

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 910.3:556;555

СТРУКТУРА ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕЧЕНИЙ ОЗЕРА СЕВАН В СОВРЕМЕННЫЙ ПЕРИОД¹

© 2023 г. С. А. Поддубный^а, *, Б. К. Габриелян^б, **, А. И. Цветков^а

^аИнститут биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН,
пос. Борок Ярославской обл., 152742 Россия

^бИнститут гидроэкологии и ихтиологии НАН РА,
Ереван, 0014 Армения

*e-mail: spod@ibiw.ru

**e-mail: gabrielb@sci.am

Поступила в редакцию 22.04.2022 г.

После доработки 09.08.2022 г.

Принята к публикации 05.10.2022 г.

Рассмотрены многолетние особенности вертикальной и горизонтальной структуры поля температуры воды в оз. Севан. Показано, что потепление климата привело к повышению температуры эпилимниона в Большом Севане в июле на 2.0–3.0°C. В гипolimнионе увеличение температуры воды не превышало 1.1°C. Осенью (октябрь) эпилимнион потеплел на 1.2°C, тогда как температура гипolimниона в среднем многолетнем плане практически не изменилась. На основе полей температуры рассчитаны плотностные течения в летний и осенний периоды. В пределах всего озера выявлена преобладающая циклоническая циркуляция воды, подтверждаемая распределением хлорофилла по данным спутниковых снимков. В случае сильных горизонтальных градиентов плотности воды скорости течений могут достигать 50 см/с. На автономных буйковых станциях выявлен широкий диапазон колебаний температуры воды, обусловленный внутренними волнами разной природы. Реверсивное вертикальное перемешивание водной толщи внутренними волнами играет важную роль в распределении биогенных элементов и планктона в толще воды. Увеличение уровня воды на ~3 м, в отличие от его снижения к 1981 г. на 18.48 м, не привело к каким-либо существенным изменениям гидрологического режима озера.

Ключевые слова: потепление климата, температура воды, геострофические течения, дистанционное зондирование, внутренние волны.

DOI: 10.31857/S0321059622600272, EDN: NPOZFP

ВВЕДЕНИЕ

Исследование пространственно-временной изменчивости поля температуры в озерах дает физическую основу для понимания особенностей проявления химических и биологических процессов. Температура воды в пресном водоеме определяет вертикальную плотностную структуру водной толщи и, соответственно, ее вертикальную устойчивость, обуславливает формирование различных циркуляционных течений и влияет на дрейфовый перенос воды [2].

Согласно современным представлениям, пространственно-временная изменчивость течений происходит на фоне квазипостоянного циклонического круговорота, существующего во всех крупных озерах, заливах и эстуариях северного полушария. К механизмам формирования циклонической

циркуляции могут быть отнесены: горизонтальная неоднородность поля плотности; неоднородность поля ветра в циклонических образованиях над озерами; неоднородность поля ветра, возникающая за счет вариаций трения о водную поверхность в зависимости от температуры поверхностного слоя воды; отклонение речных вод силой Кориолиса; Лагранжев перенос, обусловленный внутренними волнами Кельвина [14–16, 21, 22].

В начале безледного периода одним из важных начальных факторов формирования течений циклонической направленности выступает фронтальная зона термического бара в литорали. Причем помимо горизонтальной циклонической циркуляции у термического фронта наблюдается зона конвергенции с опусканием воды в придонные слои [1, 11, 23, 27]. Специфический гидрологический режим прибрежной зоны приводит к накоплению в литорали первичных водных масс — воды

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания № 121051100104-6.

