

## Горизонтальная циркуляция вод и морфометрические параметры озера Севан в современный период (спутниковая информация)

А. И. Гинзбург<sup>1</sup>, А. Г. Костяной<sup>1,3</sup>, Н. А. Шеремет<sup>1</sup>, А. В. Кураев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия  
E-mails: ginzburg@ocean.ru, kostianoy@gmail.com, sheremet@ocean.ru

<sup>2</sup> Лаборатория спутниковых геофизических и океанографических исследований,  
Университет Тулузы, Тулуза, 31000, Франция  
E-mail: kouraev@legos.obs-mip.fr

<sup>3</sup> Московский университет имени С. Ю. Витте, Москва, 115432, Россия

Необходимость контроля экологического состояния современного эвтрофированного (в результате планового искусственного снижения уровня) оз. Севан определяет актуальность изучения процессов горизонтального водообмена в этом замкнутом водоёме. В настоящей работе исследование горизонтальной циркуляции озера выполнено на основе анализа оптических изображений MSI (*англ.* Multispectral Instrument) Sentinel-2A с высоким пространственно-временным разрешением (20 м, 5–10 сут), относящихся к летне-осеннему периоду 2020–2022 гг. Продemonстрирована интенсивная вихревая динамика во всём бассейне Большого Севана с размерами вихрей примерно от 3 до 20 км, заметно меняющаяся на временных масштабах в пять дней. При этом квазистационарным элементом циркуляции выступает циклонический вихрь с меняющимся положением центра (в пределах примерно 4 км в меридиональном направлении и 7 км в зональном) и размером (от 9–10 до 20 км), который образует вихревые диполи и триполи с элементами антициклонической завихренности. Подобные вихревые структуры с квазистационарным циклоном характерны и для Малого Севана. Проведено сопоставление морфометрических параметров оз. Севан (уровня, площади зеркала, приращения объёма относительно опорного значения для 07.07.1995), содержащихся в онлайн-базе данных HydroWeb LEGOS (*англ.* Laboratory of Space Geophysical and Oceanographic Studies), Франция, и основанных на спутниковых альтиметрических измерениях уровня, с соответствующими опубликованными значениями по данным гидропостов Армении. Показано, что при качественном соответствии характера изменения уровня озера по альтиметрическим и инструментальным измерениям значения в базе HydroWeb превышают данные гидропостов в большинстве случаев на 1–1,5 м в 1995–2012 гг. и 0,5–0,6 м в 2013–2022 гг., тогда как соответствующие значения объёма по данным HydroWeb оказываются заниженными.

**Ключевые слова:** озеро Севан, морфометрические параметры озера Севан, циркуляция вод озера Севан, цветение вод, вихри, вихревые диполи, спутниковые данные, оптические изображения

Одобрена к печати: 19.05.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-230-243

### Введение

Пресноводное оз. Севан — одно из крупнейших высокогорных озёр мира, расположенное на территории Армении на высоте более 1900 м н. у. м (над уровнем моря) и имеющее огромное значение для рыболовства, сельского хозяйства, туризма и промышленности республики, а также как источник чистой пресной воды. Озеро состоит из двух частей — Малого и Большого Севана, разделённых семикилометровым проливом с подводным порогом между мысами Норатусским (на западе) и Артанишским (на востоке) (см. *рис. 1а*). В озеро впадает 28 рек (24 из них — в Большой Севан); одна р. Раздан, приток Аракса, вытекает из Малого Севана. Малый и Большой Севан существенно различаются по своим морфометрическим параметрам. До 1933 г. (года начала искусственного снижения уровня воды в Севане) площадь зеркала Малого и Большого Севана составляла 383,6 и 1032,4 км<sup>2</sup> соответственно, объём — 19,52 и 38,95 км<sup>3</sup>, максимальная глубина — 98,7 и 58,7 м, средняя глубина — 50,9 и 37,7 м;

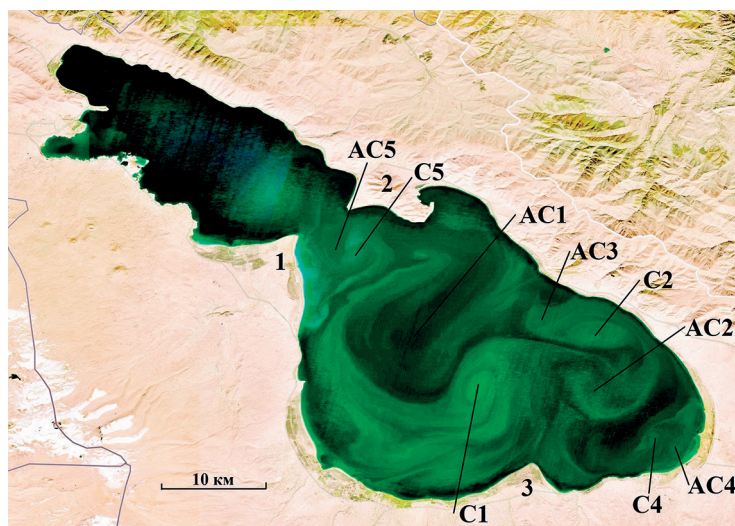
нулевая отметка озера в среднем находилась на высоте 1916,2 м в Балтийской системе высот (БС); максимальная длина озера равнялась 75 км, ширина — 37 км (Интегральная..., 2011; Румянцев и др., 2012; Wilkinson, 2020).

С 1930-х гг. началось искусственное снижение уровня Севана. В соответствии с решением руководства СССР в 1931 г. по снижению уровня Севана на 50 м (и фактически уничтожению Большого Севана с использованием его осушенного дна под посеvy) для сокращения поверхности озера и, соответственно, уменьшения расходной части его водного баланса (испарения с поверхности, примерно равного его основной приходной части — стоку впадающих рек и атмосферным осадкам) в пользу увеличения стока р. Раздан было осуществлено углубление русла этой реки и создан Севано-Разданский энергетический комплекс (Интегральная..., 2011; Румянцев и др., 2012; Wilkinson, 2020). В результате интенсивного использования вод озера для нужд ирригации и энергетики его уровень начал снижаться, особенно интенсивно — с 1949 по 1964 г. (со скоростью до 1 м/год). Некоторый подъём уровня произошёл после введения в эксплуатацию в 1981 г. тоннеля Арпа—Севан, через который вода р. Арпы начала поступать в озеро. Минимальный уровень оз. Севан (1896,32 м БС, примерно на 20 м ниже естественного) был зарегистрирован в конце 2001 г. (Интегральная..., 2011), после чего в результате рационального водопользования он начал повышаться со скоростью 25–45 см/год (Румянцев и др., 2012). Однако резкое повышение уровня озера привело к затоплению берегов и застроек прибрежной зоны, поэтому в 2011 г. было решено временно ограничить его дальнейший рост. Десятилетие 2010-х гг. — годы относительно малого изменения уровня Севана (Medvedev et al., 2020). К началу 2021 г. уровень озера достиг 1900,52 м БС (Почему..., 2022).

