

УДК 528.88

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ  
ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ ОЗЕРА СЕВАН С ПРИМЕНЕНИЕМ ДАННЫХ  
COPERNICUS GLOBAL LAND SERVICE

А. А. ОВСЕПЯН \*, А. Н. ХЛГАТЯН \*\*, Р. А. АВЕТИСЯН \*\*\*,  
В. С. МУРАДЯН \*\*\*\*, Ш. Г. АСМАРЯН \*\*\*\*\*

*Центр эколого-ноосферных исследований НАН РА, Армения*

Температура поверхности воды является важным фактором, влияющим на экологическое состояние озера. Методы дистанционного зондирования являются важным инструментом для получения температуры поверхности воды озера и обеспечивают получение периодической информации со всей поверхности. Целью данного исследования является анализ пространственно-временного изменения температуры поверхности воды оз. Севан на основе данных дистанционного зондирования и взаимосвязи между температурой поверхности озерной воды и температурой воздуха бассейна озера. В условиях достоверности  $p < 0,01$  были получены следующие результаты корреляции: между среднедекадными температурами поверхности воды и среднедекадными температурами воздуха – с коэффициентом  $r = 0,929$ , между среднемесячными температурами поверхности воды и месячными максимальными температурами воздуха – с коэффициентом  $r = 0,918$ , между месячной максимальной температурой поверхности воды и месячной максимальной температурой воздуха – с коэффициентом  $r = 0,961$ . Анализ данных дистанционного зондирования показывает как закономерности, так и аномальное поведение температуры поверхностной воды озера.

<https://doi.org/10.46991/PYSU:C/2023.57.3.255>

**Keywords:** Sevan Lake, water surface temperature, remote sensing data, air temperature.

**Введение.** Одним из важнейших показателей качества озерной воды является температура поверхности воды озера. Последняя находится под влиянием множества факторов, таких как температура воздуха, тепловое излучение, рельеф, температура воды втекающих в озеро рек, теплообмен на поверхности воды и т. д. [1, 2], и лучше остальных физических параметров отражает влияние метеоклиматических условий на озеро. Некоторые исследования показывают, что в результате климатических изменений поверхностные воды в озерах нагреваются быстрее, чем таковые в океане, и что температура

\* E-mail: [aza.hovsepyan@cens.am](mailto:aza.hovsepyan@cens.am)

\*\* E-mail: [anahit.khlghatyan@cens.am](mailto:anahit.khlghatyan@cens.am)

\*\*\* E-mail: [rimalavetisyan@cens.am](mailto:rimalavetisyan@cens.am)

\*\*\*\* E-mail: [vahagn.muradyan@cens.am](mailto:vahagn.muradyan@cens.am)

\*\*\*\*\* E-mail: [shushanik.asmaryan@cens.am](mailto:shushanik.asmaryan@cens.am)

поверхности озерных вод меняется быстрее, чем температура окружающего воздуха, особенно в средних широтах [3, 4].

Температура поверхности воды включена в список основных климатических переменных (Essential Climate Variables) Всемирной метеорологической организации и определяемых ею как “физические, химические или биологические переменные или группы переменных, которые оказывают решающее влияние на климат Земли” [5].

Температура поверхности воды может напрямую отражать процессы обмена энергии и веществ в системе вода–суша–атмосфера и служить индикатором воздействия изменения климата и деятельности человека на озера [6, 7]. Тесное взаимодействие температуры воздуха и температуры поверхности воды влияет на температуру верхнего слоя воды, что, в свою очередь, оказывает важное влияние на экосистему озера, в частности на фитопланктон. В полимиктических мелководных озерах, где происходит смешение разных слоев воды, температура поверхности близка к температуре всей глубины воды, а в глубоких мономиктических озерах она может быть связана со стратификацией воды и структурой термоклина [8, 9]. Исследования двадцати девяти озер в Швейцарских Альпах показали, что температура поверхности воды до высот 2000 м н. у. м. тесно связана с высотой и температурой воздуха. При переходе высотной границы в 2000 м отклонение температуры поверхности воды резко увеличивается и связь температуры воды как с высотой, так и с температурой воздуха существенно ослабевает [8].

Сеть метеостанций позволяет периодически получать точную информацию о температуре воздуха, следить за ней и фиксировать ее изменения. Однако получение периодических и пространственных данных о температуре воды со всей поверхности озера является достаточно трудоемким, кропотливым и дорогостоящим процессом, а во многих случаях – просто невозможным из-за погодных условий.