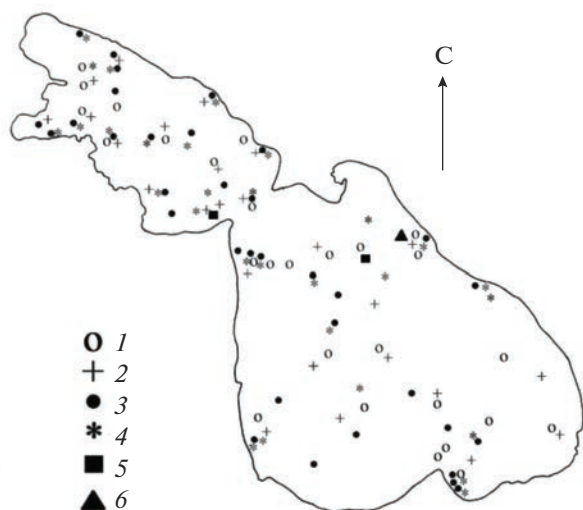


Рис. 1. Станции гидрологических наблюдений на оз. Севан: 1 – в октябре 2006 г.; 2 – в июле 2007 г.; 3, 4 – в июле и октябре 2019 г. соответственно; 5 – АБС в июле–октябре 2018 г.; 6 – АБС в июле и октябре 2019.

притоков озера, сохраняющих индивидуальные черты абиотических характеристик, обуславливает специфику вертикального распределения гидробионтов [17, 19, 26].

Цель настоящей работы – провести анализ многолетних данных по термическому режиму оз. Севан, а также обобщить сведения о динамических процессах в озере. Озеро относится к категории горных димиктических с весенней и осенней гомотермией и устойчивым расслоением водной толщи в летне-осенний период на эпи-, мета- и гипolimнион. Главной особенностью оз. Севан выступает повышение уровня водоема на 3.1 м начиная с 1981 г. после почти 50-летнего искусственного понижения уровня на 18.48 м к 1981 г. [9, 18].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа климатических характеристик (температуры воздуха, скорости и направления ветра) в бассейне оз. Севан использовались среднесуточные данные за период с 1973 по 2019 г. [28].

Температуру, электропроводность воды и содержание растворенного кислорода измеряли в 3-й декаде июля и 1-й декаде октября на стандартных станциях через 1 м глубины с помощью портативного зонда “YSI 85” (2006–2007 гг.) и многопараметрического ручного зонда “YSI ProPlus” (2018–2019 гг.).

На автономных буйковых станциях (АБС) временные изменения температуры воды на горизонтах 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30 и 35 м с дискрет-

ностью 30 мин регистрировались самописцами температуры “HOBO Pendant® Temperature/Light 64K DataLogger-UA-002-64”, “HOBO 64K Pendant® Temperature/Alarm (Waterproof) Data Logger” в 2018–2019 гг. (рис. 1). Скорость и направление течений в районе АБС измеряли поплавками, оснащенными парусом и GPS-регистраторами. Для предварительной оценки особенностей горизонтальной циркуляции вод применялся динамический метод, основанный на расчете плотности воды с учетом ее температуры и электропроводности [6].

Кроме того, для выявления особенностей горизонтальной циркуляции вод использовались космические снимки с последующим анализом распределения мутности или хлорофилла в зависимости от конкретного состояния водной массы озера ([20] раздел “EarthViewer”, режим комбинации пользовательских каналов). Корреляционные зависимости между мутностью, хлорофиллом “а” и каналами сенсора Landsat-8, Sentinel 2A выбирались согласно методике, предложенной О.А. Тихомировым и др. в [12, 13] для водоемов средней полосы Европейской части России. При обильном цветении использовалась методика расчета хлорофилла “а”, а при отсутствии или слабом цветении – определение мутности.

Положение стандартных станций определялось с помощью спутниковых навигаторов “Garmin 76C”, “Garmin 172C” и “GarminGPSmap 62”.

Зоны максимальных и минимальных скоростей течений выделялись статистическим методом [10]. Для определения периодов колебаний во временных рядах температуры воды на отдельных горизонтах АБС использовался спектральный анализ в пакете “STATISTICA 10”.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Термический режим

Известно, что эволюция термической структуры озера определяется обменом тепла с окружающей средой. Факторами, влияющими на процессы аккумуляции и расходования тепла, выступают прямая и рассеянная солнечная радиация, температура воздуха над поверхностью озера, ветровое воздействие, морфометрические особенности водоема [2].