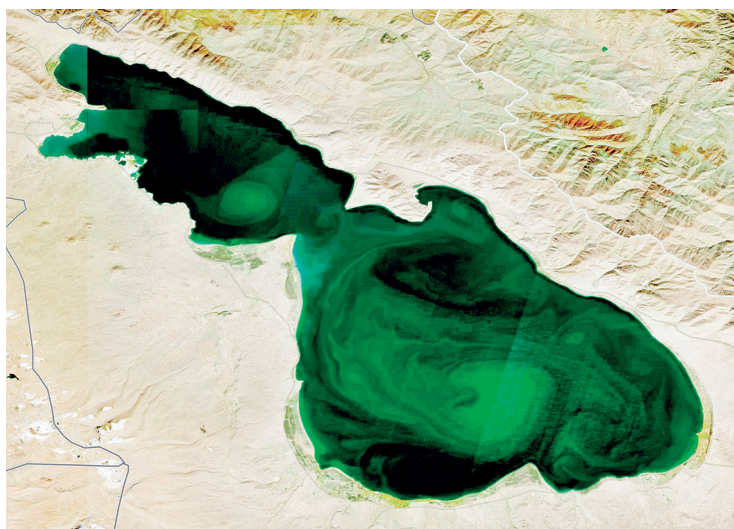
Резкое падение уровня и последующее его повышение, сопровождающееся загрязнением с затопленных берегов и поступлением неочищенных сточных вод, привели к существенным изменениям физических, термических, биохимических характеристик и экосистемы озера (Интегральная..., 2011; Румянцев и др., 2012; Medvedev et al., 2020). Начиная с 1964 г. здесь наблюдается цветение сине-зелёных водорослей, особенно интенсивное с 2018 г. (Почему..., 2022; Nazaretyan, 2021; см. также <https://rus.azatutyun.am/a/31950496.html>). В условиях эвтрофикации оз. Севан весьма актуальным становится исследование циркуляции его вод.

Ещё при изучении термического режима озера в 1926–1930 гг. было установлено существование в центральной части Большого Севана в летне-осеннее время купола холодных вод, связанного с подъёмом глубинных вод в поверхностные слои (см. (Айнбунд, 1969)). На основании экспериментально установленного устойчивого существования этого купола в течение 4,5–5 мес даже при сильных ветрах, а также измерения скорости течений с помощью нескольких взвешенных поплавков в верхнем 10-метровом слое в 1958 г. М. М. Айнбундом был сделан вывод о циклонической циркуляции вод в Большом Севане (Айнбунд, 1969). В дальнейшем результаты математического моделирования (например, (Акопян, Демин, 1982; Акопян, Торгомян, 1980)) продемонстрировали наличие двух чётко выраженных циклонических круговоротов — в Малом и Большом Севане, что согласовывалось с натурными наблюдениями (Айнбунд, 1969). К сожалению, за последние 40 лет работы по изучению динамики вод Севана ни гидрографическими, ни спутниковыми методами практически не выполнялись.

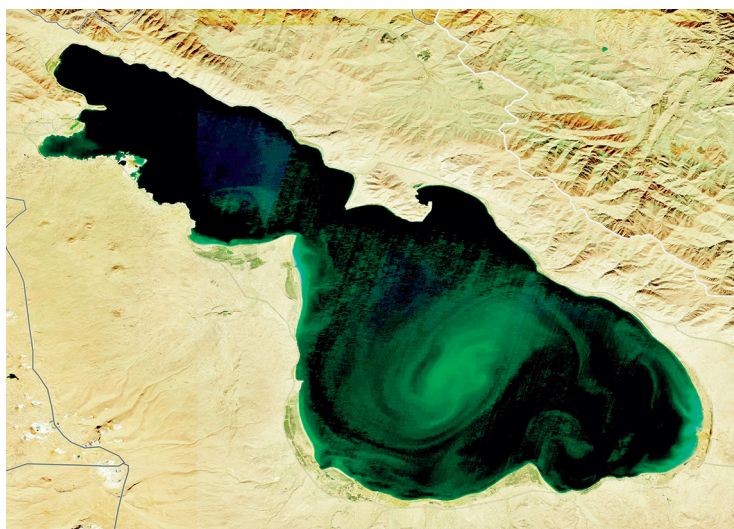
В настоящей работе исследование изменчивости горизонтальной циркуляции поверхностного слоя оз. Севан выполнено на основе анализа оптических спутниковых изображений с высоким пространственным разрешением за 2020–2022 гг. Кроме того, проведена проверка возможности использования временных последовательностей морфометрических параметров озера, имеющих в онлайн-базе данных HydroWeb, разработанной и поддерживаемой в Лаборатории спутниковых геофизических и океанографических исследований LEGOS (англ. Laboratory of Space Geophysical and Oceanographic Studies), Франция (Cretaux et al., 2011, 2017), для слежения за ходом изменения этих параметров в современный период.



*a*



*б*



*в*

Рис. 1. Последовательность изображений MSI Sentinel-2A в октябре 2020 г.: *a* — 13.10.2020; *б* — 18.10.2020; *в* — 23.10.2020. 1 — Норатусский м., 2 — Артанишский п-ов, 3 — м. Цовинар, АС — антициклон, С — циклон

## Данные

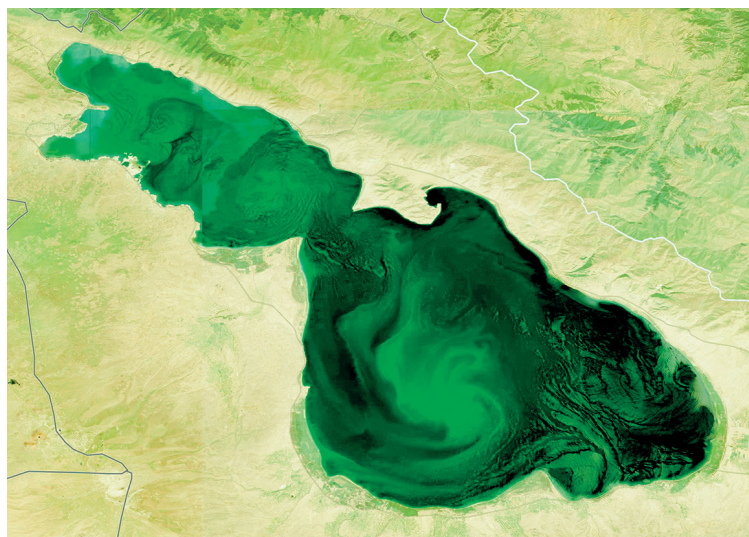
Для изучения горизонтальной циркуляции вод в поверхностном слое оз. Севан в настоящем исследовании выполнен анализ доступных через интернет оптических спутниковых изображений высокого разрешения (20 м) MSI (*англ.* Multispectral Instrument) Sentinel-2A (NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства — НАСА) Worldview, <https://worldview.earth-data.nasa.gov>) за три года (2020–2022) с периодичностью в основном пять дней. Для анализа использованы немногочисленные информативные изображения, полученные в безоблачные дни. Координаты спутниковых изображений на *рис. 1–3* (см. с. 232–234) — 40,1181–40,6677° с. ш., 44,9146–45,6839° в. д.



