

## Вихревая динамика вод озера Севан (спутниковая информация)

*Гинзбург А.И. (1), Костяной А.Г. (1,2), Шеремет Н.А. (1), Кураев А.В. (3)*

(1) Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

*E-mails: [ginzburg@ocean.ru](mailto:ginzburg@ocean.ru), [kostianoy@gmail.com](mailto:kostianoy@gmail.com), [sheremet@ocean.ru](mailto:sheremet@ocean.ru)*

(2) Московский университет им. С.Ю. Витте, Москва, 115432, Россия

(3) LEGOS, Университет Тулузы, CNES/CNRS/IRD/UT3, Тулуза, Франция

Спутниковая информация с высоким пространственно-временным разрешением сделала очевидным факт существования в озерах не только общей циклонической циркуляции в масштабах бассейна, но и интенсивной внутриводоемной вихревой динамики, определяющей горизонтальный и вертикальный обмен в водоеме. Интерес с этой точки зрения представляет озеро Севан – одно из крупнейших высокогорных озер мира.

Пресноводное озеро Севан с максимальными длиной и шириной 75 и 37 км соответственно, состоящее из двух частей – Малого и Большого Севана, разделенных 7-километровым проливом, имеет огромное значение для рыболовства, сельского хозяйства, промышленности и туризма республики Армения. В естественный период (до 1933 г.) площади зеркала Малого и Большого Севана составляли 383,6 и 1032,4 км<sup>2</sup> соответственно, объемы – 19,52 и 38,95 км<sup>3</sup>, максимальные глубины – 98,7 и 58,7 м, уровень озера находился на отметке 1916,2 м в Балтийской системе высот (БС) [1]. В результате планового искусственного снижения уровня озера (1933–2001 гг.), последующего его повышения (2001–2010 гг.) и относительной стабилизации в 2010-х годах уровень озера к началу 2023 г. понизился примерно на 16 м относительно естественного, следствием чего явились изменения его физических, термических, биохимических характеристик и экосистемы [1, 2]. С 2018 г. здесь наблюдается интенсивное цветение сине-зеленых водорослей [2, 3]. Задачи контроля за экологическим состоянием этого эвтрофированного в настоящее время бассейна определяют актуальность изучения процессов горизонтального обмена его вод.

Организация инструментальных квазисинхронных измерений скорости и направления течений в масштабах всего озера практически невозможна, поэтому основными методами исследования его циркуляции являются математическое моделирование и анализ спутниковой информации. Результаты математического моделирования в 1980-х годах [4, 5] свидетельствовали о наличии циклонических круговоротов в Малом и Большом Севане (рис. 1), что подтверждало локальные натурные измерения 1950-х [6]. На *рис. 1а*, помимо циклонического круговорота в западной части Большого Севана, отмечается заметно менее интенсивный антициклонический круговорот в его восточной части, тогда как на *рис. 1б* в южной части Большого Севана в пределах

глобального циклонического круговорота видны две циклонические структуры, а антициклонический круговорот в восточной части отсутствует.