В настоящее время в связи с глобальным потеплением климата в бассейне оз. Севан наблюдается увеличение среднемесячных значений температуры воздуха. Так, анализ средней июльской и октябрьской температуры воздуха на метеостанции “Севан Озеро” выявил ее рост с 1973 по 2019 г. соответственно на 2.4 и 3.4°C. Повышение температуры воздуха способствовало увеличению средней температуры эпи- и гипolimнио-

Таблица 1. Параметры вертикальной термической структуры водной массы Большого Севана за отдельные годы (h – толщина эпилимниона, T_s – температура эпилимниона, $\Delta T_{\max}$ – максимальный градиент температуры в термоклине, $h_{\max}$ – глубина максимального градиента температуры, H – глубина нижней границы термоклина, Δh – толщина термоклина, ΔH – толщина гипolimниона, T_H – температура воды в гипolimнионе; над чертой июльская, под чертой – октябрьская съемки; прочерк – отсутствие данных измерений)

Параметры	Год								
	1974	1981	2006	2007	2008	2009	2013	2018	2019
h , м	$\frac{5}{-}$	$\frac{5}{-}$	$\frac{-}{8}$	$\frac{5}{10}$	$\frac{-}{10}$	$\frac{-}{10}$	$\frac{5}{-}$	$\frac{4}{14}$	$\frac{5}{13}$
T_s , °C	$\frac{17.9}{14.5}$	$\frac{15.2}{-}$	$\frac{-}{14.2}$	$\frac{17.6}{14.2}$	$\frac{-}{13.6}$	$\frac{-}{13.5}$	$\frac{18.0}{-}$	$\frac{21}{15.8}$	$\frac{20.2}{14.8}$
$\Delta T_{\max}$, °C	$\frac{1.2}{-}$	$\frac{1.0}{-}$	$\frac{-}{1.4}$	$\frac{1.2}{1.0}$	$\frac{-}{0.4}$	$\frac{-}{0.4}$	$\frac{1.1}{-}$	$\frac{1.3}{0.6}$	$\frac{3.4}{2.2}$
$h_{\max}$, м	$\frac{7}{-}$	$\frac{8}{-}$	$\frac{-}{10}$	$\frac{7}{13}$	$\frac{-}{15}$	$\frac{-}{15}$	$\frac{8}{-}$	$\frac{9}{20}$	$\frac{6}{14}$
H , м	$\frac{20}{-}$	$\frac{20}{-}$	$\frac{-}{12}$	$\frac{13}{15}$	$\frac{-}{20}$	$\frac{-}{17}$	$\frac{11}{-}$	$\frac{13}{26}$	$\frac{12}{22}$
Δh , м	$\frac{16}{-}$	$\frac{15}{-}$	$\frac{-}{4}$	$\frac{8}{5}$	$\frac{-}{10}$	$\frac{-}{7}$	$\frac{6}{-}$	$\frac{9}{12}$	$\frac{7}{9}$
ΔH , м	$\frac{10}{-}$	$\frac{10}{-}$	$\frac{-}{18}$	$\frac{17}{15}$	$\frac{-}{10}$	$\frac{-}{13}$	$\frac{19}{-}$	$\frac{17}{8}$	$\frac{18}{8}$
T_H , °C	$\frac{6.7}{-}$	$\frac{6.0}{-}$	$\frac{-}{7.4}$	$\frac{5.4}{6.8}$	$\frac{-}{9.0}$	$\frac{-}{9.4}$	$\frac{7.1}{-}$	$\frac{7.8}{8.4}$	$\frac{5.9}{6.7}$

на озера. В центральной части Большого Севана за 45 лет температура эпилимниона в июле увеличилась на 2.0–3.0°C. В гипolimнионе увеличение температуры воды $\leq 1.1^\circ\text{C}$. Осенью (октябрь) эпилимнион потеплел на 0.3–1.3°C, тогда как температура гипolimниона в среднем многолетнем плане практически не изменилась (табл. 1).

В целом вертикальная термическая структура от года к году сохраняла свои особенности. Межгодовые незначительные различия в параметрах термической структуры определялись гидрометеорологическими условиями каждого конкретного года.

На протяжении всего многолетнего периода гидрологических наблюдений в Большом и Малом Севане прослеживалось формирование с мая по октябрь купола холодных вод, характерного для всех крупных озер Северного полушария. Площадь купола в Большом Севане в 2019 г. составляла $\sim 300 \text{ км}^2$, тогда как в Малом Севане – 45–50 км^2 . Близкая по величине площадь купола холодных вод отмечалась и М.Г. Гезалюном [3, 4] в 1974 г. Поднятие купола холодных вод приурочено к центру циклонических круговоротов в двух частях озера и связано с возрастанием относительной циклонической завихренности, вызываемой действием сильных ветров [15].