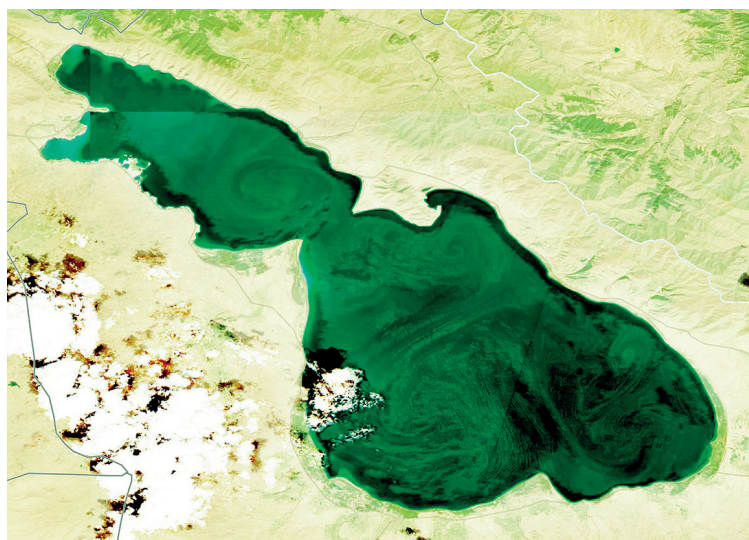
*Рис. 2.* Изображение MSI Sentinel-2A от 22.11.2021

В онлайн-базе данных HydroWeb для оз. Севан ([https://hydroweb.theia-land.fr/hydroweb/view/L\\_sevan?lang=fr](https://hydroweb.theia-land.fr/hydroweb/view/L_sevan?lang=fr)) содержатся временные серии среднемесячных (графическое представление) и оцифрованных внутримесячных значений уровня (с 18.06.1995), основанных на спутниковых альтиметрических измерениях, а также площади (с 07.07.1995) и приращений объёма (с 07.07.1995 относительно некоего опорного значения для этой даты) по 29.01.2023. Количество измеренных значений уровня озера в год в базе данных различно в разные периоды времени: с 1995 по 2019 г. — от 6 до 14, а с 2020 г. и далее — 44–52 значения. Рассчитанные значения площади зеркала и приращений объёма представлены с большими пропусками в 1995–1999 гг., отсутствуют с 5 апреля до конца 2020 г., с начала 2021 г. до 5 марта и с 4 по 21 июня 2021 г.

Для понимания возможности использования этой базы данных спутниковой альтиметрии не только для качественного анализа характера изменения морфометрических параметров озера со временем, но и их количественной оценки, необходимо сравнить данные базы с регулярно измеряемыми положениями уровня на гидропостах оз. Севан и время от времени публикуемыми в доступных через интернет источниках. Так, сведения об уровне озера в начале и конце ряда лет с 1991 по 2011 г. содержатся в работе (Интегральная..., 2011), с 2012 по 2021 г. — в статье (Почему..., 2022); среднемесячные значения в период с апреля 2018 по июль 2019 г. имеются в публикации (Medvedev et al., 2020). Кроме того, значения уровня, площади и объёма для отдельных лет даны в разных источниках. Эти доступные из литературы сведения использованы нами для вывода о соответствии морфометрических параметров оз. Севан в онлайн-базе HydroWeb опубликованным данным, основанным на инструментальных измерениях уровня на гидропостах Армении для 1995–2022 гг.



*а*



*б*

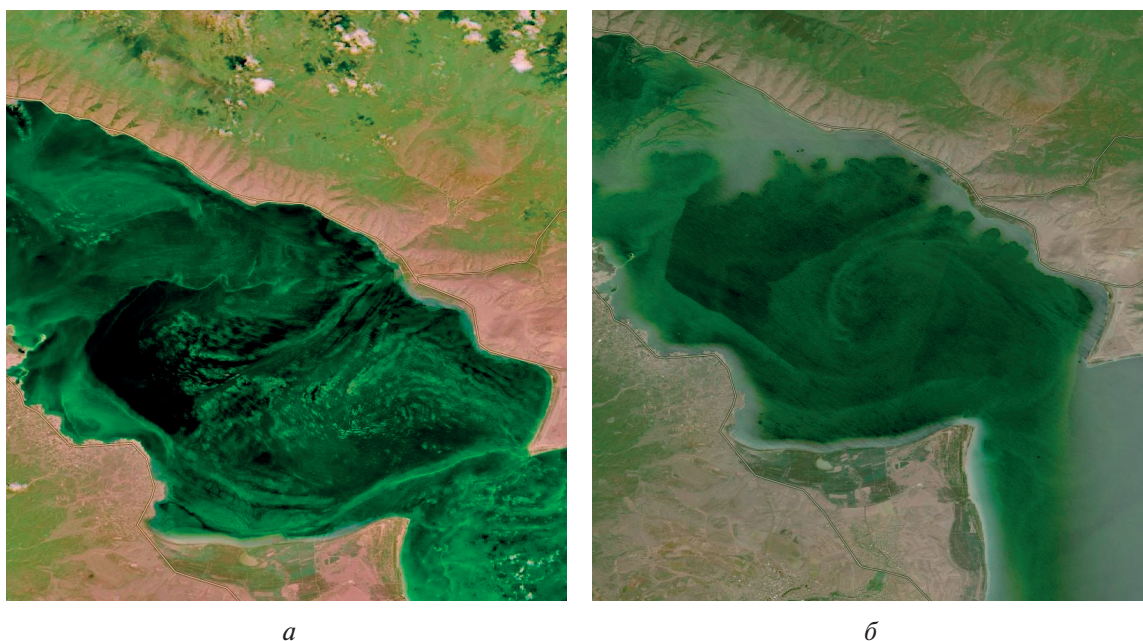


*в*

Рис. 3. Последовательность изображений MSI Sentinel-2A в августе – начале сентября 2022 г.:  
*а* — 14.08.2022; *б* — 29.08.2022; *в* — 03.09.2022