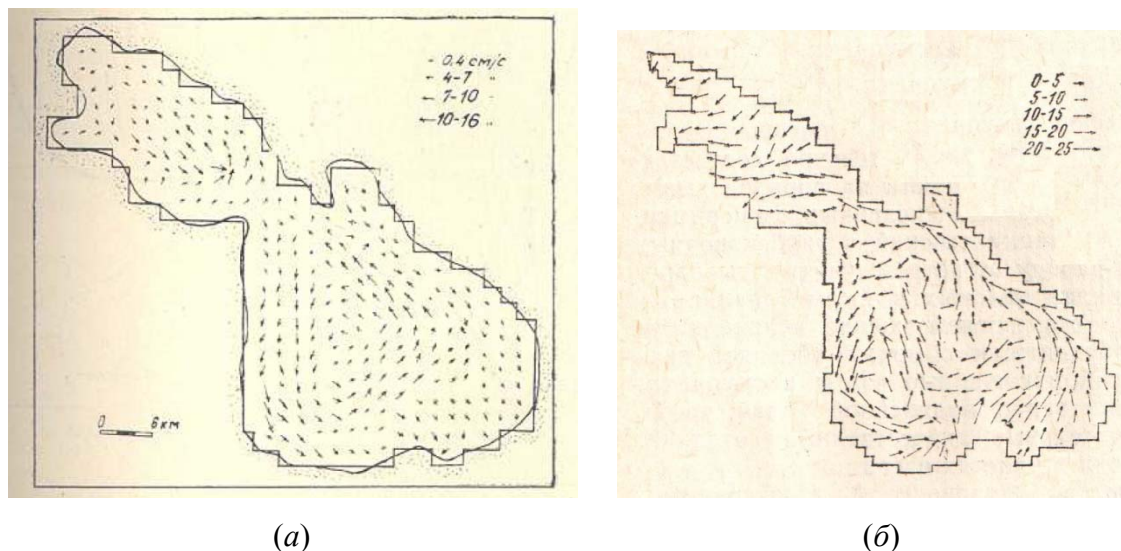


Рис. 1. Течения на поверхности озера Севан, см/с, по результатам математического моделирования в работах [4] (а) и [5] (б)

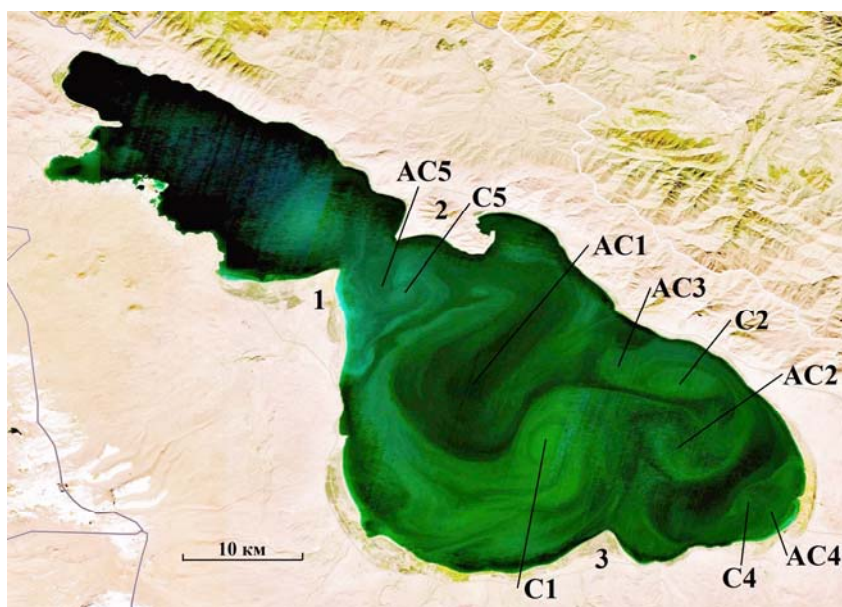
За последние 40 лет работы по исследованию динамики вод Севана, насколько известно авторам, не выполнялись ни гидрографическими, ни спутниковыми методами. Выполненный нами анализ оптических спутниковых изображений MSI Sentinel-2A (пространственное разрешение – 20 м, временное – 5 дней) показал, что во всем бассейне Большого Севана наблюдается существенно более разнообразная и интенсивная вихревая динамика (рис. 2, 3), чем это следует из рис. 1.

На рис. 2а в Большом Севане четко проявляются: циклонический вихрь С1  $\approx 9,5$  км; вихревой диполь АС2–С2 (размер вихрей – около 7 км) и небольшой антициклон АС3 ( $\approx 3$  км) западнее С2, образующий с ним вихревую пару; диполь АС4–С4 в мелководной юго-восточной части бассейна (вихри размером  $\approx 3$  км); диполь АС5–С5 южнее пролива (вихри  $\approx 3$  км). Диполи АС2–С2 и С1–АС2 образуют компактную упаковку с общим антициклоном АС2. Можно предполагать наличие антициклона АС1 к западу от С1 (судя по наличию сдвиговых циклонических элементов неустойчивости на его периферии) и небольшого циклонического вихря в Артанишском заливе. В Малом Севане видна область с повышенным содержанием хлорофилла (предположительно – циклонический вихрь).