Структура течений

Крупномасштабные натурные исследования структуры течений в оз. Севан после понижения его уровня проводились Институтом Озероведения АН СССР в 1983–1984 гг. В результате были выявлены следующие особенности циркуляции вод в озере: зафиксирован ограниченный водообмен между двумя частями водоема, временная изменчивость течений типична для глубоких озер мира, циклонические круговороты в озере определяют внутрисезонную изменчивость поля температуры [15].

Дальнейшие исследования структуры горизонтальной циркуляции вод в оз. Севан были продолжены в 2006–2007 и 2019 гг. в рамках совместных Российско-Армянских экспедиций. На основе измеренных полей температуры и электропроводности воды с использованием динамического метода была рассчитана геострофическая циркуляция и вычислены скорости переноса воды на отдельных горизонтах. Результаты показали хорошее соответствие расчетных и натурных параметров течений. На имеющиеся ограничения данного метода в первом приближении он позволил достаточно объективно оценить общие закономерности формирования структуры течений в водоеме. Согласно расчетам, во все периоды наблюдений в озере преобладала циклоническая циркуляция воды. В июле 2007, октябре 2006 и

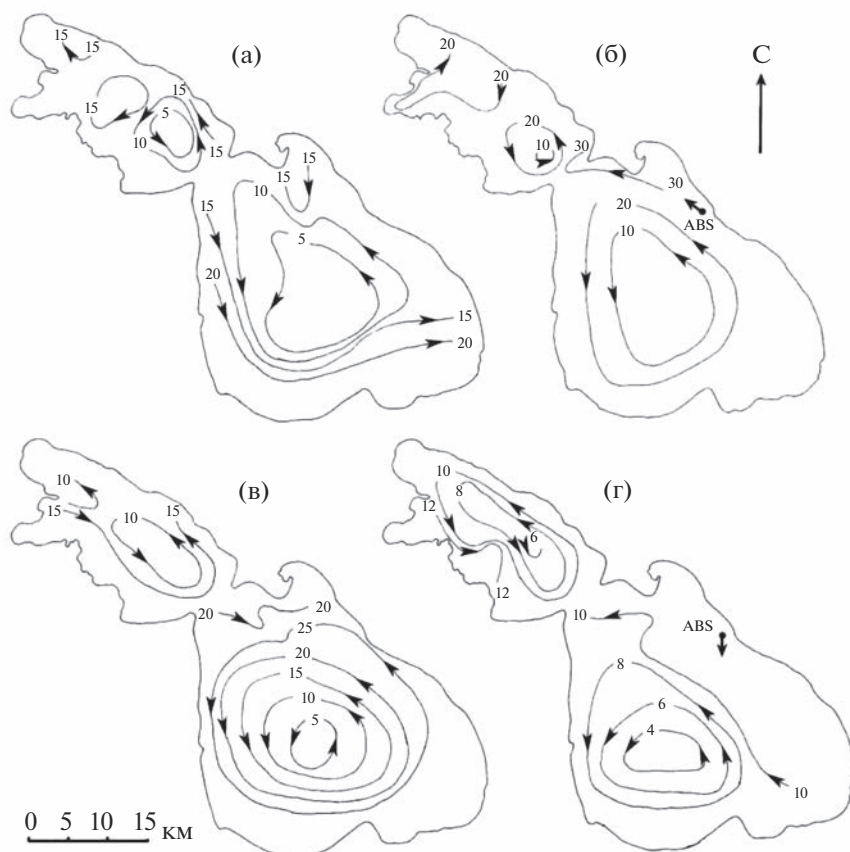


Рис. 2. Динамическая топография (мм) оз. Севан, рассчитанная динамическим методом: а — июль 2007 г.; б — июль 2019 г.; в — октябрь 2006 г.; г — октябрь 2019 г. Стрелками указано направление переноса воды и осредненное по глубине измеренное направление течения на АБС.