## Анализ спутниковых изображений озера Севан

Представленные на *рис. 1–4* спутниковые изображения демонстрируют интенсивную вихревую динамику в Большом и Малом Севане. На *рис. 1а* в Большом Севане чётко проявляются: циклонический вихрь С1 с размером примерно 9,5 км; вихревой диполь АС2–С2 (размер вихрей — около 7 км) и небольшой антициклон АС3 (~3 км) западнее С2, образующий с ним вихревую пару; диполь АС4–С4 в мелководной юго-восточной части бассейна (вихри размером ~3 км); диполь АС5–С5 южнее пролива (вихри ~3 км). Очевидно, что диполи АС2–С2 и С1–АС2 образуют компактную упаковку с общим антициклоном АС2. Можно также предполагать наличие антициклона АС1 к западу от С1 (судя по наличию сдвиговых циклонических элементов неустойчивости на его периферии) и небольшого циклонического вихря в Артанишском зал. В Малом Севане видна область с повышенным содержанием хлорофилла (предположительно — циклонический вихрь).



*Рис. 4.* Фрагменты изображений MSI Sentinel-2A: *а* — 10.07.2022; *б* — 15.07.2022

Через пять дней (см. *рис. 1б*) в Малом Севане уже отчётливо проявляется циклонический вихрь с диаметром примерно 8 км (возможно, это часть более сложной вихревой структуры). Большую часть Большого Севана занимает зонально ориентированный вихревой диполь из циклона (по-видимому, это увеличившийся до примерно 16 км С1) и антициклона к северу от него (~13 км). Вихри и вихревые диполи меньшего размера наблюдаются в юго-восточной части бассейна. Хорошо проявляются циклонический вихрь (~4 км) в Артанишском зал. и небольшой циклон (~3 км) в проливе у Артанишского м. Возможно также, что между циклонической частью диполя и южным побережьем бассейна к западу от м. Цовинар находится антициклонический вихрь.

Ещё через пять дней (см. *рис. 1в*) вихревой диполь в центральной части Большого Севана, по-видимому, развернулся примерно на 45° против часовой стрелки. Очертания дипольной структуры в юго-восточной части сохраняются, и виден небольшой диполь у м. Цовинар. В Малом Севане — циклонический вихрь (около 5 км).

На *рис. 2* можно видеть два вихревых диполя (в западной части Большого Севана и южнее Артанишского зал.) со встречно направленными струями между вихрями противоположного направления вращения (размер вихрей ~8 км), плохо различимые вихревые структуры в восточной части бассейна, диполь южнее пролива (вихри ~3 км) и элемент антициклонической завихренности в Малом Севане.

На *рис. 3а* в западной части Большого Севана различаются трудно интерпретируемая вихревая структура с явно выраженным элементом циклонической завихренности (возможно, диполь), антициклон за м. Цовинар, диполь в юго-восточной части бассейна со струёй южного направления между вихрями пары. В Малом Севане при этом — циклонический вихрь (~6,5 км) и две вихревые структуры (~3 и 4,5 км) в северной части, направление вращения которых определить невозможно.

Через две недели (см. *рис. 3б*) вихревая картина заметно изменилась: в южной части Большого Севана видны два диполя со струями между вихрями пары (вихри от ~9 до 4,5 км), направленными на восток и юго-запад у западной и восточной структур соответственно. Не исключено, что оба этих встречно направленных грибовидных течения являются частями вихревой упаковки, где циклон западной структуры и антициклон восточной образуют диполь с размером вихревой части около 20 км. Хорошо различимы также циклонические вихри у восточного побережья южной части бассейна (4,5 км) и в Артанишском зал. (6 км).

Ещё через 5 дней (см. *рис. 3в*) большая часть бассейна оказывается охваченной движением в большой дипольной структуре, с циклоном и антициклоном размером примерно 20 км каждый и струёй между ними, ориентированной на юг. При этом антициклоническая часть диполя разветвляется в диполь меньшего размера (вихри пары — 3 км). К востоку от циклона находится, по-видимому, ещё один антициклон, и таким образом, движение вод в Большом Севане определяется этой трипольной структурой. В Малом Севане — циклонический вихрь (8 км), возможно с антициклоническими элементами завихренности на юго-восточном (со стороны пролива), западном и северо-западном участках периферии циклона. Дипольные и трипольные вихревые структуры на основе циклонического вихря в Малом Севане, как и вихрь (или диполь) к северу от основной структуры, хорошо видны на *рис. 4*.

### Сопоставление морфометрических параметров озера Севан по данным HydroWeb и измерений на гидропостах

Изменение среднемесячных значений морфометрических параметров оз. Севан по данным HydroWeb в течение примерно 26,5 лет (18.06.1995–29.01.2023) показано на *рис. 5* (см. с. 237). Видно (см. *рис. 5а*), что с 1995 до 2001 г. уровень озера уменьшался (минимум — 1897,56 м БС 15.01.2001), затем рос со скоростью в среднем примерно 40 см/год до 2010 г. (1901,47 м БС 15.08.2010); далее — годы небольшого понижения уровня (2011–2015) и относительной стабилизации (2016–2021). С 2021 г. наблюдается понижение уровня озера примерно на 20 см/год: 27.01.2021 уровень был равен 1901,13 м БС, 23.01.2022 — 1900,91 м БС, 29.01.2023 — 1900,7 м БС. Таким образом, по альтиметрическим данным, к началу 2023 г. уровень оз. Севан оказался на 15,5 м ниже естественного (1916,2 м БС). Тот же характер изменения — у площади зеркала и объёма (см. *рис. 5б и в*).

Характер изменения уровня озера с 1995 до 2020–2021 гг. (см. *рис. 5а*) качественно хорошо согласуется с приведённым в работах (Medvedev et al., 2020; Nazaretyan, 2021) изменением среднегодового уровня в тот же период. Результаты количественного соответствия значений уровня в разные годы по данным HydroWeb и гидропостов представлены в *табл. 1–3*.

Видно, что в 1995–2012 гг. альтиметрические значения уровня превышают таковые по данным гидропостов в большинстве случаев на 1,1–1,5 м. Отчасти это можно объяснить несовпадением дат, для которых проводится сравнение, но даже для одной и той же даты в 1998 г. (см. *табл. 1*) разница значений — 1,13 м. С 2013 по 2022 г. эта разница в основном находится в пределах 0,6 м (см. *табл. 2 и 3*). Сопоставление данных Центра гидрометеорологии и мониторинга Армении (Как менялся..., 2022) для июня и ноября 2022 г. (1900,75 и 1900,37 м БС соответственно) с альтиметрическими данными (1901,23–1901,3 и 1900,73–1900,79 м БС) даёт разницу двух типов данных в пределах 0,55 и 0,42 м соответственно; в мае 2021 г. при самой высокой отметке уровня в 2021–2022 гг., равной 1900,90 м БС, и данных альтиметра 1901,33–1901,4 м БС разница — в пределах 0,5 м. Таким образом, можно полагать, что с 2013 г. альтиметрические данные уровня превышают доступные измеренные значения на гидропостах примерно на 0,5–0,6 м.