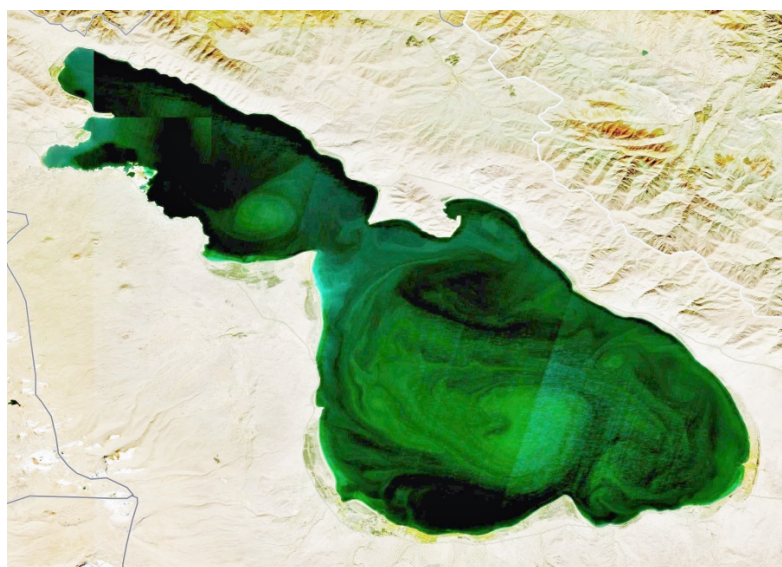
Через пять дней (рис. 2б) в Малом Севане уже отчетливо проявляется циклонический вихрь с диаметром примерно 8 км. Большую часть Большого Севана занимает зонально ориентированный вихревой диполь из циклона (по-видимому, это увеличившийся до примерно 16 км С1) и антициклона к северу от него ( $\approx 13$  км). Вихри и вихревые диполи меньшего размера наблюдаются в юго-восточной части бассейна.

Хорошо проявляется циклонический вихрь ( $\approx 4$  км) в Артанишском заливе и небольшой циклон ( $\approx 3$  км) в проливе у Артанишского мыса. Возможно также, что между циклонической частью диполя и южным побережьем бассейна к западу от мыса Цовинар находится антициклонический вихрь.

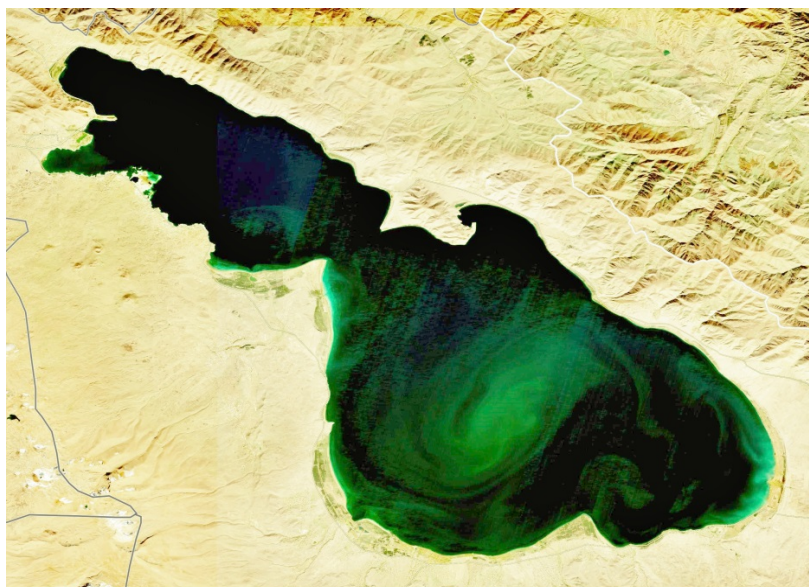
Еще через пять дней (*рис. 2в*) вихревой диполь в центральной части Большого Севана, по-видимому, развернулся примерно на 45 градусов против часовой стрелки. Очертания дипольной структуры в юго-восточной части сохраняются, и виден небольшой диполь у мыса Цовинар. В Малом Севане – циклонический вихрь (около 5 км).