Активно развивающиеся технологии дистанционного зондирования (ДЗ) позволяют получать на систематической основе данные о температуре воды всей поверхности озера, а не только данные точечных измерений, что особенно важно для озер с большой поверхностью, к которым относится и озеро Севан.

Целью данного исследования является анализ пространственно-временного изменения температуры поверхности оз. Севан на основе данных дистанционного зондирования и анализ взаимосвязи между температурой поверхности озерной воды и температурой воздуха бассейна озера.

#### **Материалы и методы.**

**Объект исследования.** Оз. Севан – крупнейший резервуар пресной воды на Южном Кавказе – расположено в Гегаркуникском марзе (регионе) Республики Армения (рис. 1). Котловина озера, нижнюю часть которой занимает сам Севан, со всех сторон окружена горами. Зеркало озера находится на высоте около 1900 м н. у. м. Морфологически оз. Севан разделено на две части: Большой Севан и более глубокий Малый Севан. Будучи огромным водным бассейном, озеро является также огромным теплоизолятором. Радиационный баланс озера в течение большей части года положительный, а в зимние месяцы – на некоторое время отрицательный. Таким образом, озеро

летом аккумулирует тепло, а зимой передает его окружающей среде, тем самым смягчая климатические условия. Температура воды в основном в озере положительная даже зимой. Озеро полностью замерзает не каждый год [10, 11].



Рис. 1. Озеро Севан и станции регистрации температуры воздуха.

**Данные дистанционного зондирования.** Данные ДЗ температуры поверхности оз. Севан за период 2017–2022 гг. получены на основе данных спутников Sentinel 3 (A и B), взятых из базы данных Copernicus Global Land Service (<https://land.copernicus.eu/global/>) – компонента основной службы мониторинга Земли проекта Copernicus и европейского флагмана в области ДЗ Земли. Данные усреднены по десяти дням (1–10, 11–20, 21 – последний день месяца). Пространственное разрешение растровых данных температуры поверхности воды составляет 1 км [12]. Для исследования использовались максимальные и медианные значения температуры водной поверхности. Выбор медианного значения, а не средних значений обусловлен тем, что в последнем случае изолированные значения (выбросы), вызванные определенными “ошибками” (облачность и т.д.), не влияют на медианное значение. Тем не менее, при анализе данных медианные значения сравнивались со средними значениями. Различия невелики, что указывает на отсутствие выбросов либо их немногочисленность.

**Данные температуры воздуха.** Данные о температуре воздуха за 2017–2021 гг. были получены из “Центра гидрометеорологии и мониторинга” Министерства окружающей среды РА. Использовались средние за 10 дней, среднемесячные и месячные максимальные температуры, полученные с пяти станций бассейна оз. Севан: Мартуни, Масрик, Гавар, Шоржа, Севан.

Для оценки взаимосвязи температуры поверхности воды оз. Севан с температурой воздуха бассейна озера были проанализированы данные температуры воздуха и температуры поверхности воды озера, полученные на основе данных ДЗ Земли.

Данные ДЗ и метеоданные температуры поверхности озера были подвергнуты тесту нормальности Шапиро–Уилка [13], который показал, что данные не имеют нормального распределения. На основании этого проведен корреляционный анализ Спирмана между медианными значениями среднедекадных температур поверхности озера и среднедекадными температурами воздуха, среднемесячными температурами поверхности воды озера и максимальными месячными температурами воздуха, а также между максимальными месячными температурами поверхности воды озера и максимальными месячными температурами воздуха (рис. 2).

**Программное обеспечение.** Для обработки данных температуры поверхности воды были использованы программные пакеты ArcGIS 10.6.1 и QGIS 3.30.1. Статистический анализ данных был проведен с применением программного обеспечения IBM SPSS Statistics 20.