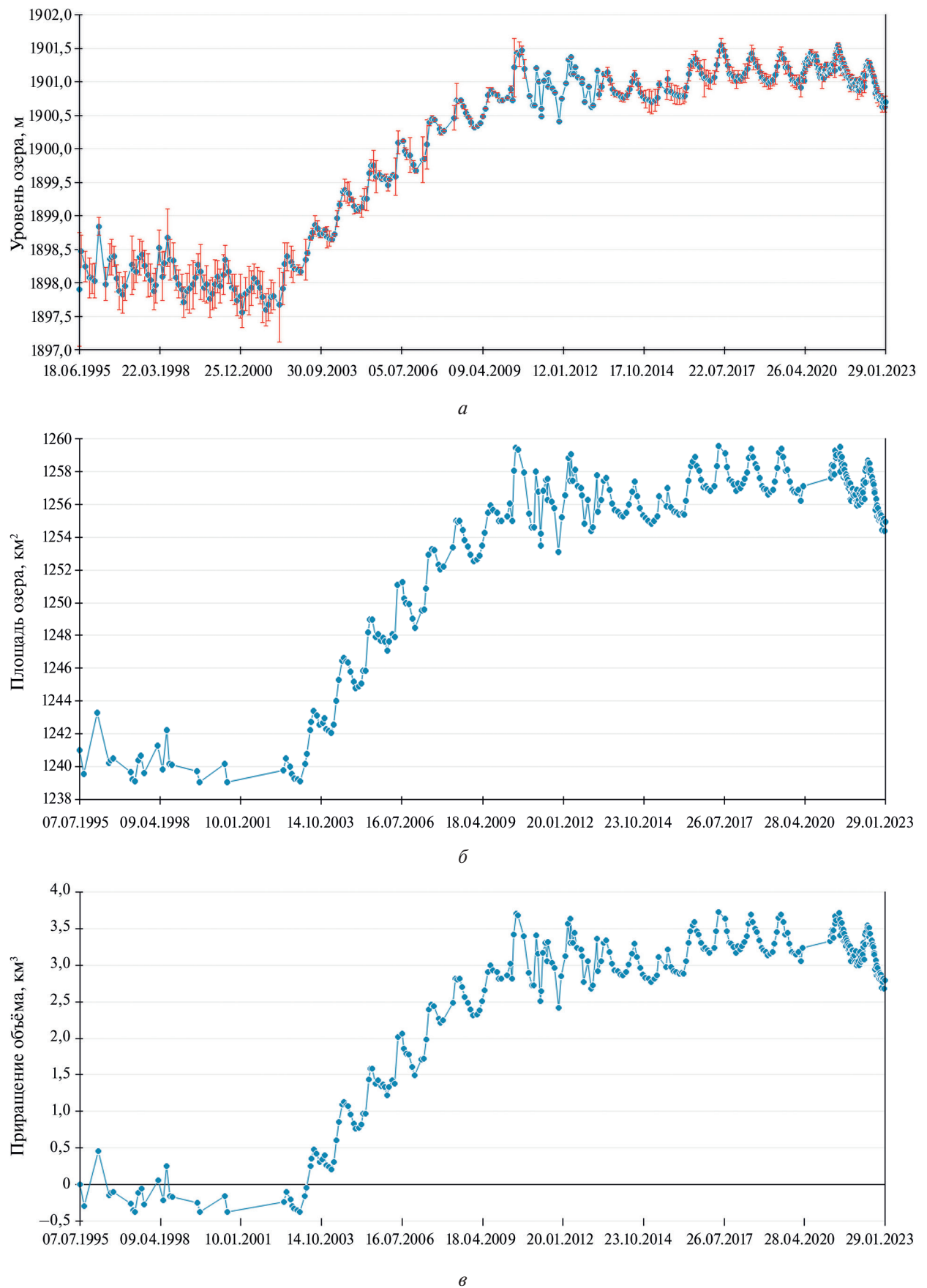


Рис. 5. Временные последовательности среднемесячных значений уровня с 18.06.1995 (а) (красные отрезки — стандартное отклонение), площади с 07.07.1995 (б) и приращения объёма с 07.07.1995 (в) по 29.01.2023 оз. Севан по данным HydroWeb, LEGOS (Франция)

Таблица 1. Уровень оз. Севан на 1 января каждого года по данным работы (Интегральная..., 2011) (1), альтиметра на ближайшую к началу года дату (в скобках) (2) и разница между ними ( $\Delta_{2-1}$ ), м

| Год  | Уровень, м |                      | $\Delta_{2-1}$ , м |
|------|------------|----------------------|--------------------|
|      | 1          | 2                    |                    |
| 1995 | 1896,81    | 1897,90 (18 июня)    | 1,09               |
| 1996 | 1896,75    | 1898,84 (16 февраля) | 2,09               |
| 1997 | 1896,69    | 1897,95 (15 января)  | 1,26               |
| 1998 | 1896,74    | 1897,87 (01 января)  | 1,13               |
| 1999 | 1896,62    | 1897,71 (12 января)  | 1,09               |
| 2000 | 1896,51    | 1897,83 (6 января)   | 1,32               |
| 2001 | 1896,46    | 1897,56 (15 января)  | 1,10               |
| 2002 | 1896,32    | 1897,79 (10 января)  | 1,47               |
| 2003 | 1896,76    | 1898,17 (19 января)  | 1,41               |
| 2004 | 1897,24    | 1898,66 (15 января)  | 1,42               |
| 2005 | 1897,65    | 1899,10 (19 января)  | 1,45               |
| 2006 | 1898,07    | 1899,45 (11 января)  | 1,45               |
| 2007 | 1898,25    | 1899,84 (18 марта)   | 1,59               |
| 2008 | 1898,79    | 1900,46 (16 апреля)  | 1,67               |
| 2009 | 1898,86    | 1900,34 (10 февраля) | 1,48               |
| 2010 | 1899,23    | 1900,76 (17 февраля) | 1,53               |
| 2011 | 1899,905*  | 1900,65 (19 января)  | 0,745              |

\* Оценка, скорректированная Государственным комитетом Республики Армения по геодезии и картографии (см. (Интегральная..., 2011)).