июле 2019 гг. в результате формирования максимальных горизонтальных градиентов температуры воды плотностные течения отличались наибольшей интенсивностью. Локальные антициклонические круговороты отмечались в северной части Малого Севана (рис. 2а) и вблизи пролива между частями озера в Большом Севане (рис. 2в). В Большом Севане скорости течения в верхних слоях воды составляли 28–40 см/с, а в Малом Севане >50 см/с. Скорости течений >10 см/с на поверхности встречаются вдоль южного и юго-восточного берегов в Большом Севане и в районе пролива в юго-западной части малого Севана.

На отдельных станциях в зонах наибольших горизонтальных градиентов плотности воды высокие скорости течения сохранялись практически до дна (табл. 2).

В июле 2019 г. на АБС рассчитанная динамическим методом интегральная скорость переноса воды составляла 7.5 см/с и соответствовала измеренной поплавками (5.2 см/с) при общей циклонической направленности течения. В октябре 2019 г. в силу меньших горизонтальных градиентов плотности скорость течений в озере ≤ 21 см/с.

Область циклонического круговорота в Большом Севане была смещена к западному берегу (рис. 2г). Вдоль восточного берега водная масса отличалась вертикальной температурной однородностью, что было вызвано периодическим воздействием сильных ветров северного и западного направлений. Перенос вод в районе АБС в это время обуславливался ветровыми течениями и характеризовался южным направлением (рис. 2г).

Применение в последние десятилетия методов дистанционного зондирования для изучения широкого спектра вопросов, характеризующих экологическое состояние водоемов, позволило сконцентрировать внимание на таких аспектах, как формирование аномалий температуры воды, вихрей и вихревых структур, апвеллинга, цветения воды и пленочных загрязнений [5]. В частности, экологическое состояние озер может быть оценено с использованием таких показателей, как концентрация хлорофилла “а”, содержание взвешенного материала, коэффициент абсорбции растворенного органического вещества и прозрачность воды [25]. Причем водоросли, а именно содержание в них хлорофилла “а”, хорошо идентифици-

Таблица 2. Пределы изменений рассчитанных скоростей плотностных течений (см/с) в оз. Севан

Горизонт, м	Месяц, год			
	июль		октябрь	
	2007	2019	2006	2019
Большой Севан				
0	0.1–30.3	0.6–41.2	0.9–28.8	0.2–10.3
5	0.1–26.2	0.2–36.2	0.3–26.8	0.0–10.3
10	0.03–19.9	0.7–31.0	0.3–24.8	0.0–9.8
15	0.0–8.1	0.2–26.6	0.4–21.3	0.0–8.1
20	0.0–3.3	0.1–26.4	0.2–13.8	0.0–5.0
25	0.0–1.1	0.1–26.5	–	0.1–1.7
30	–	0.1–6.1	–	0.0–2.7
Малый Севан				
0	0.1–17.0	0.2–53.4	1.8–39.5	0.2–21.1
5	0.2–15.8	0.1–50.3	0.0–38.4	0.2–21.1
10	0.5–13.2	0.5–43.2	0.2–37.1	0.4–20.7
15	0.04–7.8	0.1–29.2	0.3–33.6	0.7–20.0
20	0.04–1.3	0.1–12.8	0.3–31.6	0.8–16.4
25	0.03–0.9	0.1–9.4	0.01–32.3	0.0–10.4
30	–	1.0–15.1	9.0–33.0	0.0–13.5
35	–	0.0–21.3	0.4–29.4	0.0–3.3
40	–	4.0–27.3	2.0–29.4	0.0–2.2
45	–	4.0–7.7	1.3–8.0	0.0–3.9
50	–	4.0–7.6	2.3–5.0	0.0–3.1
55	–	–	2.3–5.8	0.8–1.3

руемое по космическим снимкам, достаточно явно выступают индикаторами гидродинамических процессов (вихрей, зон конвергенций в циркуляциях Лэнгмюра и фронтальных зонах), пассивно перемещаясь под действием течений [7].

На оз. Севан горизонтальное распределение хлорофилла “а” определяется гидродинамическими структурами, характерными для крупных озер Европейской части России (Ладожского и Онежского) [15], Великих озер [24]. Это прежде всего – циклонический круговорот в южной части Малого Севана, обширный циклонический круговорот в Большом Севане, локальный антициклонический круговорот воды в юго-восточной части Большого Севана (рис. 3).