(a)



(б)



(в)

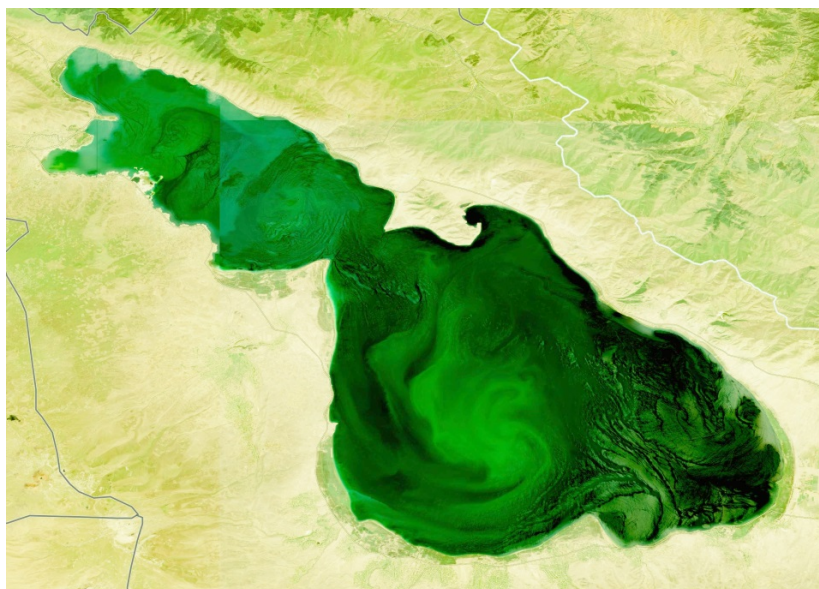
Рис. 2. Последовательность изображений MSI Sentinel-2A в октябре: 13.10.2020 (а), 18.10.2020 (б) и 23.10.2020 (в). На рис. 1а показаны: масштаб изображения, положения мысов/полуострова (1 – Норатусский мыс, 2 – Артанишский полуостров, 3 – мыс Цовинар), обозначения вихревых структур (АС – антициклон, С – циклон)

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

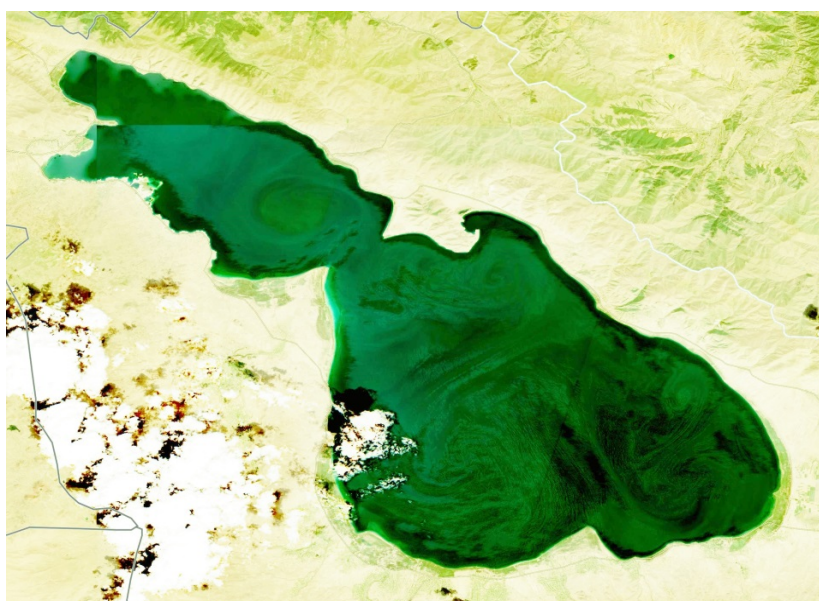
Через две недели (рис. 3б) вихревая картина заметно изменилась: в южной части Большого Севана видны 2 диполя со струями между вихрями пары (вихри от  $\approx 9$  до  $4,5$  км), направленными на восток и юго-запад у западной и восточной структур соответственно. Не исключено, что оба этих встречно направленных 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 заливе (6 км).