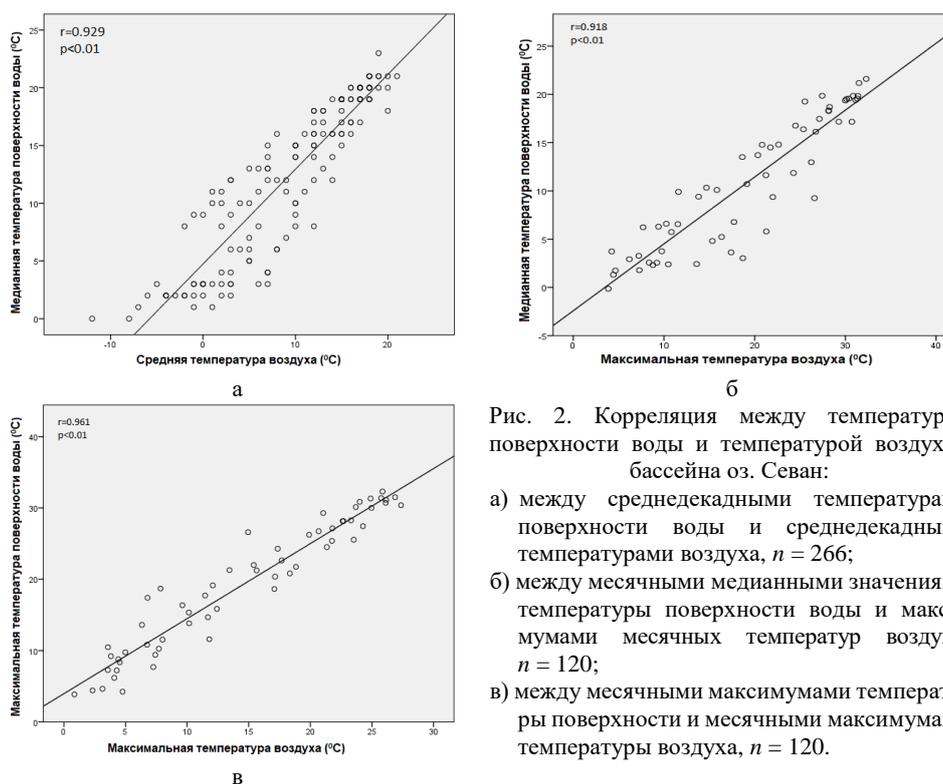


Рис. 2. Корреляция между температурой поверхности воды и температурой воздуха бассейна оз. Севан:

- между среднедекадными температурами поверхности воды и среднедекадными температурами воздуха,  $n = 266$ ;
- между месячными медианными значениями температуры поверхности воды и максимумами месячных температур воздуха,  $n = 120$ ;
- между месячными максимумами температуры поверхности и месячными максимумами температуры воздуха,  $n = 120$ .

**Полученные результаты их обсуждение и анализ.** На рис. 2 представлены результаты корреляции температур воздуха бассейна оз. Севан и поверхности воды озера. Как видно из графиков на рис. 2, во всех трех случаях существует четко выраженная значимая корреляция между температурами

воздуха и поверхностными температурами воды в озере: между декадными медианными температурами поверхности воды и среднедекадными температурами воздуха –  $r = 0,929$ ,  $p < 0,01$  (рис. 2, а), между месячными медианными температурами поверхности воды и максимальными температурами воздуха –  $r = 0,918$ ,  $p < 0,01$  (рис. 2, б), между максимальными месячными температурами поверхности воды и максимальными месячными температурами воздуха –  $r = 0,961$ ,  $p < 0,01$  (рис. 2, в).

Результаты корреляции доказывают, что существует значительная и четкая взаимосвязь между температурой поверхности воды в оз. Севан и температурой воздуха.

Более детальное изучение взаимодействия температуры поверхности воды и температуры воздуха за 2017–2021 гг. показало:

- средняя температура поверхности воды в озере в среднем на 3 градуса выше температуры воздуха; согласно графику на рис. 3, в период с ноября по март разница больше, а температура поверхности воды выше температуры воздуха;

- самые низкие температуры воздуха ( $-7,8$  и  $-11,8^{\circ}\text{C}$ ) за рассматриваемые периоды были зафиксированы в феврале 2017 г., что совпадает с единственным за данный период полным оледенением оз. Севан в том же году со снижением температуры воды до нуля, что ясно показано на рис. 3;

- явное отклонение вправо (в направлении второй половины года) температуры поверхности воды во все годы на графике рис. 3 (вторая половина года) позволяет предположить, что в первом полугодии температуры воздуха и воды повышаются пропорционально, с определенным опережением хода температуры воздуха, а уже во второй половине года вода остывает медленнее воздуха.