Таблица 2. Уровень оз. Севан (на 1 января каждого года, за исключением конкретных дат) по данным работы (Почему..., 2022) (1), альтиметра на ближайшую к ним дату (в скобках) (2) и разница между ними ( $\Delta_{2-1}$ ), м

| Год/дата   | Уровень, м |                      | $\Delta_{2-1}$ , м |
|------------|------------|----------------------|--------------------|
|            | 1          | 2                    |                    |
| 2012       | 1900,13    | 1900,97 (18 февраля) | 0,84               |
| 2013       | 1900,10    | 1900,62 (03 января)  | 0,52               |
| 2014       | 1900,16    | 1900,77 (07 января)  | 0,61               |
| 2015       | 1900,13    | 1900,69 (25 января)  | 0,56               |
| 2016       | 1900,19    | 1900,78 (13 января)  | 0,59               |
| 2017       | 1900,46    | 1901,03 (01 января)  | 0,57               |
| 2018       | 1900,42    | 1901,08 (14 января)  | 0,66               |
| 2019       | 1900,39    | 1900,98 (28 января)  | 0,59               |
| 2020       | 1900,43    | 1900,99 (14 января)  | 0,56               |
| 2021       | 1900,52    | 1901,14 (03 января)  | 0,62               |
| 20.07.2021 | 1900,75    | 1901,20 (18 июля)    | 0,45               |
| 2022       | 1900,43    | 1900,97 (13 января)  | 0,54               |
| 20.07.2022 | 1900,66    | 1901,18 (21.07.2022) | 0,52               |

Таблица 3. Уровень оз. Севан по данным работы (Medvedev et al., 2020) (1), альтиметра (2) и разница между ними ( $\Delta_{2-1}$ ), м

| Месяц, год/дата | Уровень, м |                      | $\Delta_{2-1}$ , м |
|-----------------|------------|----------------------|--------------------|
|                 | 1          | 2                    |                    |
| Апрель 2018     | 1900,62    | 1901,13 (06.04.2018) | 0,51               |
| Июнь 2018       | 1900,83    | 1901,42 (26.06.2018) | 0,59               |
| Январь 2019     | 1900,37    | 1900,98 (28.01.2019) | 0,61               |
| Июнь 2019       | 1900,81    | 1901,39 (12.06.2019) | 0,58               |
| 01.01.2020      | 1900,43    | 1900,99 (14.01.2020) | 0,56               |
| 11.08.2020      | 1900,73    | 1901,39 (11.08.2020) | 0,66               |

Как отмечалось выше, в данных HydroWeb содержатся не значения объёма вод озера, а его приращения относительно опорного значения на дату 07.07.1995. В доступной через интернет литературе есть значения морфометрических параметров только для 31 декабря 1995 г. (Интегральная..., 2011): уровень — 1896,75 м БС, площадь зеркала — 1238,8 км<sup>2</sup>, объём — 33,20 км<sup>3</sup>. Для даты 26.08.1995 в базе HydroWeb при использовании этого значения объёма в качестве опорного получим следующие значения морфометрических параметров соответственно: уровень — 1898,24 м, площадь зеркала — 1239,54 км<sup>2</sup>, объём (при приращении  $-0,29$  км<sup>3</sup>) — 32,91 км<sup>3</sup>. То есть при более высоком значении уровня по альтиметрическим данным (на  $\sim 1,5$  м) соответствующее значение объёма получается меньшим, чем используемое в качестве опорного (33,20 км<sup>3</sup>), что нереально. В июле 2021 г. при отметке уровня 1900,75 м БС и объёме 38 км<sup>3</sup> (Nazaretyan, 2021) соответствующие значения параметров в базе HydroWeb были в пределах 1901,44–1901,2 м БС (на 0,69–0,45 м выше) и приращения объёма относительно опорного —  $+(3,71-3,41)$  км<sup>3</sup>. Соответствующие значения объёма 36,91–36,61 км<sup>3</sup> оказались на 1,09–1,39 км<sup>3</sup> (т.е. на 2,87–3,66 %) ниже приведённых в работе (Nazaretyan, 2021).

## Обсуждение и выводы

Изучение процессов горизонтального обмена в оз. Севан особенно актуально в современный период в связи с необходимостью контроля над экологическим состоянием этого эвтрофированного бассейна. Организация квазисинхронных инструментальных измерений в масштабе всего озера практически нереальна. Поэтому основными методами исследования представляются моделирование и анализ современной спутниковой информации с высоким пространственно-временным разрешением.

Работы 1980-х гг. по математическому моделированию течений оз. Севан (Акопян, Демин, 1982; Акопян, Торгомян, 1980) (авторам не удалось найти современных работ по данной проблеме) показали наличие чётко выраженных циклонических круговоротов в Малом и Большом Севане. Имелись и некоторые различия в модельных картинах течений в Большом Севане: в работе (Акопян, Торгомян, 1980) здесь, помимо циклонического круговорота в западной части бассейна, отмечался менее интенсивный антициклонический круговорот в его восточной части, тогда как в работе (Акопян, Демин, 1982) в пределах глобального циклонического круговорота видны две циклонические структуры, а антициклонический круговорот в восточной части Большого Севана отсутствует.

Выполненный в настоящей работе анализ спутниковых изображений видимого диапазона MSI Sentinel-2A (пространственное разрешение — 20 м, временное — до 5 сут), относящихся к летне-осеннему периоду (13–23 октября 2020 г., 22 ноября 2021 г., 14 августа–3 сентября 2022 г.), продемонстрировал значительно более интенсивную вихревую динамику в Большом Севане, заметно меняющуюся на временном масштабе в пять дней (см. рис. 1а–в, 3б, в). Вихри, вихревые диполи и упаковки вихревых диполей (грибовидных

течений) (Федоров, Гинзбург, 1988; Fedorov, Ginsburg, 1986) занимают практически весь бассейн. Размеры вихревых структур в бассейне меняются в широком диапазоне — примерно от 3 до 20 км. Циклонический вихрь с размером 3–6 км наблюдается на ряде изображений в Артанишском зал. (см. *рис. 1а, б, 3б*). Циклонический вихрь в глубоководной части Большого Севана (С1 на *рис. 1а*) как составляющая диполей, триполей, вихревых упаковок прослеживается на снимках августа–октября (см. *рис. 1, 3*), с меняющимся размером (от ~9–10 км на *рис. 1а, 3б* до ~20 км на *рис. 3в*), меняющейся пространственной ориентацией и меняющимся положением центра (в пределах примерно 4 км в меридиональном и 7 км в зональном направлениях). Этот циклонический вихрь является, по-видимому, квазистационарным элементом циркуляции Большого Севана. На изображении в конце ноября 2021 г. (см. *рис. 2*) подобный циклонический вихрь либо отсутствует, либо не проявляется из-за слабых контрастов в поле трассера (ослабление цветения водорослей) и разрушения термической стратификации.

