi probleme* (Results of comprehensive research on the Sevan problem), Yerevan: Publ. house AN Arm. USSR, 1961, Vol. 1, pp. 323–335 (in Russian).
- 2. Akopyan M.A., Demin Yu.L., Numerical modeling of the currents of Lake Sevan, *Meteorologiya i gidrologiya*, 1982, No. 8, pp. 68–74 (in Russian).
- 3. Akopyan M.A., Torgomyan G.M., Calculation of the velocity field of Lake Sevan by mathematical modeling, *Izvestiya Akademii nauk Armyanskoi SSR*, *Seriya tekhnicheskikh nauk*, 1980, Vol. 33, No. 1, pp. 34–39 (in Russian).
- 4. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A., Kouraev A. V., Horizontal water circulation and morphometric parameters of Lake Sevan in the modern period (satellite information), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 3, pp. 230–243 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-230-243.
- 5. *Integral'naya otsenka ekologicheskogo sostoyaniya ozera Sevan (GEO Lake Sevan)* (Integrated assessment of the ecological state of Lake Sevan), Association "For SHD"/UNEPCom, Yerevan, 2011, 42 p. (in Russian), https://gridarendal-website-live.s3.amazonaws.com/production/documents/:s_document/92/original/sevan-report---fin.pdf?1483646517.
- 6. Lavrova O. Yu., Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Ginzburg A. I., Sheremet N. A., *Complex satellite monitoring of the Russian seas*, Moscow: IKI RAN, 2011, 470 p. (in Russian).
- 7. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Uvarov I. A., Loupian E. A., Current capabilities and experience of using the See the Sea information system for studying and monitoring phenomena and processes on the

sea surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 266–287 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.

- 8. Margaryan V. G., Avetisyan G. D., Cargsyan A. T., Margaryan P. N., Regularities of spatio-temporal distribution of absolute minimum temperatures of surface air layer in Lake Sevan basin, *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, 2022, Vol. 86, No. 2, pp. 232–242 (in Russian), DOI: 10.31857/S2587556622020078.
- 9. Hovhannissian R. H., *Lake Sevan yesterday*, *today*..., Yerevan: Publ. House of NAS RA "Gitutjun" 1994, 478 p. (in Russian).
- 10. Why Sevan "blooms" and how to deal with it the Ministry of the Environment explained, *SPUTNIK*, *Armenia*, 31 July 2022 (in Russian), https://ru.armeniasputnik.am/20220730/pochemu-tsvetet-sevan-i-kak-s-etim-borotsya--minokruzhayuschey-sredy-poyasnilo-45912598.html.
- 11. Rumyantsev V.A., Drabkova V.G., Izmailova A.G., Lake Sevan, In: *Velikie ozera mira* (Great Lakes of the World), Saint Petersburg: Lema, 2012, pp. 271–280 (in Russian).
- 12. Torgomyan G. M., Currents of Lake Sevan, *Izvestiya Akademii nauk Armyanskoi SSR*, Seriya tekhnicheskikh nauk, 1975, Vol. 28, No. 3, pp. 45–50 (in Russian).
- 13. Fedorov K. N., Ginsburg A. I., *The Near-surface Layer of the Ocean*, Utrecht, Netherlands: VSP, 1992, 259 p.
- Ekologiya ozera Sevan v period povysheniya ego urovnya. Rezul'taty issledovanii Rossiisko-Armyanskoi biologicheskoi expeditsii po gidroekologicheskomu obsledovaniyu ozera Sevan (Armeniya) (2005–2009) (Ecology of Lake Sevan during the period of water level rise. The results of Russian-Armenian biological expedition for hydroecological survey of Lake Sevan (Armenia) (2005–2009), Makhachkala: Nauka Publishers, Dagestan Scientific Center, 2010, 348 p. (in Russian).
- 15. Babayan A., Hakobyan S., Jenderedjian K., Muradyan S., Voskanov M., *Lake Sevan: Experience and Lessons Learned Brief*, 2005, pp. 347–362, https://iwlearn.net/resolveuid/6af5017fa3a56bc7b8428f71c100362e.
- 16. Dokken S. T., Wahl T., Observations of spiral eddies along the Norwegian Coast in ERS SAR images, FFI Rapport 96/01463, 1996.
- 17. Fedorov K. N., Ginsburg A. I., "Mushroom-like" currents (vortex dipoles) in the ocean and in a laboratory tank, *Annales Geophysicae*, 1986, Vol. 4B, No. 5, pp. 507–516.
- Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Manifestation specifics of hydrodynamic processes in satellite images of intense phytoplankton bloom areas, *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, Vol. 52, No. 9, pp. 974–987.
- 19. Medvedev A., Telnova N., Alekseenko N. et al., UAV-derived data application for environmental monitoring of the coastal area of Lake Sevan, Armenia with a changing water level, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Article 3821, DOI: 103390/rs12223821.
- 20. Nazaretyan H., The Ups and Downs of Lake Sevan, *EVN Report*, July 26, 2021, https://evnreport.com/ magazine-issues/the-ups-and-downs-of-lake-sevan/.
- Wilkinson I. P., Lake Sevan: Evolution, Biotic Variability and Ecological Degradation, In: *Large Asian Lakes in a Changing World*, S. Mischke (ed.), Springer Water Book Ser., Cham: Springer, 2020, Ch. 2, pp. 35–63, https://doi.org/10.1007/978-3-030-42254-7_2.