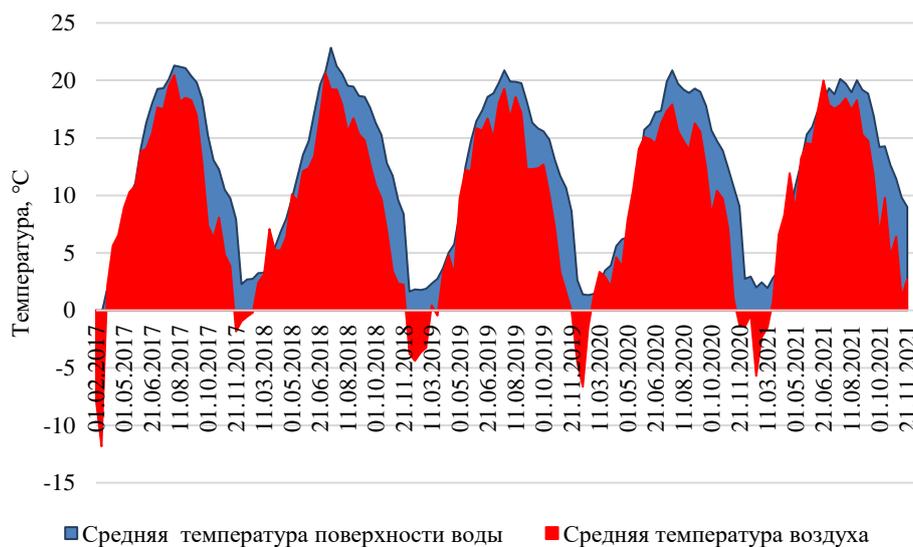


Рис. 3. Сезонная и межгодовая изменчивость средних (десятидневных) температур поверхности воды в оз. Севан и температуры воздуха бассейна оз. Севан за 2017–2021 гг.

Исследование пространственно-временных изменений температуры поверхности озера на основе данных ДЗ за 2017–2022 гг. выявило (рис. 4):

- в изменении температуры поверхности воды озера наблюдаются следующие закономерности: температура поверхности воды снижается до минимальных значений в феврале и достигает максимальных значений в конце июля–августа. Самые низкие температуры в зимние месяцы и самые высокие в летние наблюдаются в южных, наиболее мелководных прибрежных частях озера;
- на рис. 4 изображены сравнительные графики температур поверхности воды за 2017–2022 гг., где хорошо видно, что в 2018 г. температура достигала максимума во второй декаде июля и существенно превышала средние температуры поверхности воды, зафиксированные за период исследований.

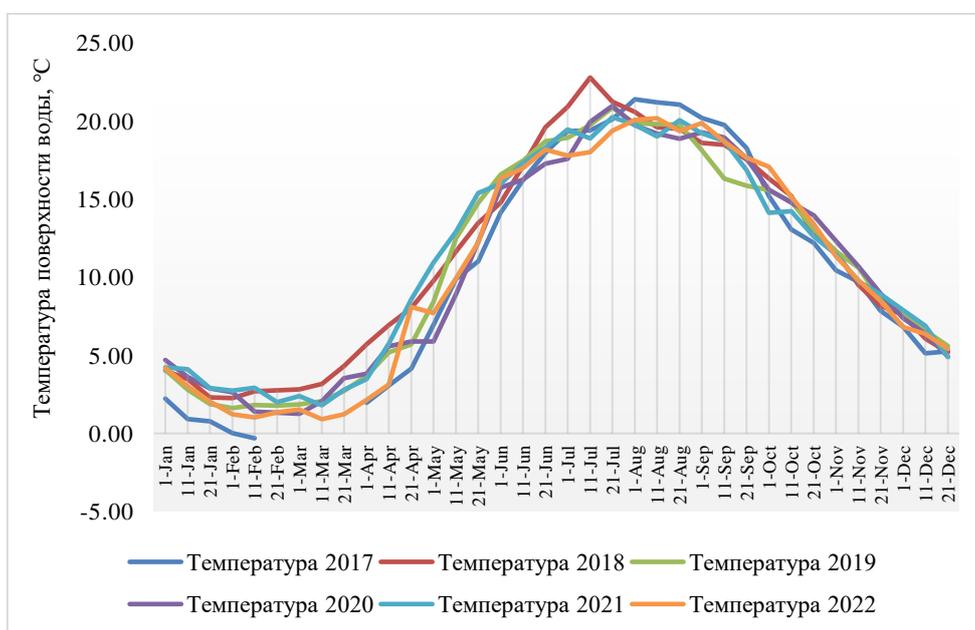


Рис. 4. Сезонное “поведение” температуры поверхности воды в оз. Севан за период 2017–2022 гг.