Современная спутниковая информация с хорошим пространственным разрешением сделала очевидным интенсивную вихревую динамику в сравнительно небольших замкнутых водоёмах и озёрах (см., например, работы (Гинзбург и др., 2021; Hamze-Ziabari et al., 2022)). Определяющими факторами становятся, по-видимому, ветровое воздействие на поверхность водоёма, стратификация вод и особенности донной топографии/орографии. Глубоководная часть Большого Севана не имеет заметных особенностей донной топографии (см. *рис. 3* в работе (Babayan et al., 2005)). Мыс Цовинар определённо оказывает влияние на циркуляцию вод: поток, распространяющийся в циклоническом направлении вдоль южного побережья, у м. Цовинар отклоняется в глубоководную часть бассейна с образованием циклонического вихря (см. *рис. 1, 3*). За этим мысом иногда формируется антициклонический вихрь (см. *рис. 3а*) или грибовидная структура (см. *рис. 1в*). В 1950-х гг. в летне-осенний период толщина прогретого приповерхностного слоя в значительной части Большого Севана составляла 8 м (Айнбунд, 1961). Район оз. Севан — наиболее ветреный в Армении (Румянцев и др., 2012), средняя скорость ветра здесь весной и осенью составляет 3 м/с (Babayan et al., 2005), при этом преобладающее направление ветров в северной и южной частях — разное (Айнбунд, 1961). Вполне вероятно, что именно воздействие переменных и разнонаправленных ветров на прогретый приповерхностный слой обуславливает столь изменчивую (на временных масштабах в несколько дней) картину течений. То же справедливо и для Малого Севана, квазистационарным элементом которого является циклонический вихрь с меняющимися присоединёнными элементами антициклонической завихренности.

В онлайн-базе данных HydroWeb, LEGOS, Франция содержится информация об уровне, площади зеркала и объёме (или приращении объёма относительно некоего опорного значения) с временным интервалом между величинами морфометрических параметров порядка 1 мес для 310 озёр мира (Cretaux et al., 2011, 2017), в том числе для оз. Севан. Сопоставление данных этой базы с прямыми инструментальными измерениями уровня западного Арала продемонстрировало их хорошее соответствие (различия в разные годы — в пределах 0,25 м) (Гинзбург и др., 2022). Выполненное нами аналогичное сопоставление значений уровня для оз. Севан показало, что альтиметрические измерения превышают данные гидропостов в большинстве случаев более чем на 1 м в 1995–2012 гг. и на 0,5–0,6 м в 2013–2021 гг. Значения объёма вод озера, определённые по приращениям в базе данных HydroWeb при использовании известного из публикации (Интегральная..., 2011) опорного объёма для 1995 г., напротив, оказываются заниженными (при более высоком значении уровня!) относительно опубликованных данных. Исследование причин выявленных несоответствий выходит за рамки настоящей статьи. Однако временные последовательности морфометрических параметров оз. Севан с хорошим временным разрешением (периодичность — не более месяца в последние годы), имеющиеся в онлайн-базе данных HydroWeb, дают важную информацию для слежения за ходом изменения этих параметров в современный период.

А. И. Гинзбург, А. Г. Костяной и Н. А. Шеремет выполнили данное исследование (анализ спутниковых изображений 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». А. В. Кураев занимался анализом данных HydroWeb в рамках проектов CNES TOSCA LAKEDDIES и TRISHNA, CNRS-Russia IRN TTS. Мы благодарим НАСА за возможность использования спутниковых изображений из приложения NASA Worldview Snapshots (<https://wvs.earthdata.nasa.gov>), являющегося частью системы данных и информации системы наблюдения за Землёй (англ. Earth Observing System Data and Information System — EOSDIS).

## Литература

1. Айнбунд М. М. К вопросу о термическом режиме озера Севан // Результаты комплексных исследований по Севанской проблеме. Ереван, 1961. Т. 1: Метеорология и гидрология. С. 323–335.
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. технических наук. 1980. Т. 33. № 1. С. 34–39.
4. Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А., Соловьев Д. М. Вихри в западном бассейне Большого Аральского моря (спутниковая информация) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 236–246. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-236-246>.
5. Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А., Ижицкий А. С., Соловьев Д. М. Динамика высыхания западного бассейна Большого Аральского моря по спутниковым данным (2002–2021) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 246–263. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-5-246-263>.
6. Интегральная оценка экологического состояния озера Севан (GEO – Lake Sevan) / Ассоциация «За УЧР»/UNEPCom. Ереван, 2011. 42 с. [https://gridarendal-website-live.s3.amazonaws.com/production/documents/s\\_document/92/original/sevan-report---fin.pdf?1483646517](https://gridarendal-website-live.s3.amazonaws.com/production/documents/s_document/92/original/sevan-report---fin.pdf?1483646517).
7. Как менялся уровень озера Севан за последние два года // SPUTNIK Армения. 8 нояб. 2022 г. <https://ru.armeniasputnik.am/20221108/kak-menyalsya-uroven-ozera-sevan-za-poslednie-dva-goda-51011551.html>.
8. Почему «цветет» Севан и как с этим бороться — Минокружающей среды пояснило // SPUTNIK Армения. 31 июля 2022 г. <https://ru.armeniasputnik.am/20220730/pochemu-tsvetet-sevan-i-kak-s-etim-borotsya--minokruzhayuschey-sredy-poyasnilo-45912598.html>.
9. Румянцев В. А., Дробкова В. Г., Измайлова А. Г. Озеро Севан // Великие озера мира. СПб.: Лема, 2012. С. 271–280.
10. Федоров К. Н., Гинзбург А. И. Приповерхностный слой океана. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 304 с.
11. 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>.
12. Cretaux J.-F., Arsen A., Calmant S., Kouraev A., Vuglinski V., Berge-Nguyen M., Gennaro M.-C., Nino F., Abarca Del Rio R., Cazenave A., Maisongrande P. SOLS: A lake database to monitor in the near real time water level and storage variations from remote sensing data // Advances in Space Research. 2011. V. 47. Iss. 9. P. 1497–1507.
13. Cretaux J.-F., Nielsen K., Frappart F., Papa F., Calmant S., Benveniste J. Hydrological applications of satellite altimetry: rivers, lakes, man-made reservoirs, inundated areas // Satellite altimetry over oceans and land surfaces. CRC Press, 2017. P. 459–504. <https://doi.org/10.1201/9781315151779-14>.
14. Fedorov K. N., Ginsburg A. I. “Mushroom-like” currents (vortex dipoles) in the ocean and in a laboratory tank // Annales Geophysicae. 1986. V. 4(B). P. 507–516.
15. Hamze-Ziabari M., Foroughan M., Lemmin U., Barry D. A. Monitoring mesoscale to submesoscale processes in large lakes with Sentinel-1 SAR imagery: the case of Lake Geneva // Remote Sensing. 2022. V. 14. Art. No. 4967. <https://doi.org/10.3390/rs14194967>.
16. Medvedev A., Telnova N., Alekseenko N., Koshkarev A., Kuznetchenko P., Asmaryan S., Narykov A. 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. Art. No. 3821. <https://doi.org/10.3390/rs12223821>.
17. 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/>.
18. Wilkinson I. P. Chapter 2. Lake Sevan: Evolution, Biotic Variability and Ecological Degradation // Large Asian Lakes in a Changing World / ed. S. Mischke. Ser. Springer Water. Cham: Springer, 2020. P. 35–63. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-42254-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-42254-7_2).