Таким образом, результаты расчетов циркуляции вод динамическим методом, а также анализ космических снимков позволяют сформулировать гидрометеорологические условия формирования преобладающей циклонической циркуляции

в оз. Севан. С наступлением гидрологической весны и более интенсивным прогревом литорали возникает различие температуры воды открытой и мелководной частей озера. В результате с увеличением коэффициента шероховатости над более теплой водой возрастают напряжение ветра и его неоднородность над поверхностью водоема. Как весной, так и в летне-осенний период над Севаном преобладает поле ветра циклонической направленности (рис. 4а). Взаимодействие обоих факторов приводит к формированию циклонического переноса воды в литорали. В период вертикальной стратификации температуры в центре циклонического круговорота происходит подъем термоклина.

Усиливаются горизонтальные градиенты температуры и, соответственно, плотности воды. Происходит интенсификация циклонического круговорота при постоянном ветровом воздействии циклонической направленности. Обобщенная схема горизонтальной циркуляции воды в озере пред-

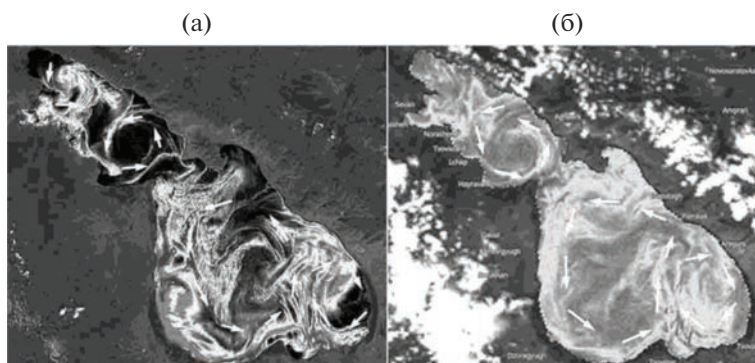


Рис. 3. Распределение хлорофилла 11.07.2018 (а) и 15.07.2020 (б) в оз. Севан по данным дистанционного зондирования. Стрелками показан преобладающий перенос воды.

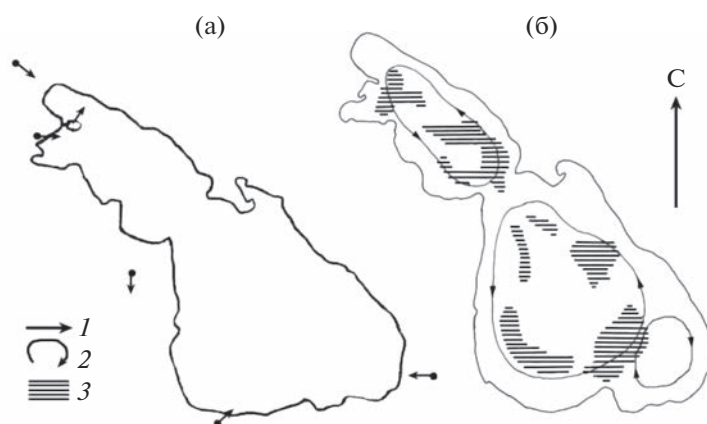


Рис. 4. Картограммы: а — поля ветра над оз. Севан [8]; б — преобладающей циркуляции воды в период температурной стратификации 2006–2007 и 2019 гг. 1 — направление ветра; 2 — циркуляция воды; 3 — зоны максимальных скоростей переноса воды.

ставляет собой два циклонических круговорота с максимальными скоростями переноса воды, приуроченными, как правило, к периферии вихрей, и локальный антициклонический круговорот в юго-восточной части Большого Севана (рис. 4б). Положение зон наибольших скоростей согласуется с данными проведенных ранее натурных и модельных исследований [15].

Внутренние волны в термоклине

Внутренние волны — один из главных факторов перемешивания толщи воды. Согласно Н.Н. Филатову [15], среди внутренних волн могут быть выделены: длинные гравитационные, короткие и длинные инерционно-гравитационные (Пуанкаре) с периодом $T_{иг} < T_{ин}$, инерционные при $T_{ин} \sim 12/\sin\phi$, волны Кельвина с периодом больше инерционного. Трансформация волн Кельвина в прибрежной зоне может привести к образованию широкого спектра короткопериодных волн.