### Заклучение.

- Применение космических снимков подтверждает тесную взаимосвязь между температурой воздуха бассейна оз. Севан и температурой поверхности воды в озере, которая четко выражается в сезонном и межгодовом поведении температур – с определенной закономерностью.

- Анализ данных температуры поверхности воды в оз. Севан, основанный на данных ДЗ и температуры воздуха бассейна озера, указывает на наличие эффекта задержки температуры поверхности воды, свидетельствующего о том, что температура воздуха и температура воды нагреваются и остывают неодновременно, т.е. температура поверхности воды нагревается с задержкой по отношению к температуре воздуха и наоборот, температура воздуха остывает быстрее, чем температура воды.

• Пространственно-временной анализ данных ДЗ температуры поверхности оз. Севан за исследуемый период (2017–2022 гг.) указывает на то, что до минимальных значений температура поверхности воды снижается в феврале, а максимальных значений достигает в конце июля и в августе. Данные ДЗ позволяют идентифицировать “отклонения” от общей закономерности, так, например, за 2018 г., когда максимальное значение температуры наблюдалось в середине июля.

• Более подробные данные (ежедневные) как ДЗ, так и метеорологические, и более длинные ряды данных позволят более детально изучить взаимосвязь температуры поверхности воды оз. Севан с температурой воздуха в бассейне озера, а также выявить причины проявленных отклонений.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по науке МОНКС РА, в рамках научного проекта № 21Т-1Е252.*

Поступила 18.10.2023

Получена с рецензии 29.11.2023

Утверждена 15.12.2023

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Piccolroaz S., Toffolon M., Majone B. A Simple Lumped Model to Convert air Temperature into Surface Water Temperature in Lakes. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Copernicus GmbH* **17** (2013), 3323–3338.  
<https://doi.org/10.5194/hess-17-3323-2013>
2. Livingstone D., Padisak J. Large-Scale Coherence in the Response of Lake Surface-Water Temperatures to Synoptic-Scale Climate Forcing during Summer. *Limnol. Oceanogr.* **52** (2007), 896–902.  
<https://doi.org/10.4319/lo.2007.52.2.0896>
3. Schneider P., Hooket S.J. al. Satellite Observations Indicate Rapid Warming Trend for Lakes in California and Nevada. *Geophys. Res. Lett.* **36** (2009), 22.  
<https://doi.org/10.1029/2009GL040846>
4. Austin J.A., Colman S.M. Lake Superior Summer Water Temperatures are Increasing More Rapidly Than Regional Air Temperatures: A Positive Ice-albedo Feedback. *Geophys. Res. Lett.* **34** (2007), № 6.  
<https://doi.org/10.1029/2006GL029021>
5. Essential Climate Variables [Electronic resource] (2017). Accessed 19.05.2023.  
<https://public.wmo.int/en/programmes/global-climate-observing-system/essential-climate-variables>
6. Kun Yang, Zhenyu Yu, et al. Spatial-Temporal Variation of Lake Surface Water Temperature and Its Driving Factors in Yunnan-Guizhou Plateau. *Water Resour. Res.* **55** (2019), 4688–4703.  
<https://doi.org/10.1029/2019WR025316>
7. Weber T., Haensler A., Jacob D. Sensitivity of the Atmospheric Water Cycle to Corrections of the Sea Surface Temperature Bias over Southern Africa in a Regional Climate Model. *Clim. Dyn.* **51** (2018), 2841–2855.  
<https://doi.org/10.1007/s00382-017-4052-8>
8. Livingstone D.M., Lotter A.F., Kettle H. Altitude-dependent Differences in the Primary Physical Response of Mountain Lakes to Climatic Forcing. *Limnol. Oceanogr.* **50** (2005), 1313–1325.  
<https://doi.org/10.4319/lo.2005.50.4.1313>
9. Melis M.T. Applicazione Del Prodotto Oceanico MODIS Per La Misura Della SST Alle Acque Marine Della Sardegna. *Riv. Ital.* (2011).
10. Հայկական ՄԱՀ ֆիզիկական աշխարհագրություն. Երևան, ՀՀ ԳԱԱ հրատարակչություն, (1971), 469.
11. Hovsepyan A., Muradyan V., et al. *Studyiing the Dynamics of Lake Sevan Water Surface Temperature Using Landsat 8 Satellite Imagery*. 5<sup>th</sup> Inter. Conf. GEOGRAPHY, ENVIRONMENT and GIS. Targoviste, Transversal Publishing House (2018), 59–60.