Еще через 5 дней (рис. 3в) большая часть бассейна оказывается охваченной движением в большой дипольной структуре, с циклоном и антициклоном размером примерно 20 км каждый и струей между ними, ориентированной на юг. При этом антициклоническая часть диполя разветвляется в диполь меньшего размера (вихри пары –  $\approx 3$  км). К востоку от циклона находится, по-видимому, еще 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 а Малом Севане, как и вихрь (или диполь) к северу от основной структуры, хорошо видны на *рис. 4*.



(a)



(б)



(b)

Рис. 3. Последовательность изображений MSI Sentinel-2A в августе – начале сентября 2022 г.: 14.08.2022 (a), 29.08.2022 (б) и 03.09.2022 (в)



(a)



(б)

Рис. 4. Фрагменты изображений MSI Sentinel-2A: 10.07.2022 (a) и 15.07.2022 (б)

Очевидно, что вихревая картина в Большом Севане заметно меняется на временных масштабах в 5 дней. При этом квазистационарным элементом циркуляции является циклонический вихрь с центром примерно на  $40,2746^\circ$  с.ш.,  $45,4111^\circ$  в.д., меняющим свое положение в пределах примерно 4 км в меридиональном и 7 км в зональном направлениях. Этот вихрь, размер которого на разных изображениях меняется от 9–10 до 20 км, образует вихревые диполи и триполи с присоединенными элементами антициклонической завихренности. Вихревые структуры с квазистационарным циклоном

(размер около 6,5–8 км) и присоединенными элементами антициклонической завихренности характерны и для Малого Севана.

Определяющими факторами интенсивной вихревой динамики в озере Севан являются, по-видимому, как и в других озерах и небольших водоемах [7], ветровое воздействие на поверхность водоема, стратификация вод и особенности донной топографии/орографии. Глубоководная часть Большого Севана не имеет заметных особенностей донной топографии [8]. Судя по отклонению потока, распространяющегося в циклоническом направлении вдоль южного побережья, в глубоководную часть Большого Севана у мыса Цовинар с образованием квазистационарного циклонического вихря, этот мыс оказывает влияние на циркуляцию вод в данном бассейне. Район озера Севан – довольно ветреный (средняя скорость ветра весной и осенью – 3 м/с [8]), при этом преобладающие направления ветров в северной и южной частях – разные [6]. По-видимому, именно воздействие переменных и разнонаправленных ветров на прогретый приповерхностный слой в летне-осенний период обуславливает столь изменчивую (на временных масштабах в несколько дней) картину течений в озере Севан.

А.И. Гинзбург, А.Г. Костяной и Н.А. Шеремет выполнили данное исследование в рамках Госзадания № FMWE-2021-0002, А.В. Кураев - в рамках проектов CNES TOSCA LAKEDDIES и TRISHNA, CNRS IRN TTS.

**Ключевые слова:** озеро Севан, динамика вод озера Севан, цветение вод, вихри, вихревые диполи, спутниковые оптические изображения

### *Литература*

1. 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)
2. 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, 3821. DOI:103390/rs12223821
3. 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-etim-borotsya--minokruzhayuschey-sredy-poyasnilo-45912598.html>
4. Акопян М.А., Торгомян Г.М. Расчет поля скоростей озера Севан методом математического моделирования // Известия Академии наук Армянской ССР. Серия технических наук. 1980. Т. XXXIII. № 1. С. 34–39.
5. Акопян М.А., Демин Ю.Л. Численное моделирование течений озера Севан // Метеорология и гидрология. 1982. № 8. С. 68–74.
6. Айнбунд М.М. К вопросу о термическом режиме озера Севан // В кн. Результаты комплексных исследований по Севанской проблеме. 1961. Т. 1. Ереван. С. 323–335.

7. 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. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-236-246
8. 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>