Спектральный анализ временных рядов температуры воды, зарегистрированных в июле—октябре 2018 г. на АБС, расположенной в южной части Малого Севана, выявил достаточно обширный набор разнопериодных колебаний, вызванных формированием внутренних волн. Так, в термоклине и гипolimнии были зафиксированы колебания с периодами от 12 ч до 10 сут.

Короткопериодные колебания (период 12–16 ч) могли вызываться короткими инерционно-гравитационными внутренними волнами (инерционный период для оз. Севан составляет ~ 18.8 ч). Колебания с периодом от 1 до 4.5 сут, вероятнее всего, обусловлены воздействием внутренних сейш. Природа последних связана с изменением ветрового режима в бассейне озера. Следует отметить, что в спектре колебаний скорости ветра доминируют суточные колебания, вызванные местными ветрами и движениями синоптического масштаба (периоды от 2 до 9 сут). Кроме того, колебания температуры воды с периодами в диапазоне от 3 до 10 сут могут быть связаны с формиро-

ванием бароклинных волн Кельвина. Все перечисленные виды внутриволновых колебаний выявлены Н.Н. Филатовым в 1980-х гг. [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Термический режим оз. Севан определяется высотным положением водоема, значительной глубиной и достаточно интенсивным вертикальным перемешиванием вод. Годовой термический цикл озера характерен для крупных глубоких озер Северного полушария.

Увеличение уровня воды на 3.1 м не привело к каким-либо существенным изменениям гидрологического режима озера по сравнению с его снижением к 1981 г. на 18.48 м.

Как в Большом, так и в Малом Севане в летне-осенний период сохраняются купол холодной воды и связанная с ним циклоническая циркуляция.

С наступлением осени гипolimнион купола изолируется от смежных хорошо перемешиваемых участков и до заглубления термоклина до дна является обширным резервуаром гипоксии с содержанием растворенного кислорода < 2 мг/л.

В целом, водная масса озера достаточно однородна с незначительными различиями электропроводности воды мелководий и открытой части водоема. Из-за сравнительно малого объема стока основных притоков влияние речных вод на структуру водной массы озера невелико и проявляется в большей степени только в период половодья.