## Horizontal water circulation and morphometric parameters of Lake Sevan in the modern period (satellite information)

A. I. Ginzburg<sup>1</sup>, A. G. Kostianoy<sup>1,3</sup>, N. A. Sheremet<sup>1</sup>, A. V. Kouraev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia  
E-mails: ginzburg@ocean.ru, kostianoy@gmail.com, sheremet@ocean.ru

<sup>2</sup> LEGOS, Université de Toulouse, Toulouse 31000, France  
E-mail: kouraev@legos.obs-mip.fr

<sup>3</sup> Moscow Witte University, Moscow 115432, Russia

The need to control the ecological state of the modern eutrophicated (as a result of a planned artificial level decrease) Lake Sevan determines the relevance of studying the processes of horizontal water exchange in this closed reservoir. In this paper, the study of the horizontal circulation of the lake was carried out based on the analysis of optical images of Sentinel-2A MSI with a high spatiotemporal resolution (20 m, 5–10 days) related to the summer–autumn period of 2020–2022. Intensive eddy dynamics was demonstrated throughout the Major Sevan basin with eddy sizes from about 3 to 20 km, which noticeably changes on time scales of 5 days. In this case, a quasi-stationary circulation element is a cyclonic eddy with a changing position of the center (within about 4 km in the meridional and 7 km in the zonal directions) and size (from 9–10 to 20 km), which forms eddy dipoles and tripoles with elements of anticyclonic vorticity. Similar eddy structures with a quasi-stationary cyclone are also characteristic of Minor Sevan. A comparison was made of the morphometric parameters of Lake Sevan (level, surface area, volume increments relative to the reference value for 07.07.1995), contained in the online database HydroWeb LEGOS, France, and based on satellite altimetry measurements of the level, with the corresponding published values according to the data of gauging stations in Armenia. It is shown that, with a qualitative correspondence between the nature of changes in the lake level according to altimetry and instrumental measurements, the values in the HydroWeb database exceed in most cases the data of gauging stations by 1–1.5 m in 1995–2012 and 0.5–0.6 m in 2013–2022, while the corresponding volume values according to HydroWeb data turn out to be underestimated.

**Keywords:** Lake Sevan, morphometric parameters of Lake Sevan, water circulation of Lake Sevan, water bloom, eddies, eddy dipoles, satellite data, optical images

Accepted: 19.05.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-230-243

## References

1. Ainbund M. M., On the issue of the thermal regime of Lake Sevan, In: *Rezultaty kompleksnykh issledovaniy po Sevanskoj probleme* (Results of comprehensive research on the Sevan problem), Yerevan, 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, *Proc. Academy of Sciences of the Armenian SSR, Ser. technical sciences*, 1980, Vol. 33, No. 1, pp. 34–39 (in Russian).
4. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A., Soloviev D. M., Vortices in the Western Large Aral Sea (satellite information), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 236–246 (in Russian), <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-236-246>.
5. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A., Izhitskiy A. S., Soloviev D. M., The drying dynamics of the Western Large Aral Sea from satellite data (2002–2021), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 5, pp. 246–263 (in Russian), <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-5-246-263>.
6. *Integral'naya otsenka ekologicheskogo sostoyaniya ozera Sevan (GEO – Lake Sevan)* (Integrated assessment of the ecological state of Lake Sevan (GEO – 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](https://gridarendal-website-live.s3.amazonaws.com/production/documents/s_document/92/original/sevan-report---fin.pdf?1483646517).

7. How the level of Lake Sevan has changed over the past two years, *SPUTNIK Armenia*, 8 Nov. 2022 (in Russian), <https://ru.armeniasputnik.am/20221108/kak-menyalsya-uroven-ozera-sevan-za-poslednie-dva-goda-51011551.html>.
8. 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>.
9. Rumyantsev V.A., Drabkova V.G., Izmailova A.G., Lake Sevan, In: *Velikiye ozera mira* (Great Lakes of the World), Saint Petersburg: Lema, 2012, pp. 271–280 (in Russian).
10. Fedorov K. N., Ginsburg A. I., *The Near-surface Layer of the Ocean*, Utrecht, The Netherlands: VSP, 1992, 259 p.
11. 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>.
12. Cretaux J.-F., Arsen A., Calmant S., Kouraev A., Vuglinski V., Berge-Nguyen M., Gennero M.-C., Nino F., Abarca Del Rio R., Cazenave A., Maisongrande P., SOLS: A lake database to monitor in the near real time water level and storage variations from remote sensing data, *Advances in Space Research*, 2011, Vol. 47, Issue 9, pp. 1497–1507, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.01.004>.
13. Cretaux J.-F., Nielsen K., Frappart F., Papa F., Calmant S., Benveniste J., Hydrological applications of satellite altimetry: rivers, lakes, man-made reservoirs, inundated areas, In: *Satellite altimetry over oceans and land surfaces*, CRC Press, 2017, pp. 459–504, <https://doi.org/10.1201/9781315151779-14>.
14. Fedorov K. N., Ginsburg A. I., “Mushroom-like” currents (vortex dipoles) in the ocean and in a laboratory tank, *Annales Geophysicae*, 1986, Vol. 4(B), pp. 507–516.
15. Hamze-Ziabari M., Foroughan M., Lemmin U., Barry D.A., Monitoring mesoscale to submesoscale processes in large lakes with Sentinel-1 SAR imagery: the case of Lake Geneva, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, Art. No. 4967, <https://doi.org/10.3390/rs14194967>.
16. Medvedev A., Telnova N., Alekseenko N., Koshkarev A., Kuznetchenko P., Asmaryan S., Narykov A., 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, Art. No. 3821, <https://doi.org/10.3390/rs12223821>.
17. 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/>.
18. Wilkinson I. P., Chapter 2, Lake Sevan: Evolution, Biotic Variability and Ecological Degradation, In: *Large Asian Lakes in a Changing World: Natural State and Human Impact*, S. Mischke (ed), Ser. Springer Water, Cham: Springer, 2020, pp. 35–63, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-42254-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-42254-7_2).