12. Carrea L., Merchant Ch. *Copernicus Global Land Operations Cyrosphere and Water C-GLOPS2*. C-CGLOPS2 consortium (2020).
13. Mishra P., et al. Descriptive Statistics and Normality Tests for Statistical Data. *Ann. Card. Anaesth.* **22** (2019), 67–72.  
[https://doi.org/10.4103/aca.ACA\\_157\\_18](https://doi.org/10.4103/aca.ACA_157_18)

Ա. Ա. ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ, Ա. Ն. ԽԼԳԱԹՅԱՆ, Ռ. Ա. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ,  
Վ. Ս. ՄՈՒՐԱԴՅԱՆ, Շ. Գ. ԱՍՄԱՐՅԱՆ

ՄԵՎԱՆԱ ԼՃԻ ՋՐԻ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒԹԱՅԻՆ ՁԵՐՄԱՍԻՃԱՆԻ  
ՀԵՌՆԱՍԻՃԱՆԻ ԵՎՐՈՊԱԿԱՆ COPERNICUS GLOBAL LAND SERVICE  
ՏՎՅԱԼՆԵՐԻ ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ

Ամփոփում

Ջրի մակերևութային ջերմաստիճանը լճի էկոլոգիական վիճակի վրա ազդող կարևորագույն գործոն է: Հեռազննման մեթոդները լճի ջրի մակերևութային ջերմաստիճանի ստացման կարևոր գործիք են, որոնք տալիս են պարբերական տեղեկատվություն լճի ամբողջ մակերևութից: Հետազոտության նպատակն է հեռազննման տվյալների հիման վրա գնահատել Սևանա լճի մակերևութային ջերմաստիճանի տարածաժամանակային փոփոխությունները և վերլուծել լճի ջրի մակերևութային ջերմաստիճանի և լճի ավազանի օդի ջերմաստիճանի միջև առկա փոխկապակցվածությունը: Արդյունքները հաստատում են Սևանա լճի ջրի մակերևութային ջերմաստիճանի և լճի ավազանի օդի ջերմաստիճանի միջև գոյություն ունեցող փոխկապակցվածությունը:  $p < 0,01$  հավաստիության պայմաններում ստացվել են կորելյացիայի հետևյալ արդյունքները՝ ջրի մակերևութային տասնօրյա և օդի տասնօրյա միջին ջերմաստիճանների միջև՝  $r = 0,929$  գործակցով, ջրի մակերևութային ամսական միջին և օդի ամսական առավելագույն ջերմաստիճանների միջև  $r = 0,918$  գործակցով, ջրի մակերևութի ամսական և օդի ամսական առավելագույն ջերմաստիճանների միջև  $r = 0,961$  գործակցով: Հեռազննման տվյալների վերլուծությունը ցույց է տալիս լճի ջրի մակերևութային ջերմաստիճանի ինչպես օրինաչափությունները, այնպես էլ օրինաչափություններից տարբերվող վարքը:

A. A. HOVSEPYAN, A. N. KHLGHATYAN, R. A. AVETISYAN,  
V. S. MURADYAN, Sh. G. ASMARYAN

REMOTE SENSING OF LAKE SEVAN WATER SURFACE  
TEMPERATURE USING COPERNICUS GLOBAL LAND SERVICE DATA

Summary

Water surface temperature is an important factor influencing the ecological state of the lake. Remote sensing techniques are an important tool for obtaining lake surface water temperature, which provides periodic information from the entire

surface of the lake. The aim of this study is to analyze the spatiotemporal change of Lake Sevan surface water temperature based on remote sensing data and to analyze the relationship between the surface temperature of the lake water and the air temperature of the lake basin. The results confirm the relationship between the water surface temperature of Lake Sevan and the air temperature in the lake basin. Under conditions of reliability  $p < 0.01$ , the following correlation results were obtained: between average ten-day water surface temperatures and ten-day air temperatures with coefficient  $r = 0.929$ , between average monthly water surface temperatures and monthly maximum air temperatures with coefficient  $r = 0.918$ , between the monthly maximum water surface temperature and the monthly maximum air temperature with a coefficient of  $r = 0.961$ . Analysis of remote sensing data shows both patterns and anomalous behavior of lake surface water temperature.