Внутриволновые движения в оз. Севан, формируемые в термоклине под воздействием внешних и внутренних факторов, характерны для всех крупных глубоких озер Северного полушария. Такой импульсный источник, как короткопериодные внутренние волны, играет очень важную роль в распределении биогенных элементов и планктона в толще воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астраханцев Г.П., Менишуткин В.В., Петрова Н.А., Руховец Л.А. Моделирование экосистем больших стратифицированных озер. СПб.: Наука, 2003. 363 с.
2. Бояринов П.М., Петров М.П. Процессы формирования термического режима глубоких пресноводных водоемов. Л.: Наука, 1991. 176 с.
3. Гезалин М.Г. Дефицит кислорода в озере Севан // Тр. СГБС. 1983. Т. 18. С. 95–109.
4. Гезалин М.Г. О температурном режиме оз. Севан в связи со спуском его уровня // Тр. СГБС. 1979. Т. 17. С. 5–23.
5. Гурова Е.С., Иванов А.Ю. Особенности проявления гидродинамических структур в юго-восточной части балтийского моря по данным спектрорадиометров Modis и космической радиолокации // Исследование Земли из космоса. 2011. № 4. С. 41–54.
6. Zubov N.N., Mamaev O.I. Динамический метод вычисления элементов морских течений. Л.: Гидрометеиздат, 1956. 116 с.
7. Моница А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 376 с.
8. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Вып. 16. Армянская ССР. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 366 с.
9. Озеро Севан. Экологическое состояние в период изменения уровня воды / Отв. ред. А.В. Крылов. Ярославль: Филигрань, 2016. 328 с.
10. Поддубный С.А., Балонов И.М., Краснопер Е.В. О влиянии горизонтальной циркуляции вод на распределение фитопланктона в оз. Плещеево // Вод. ресурсы. 1987. № 2. С. 119–123.
11. Показеев К.В., Филатов Н.Н. Гидрофизика и экология озер. Т. 1. Гидрофизика. М.: Физ. фак. МГУ, 2002. 276 с.
12. Тихомиров О.А., Бочаров А.В. Использование данных дистанционного зондирования для оценки показателей мутности воды водных объектов // Вестн. ТвГУ. Сер. География и геоэкология. 2016. № 1. С. 5–11.
13. Тихомиров О.А., Бочаров А.В., Комиссаров А.Б., Хиженя С.Д., Пахомов П.М. Использование данных сенсора Landsat 8 (OLI) для оценки показателей мутности, цветности и содержания хлорофилла в воде Иваньковского водохранилища // Вестн. ТвГУ. Сер. Химия. 2016. № 2. С. 230–244.
14. Филатов Н.Н. Гидродинамика озер. СПб.: Наука, 1991. 200 с.
15. Филатов Н.Н. Динамика озер. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 168 с.
16. Bennett J.R. Another explanation of the observed cyclonic circulation of large lakes // Limnol. Oceanogr. 1974. V. 20. Iss. 1. P. 108–110.
17. Holland P.R., Kay A., Botte V. A Numerical Study of the Dynamics of the Riverine Thermal Bar in a Deep Lake // Environ. Fluid Mechanics. 2001. V. 1. P. 311–332.
18. Hovhannissian R., Gabrielyan B. Ecological problems associated with the biological resource use of Lake Sevan, Armenia // Ecol. Engineering. 2000. V. 16. P. 175–180.
19. Melnik N.G., Bondarenko N.A., Belykh O.I., Blinov V.V., Ivanov V.G., Korovyakova I.V., Kostornova T.Ya., Lazarev M.I., Logacheva N.F., Pomazkova G.I., Shershtyankin P.P., Sorokovikova L.M., Tolstikova L.I., Tereza E.P. Distribution of pelagic invertebrates near a thermal bar in Lake Baikal // Hydrobiologia. 2006. V. 568. P. 69–76.
20. My Land Viewer. EOS Platform. [Электронный ресурс]. <https://eos.com/land-viewer/> (дата обращения: 27.05.2021)
21. Pickett R.L. Lake Ontario circulation in November // Limnol. Oceanogr. 1976. V. 21. Iss. 4. P. 608–611.
22. Pickett R.L., Bermick S. Observed resultant circulation of Lake Ontario // Limnol. Oceanogr. 1977. V. 22. Iss. 6. P. 1071–1076.
23. Rao Y.R., Skafel M.G., Charlton M.N. Circulation and turbulent exchange characteristics during the thermal bar in Lake Ontario // Limnol. Oceanogr. 2004. V. 49. Iss. 6. P. 2190–2200.

24. *Shuchman R., Sayers M., Leshkevich G., Lesht B.* Great Lakes Remote Sensing. Algorithms Status, Comparisons, and Future Directions. NASA GLENN Remote Sensing Workshop Cleveland. Ohio March 12–13. 2014. [Электронный ресурс]. <https://www.mtu.edu/mtri/research/outreach/remote-sensing-water-quality/remote-sensing-algorithms.pdf> (дата обращения: 27.05.2021)
25. *Soomets T., Uudeberg K., Jakovels D., Brauns A., Zagers M., Kutser T.* Validation and Comparison of Water Quality Products in Baltic Lakes Using Sentinel-2 MSI and Sentinel-3 OLCI Data // *Sensors*. 2020. V. 20. Iss. 3. P. 1–22.
26. *Sorokovikova L.M., Popovskaya G.I., Belykh O.I., Tomberg I.V., Maksimenko S.Yu., Bashenkhaeva N.V., Ivanov V.G., Zemskaya T.I.* Plankton composition and water chemistry in the mixing zone of the Selenga River with Lake Baikal // *Hydrobiologia*. 2012. V. 695. P. 329–341.
27. *Tsydenov B.O.* The Effect of the Coriolis Force and Wind on the Dynamics of the Fall Thermal Bar // *Moscow Univ. Phys. Bull.* 2019. V. 74. № 1. P. 70–76.
28. Weather data SYNOPS/BUFR – GFS/ECMWF forecast – *Meteomanz.com* [Электронный ресурс]. <http://www.meteomanz.com/> (дата обращения: 27.05.2021)