

УДК 528.88

ДАННЫЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ
В ИЗУЧЕНИИ СТАНОВЛЕНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА И АНАЛИЗЕ
ЕГО РЕЖИМА НА ОЗЕРЕ СЕВАН, АРМЕНИЯ

А. А. ОВСЕПЯН *, А. В. МЕДВЕДЕВ **, Ш. Г. АСМАРЯН ***

Центр эколого-ноосферных исследований НАН РА, Армения

Одной из важных характеристик термического режима озер являются сроки образования льда на озере и длительность сохранения ледяного покрова, которые влияют на озерную экосистему. В настоящее время наблюдать за ледяным покровом, картографировать и осуществлять картометрические исследования позволяют методы дистанционного зондирования, в частности спектральный индекс NDSII. Целью данного исследования является оценка возможности использования спутниковых данных дистанционного зондирования для анализа ледяного покрова оз. Севан и изучения его ледового режима.

Данные дистанционного зондирования оз. Севан подтверждают увеличение частоты его замерзания в результате понижения уровня озерной воды. Анализ результатов картографирования ледяного покрова оз. Севан показал, что $NDSII > 0,5$ соответствует полному замерзанию озера. В результате применения данных дистанционного зондирования выявлены и подтверждены как возможности, так и необходимость их использования для изучения ледяного покрова и ледового режима оз. Севан.

<https://doi.org/10.46991/PYSUC.2025.59.2.452>

Keywords: Lake Sevan, ice cover, remote sensing data, NDSII.

Введение. Ледяной покров и ледовый режим играют важную роль для гидрологических и биохимических параметров озер и влияют на функционирование озерной экосистемы в целом. Установление ледяного покрова характеризует тепловой режим озер и является важным физическим показателем процессов тепловлагообмена. Изменение ледового режима является также важным показателем изменения климата. В частности, климатические изменения (температуры воздуха и воды, ветровой режим) влияют на сроки формирования и таяния льда на водных объектах.

Сезонный ледяной покров характерен для озер бореального и умеренного поясов (40° – 80° N), а ледовый режим, кроме географической широты, зависит также и от абсолютной высоты озера и его глубины [1, 2].

* E-mail: aza.hovsepyan@cens.am

** E-mail: andrey.medvedev@cens.am

*** E-mail: shushanik.asmaryan@cens.am

Формирование ледяного покрова находится под влиянием множества факторов, которые условно делятся на морфологические, химические, гидрологические и климатические.

Морфологические и химические факторы, такие как концентрация солей, растворенные газы и т.д., более стабильны и меняются очень медленно. Гидрологические факторы, такие как сильное течение, могут полностью блокировать формирование льда. Однако наиболее важным является климатический фактор [2–5], поскольку он влияет на частоту формирования ледяного покрова, что чревато серьезными экологическими последствиями, такими как нарушение регулирования температуры, доступность кислорода, взаимодействие видов и т.д.

Согласно исследованиям, индикатором изменения климата считается изменение режима замерзания озера [6]. Последнее включено в Глобальную систему наблюдений за климатом (Global Climate Observing System, GCOS) в качестве Важной Климатической Переменной (Essential Climate Variable, ECV) [<https://gcoss.wmo.int/site/global-climate-observing-system-gcos/essential-climate-variables>].

На оз. Севан изменение ледового режима, помимо климатических факторов, повлияло также изменение термического режима озера в результате искусственного понижения уровня воды более чем на 18 м начиная с 1933 г. В естественных условиях, до начала антропогенного вмешательства, замерзание озера наблюдалось раз в 15–20 лет, а после искусственного понижения уровня воды озеро начало замерзать чаще [7, 8].

Традиционные методы изучения формирования ледяной покрова на озерах большей частью основаны на визуальных наблюдениях. Современные же методы спутникового дистанционного зондирования (ДЗ) со свободным доступом периодических данных с большим территориальным покрытием позволяют исследовать замерзание и режим замерзания озер, что особенно важно для изучения естественных водоемов больших размеров, таких как оз. Севан.

Данная работа выполнена в рамках базовой программы “Геоэкологические исследования окружающей среды” отделом ГИС и ДЗ ЦЭНИ НАН РА с целью оценки возможности использования спутниковых данных ДЗ для анализа и изучения ледяного покрова оз. Севан в период 1975–2022 гг.

Материалы и методы. Объектом нашего исследования является оз. Севан (40°19'00", 45°21'00"), которое находится в марзе (провинции) Гегаркуник на высоте 1900 м н.у.м. Одно из самых больших пресноводных высокогорных озер мира, оз. Севан с общей площадью 1277,5 км² морфологически делится на две части: Большой Севан (средняя глубина 37,7 м) и более глубокий и холодный Малый Севан (средняя глубина 50,9 м). Благодаря своим большим размерам озеро летом аккумулирует тепло, а зимой отдает его окружающей среде, тем самым смягчая климатические условия [<https://www.armmonitoring.am/#home>].

Ледяной покров у берегов оз. Севан формируется ежегодно, но сплошным льдом оно покрывается не каждый год [11]. Сплошной ледяной покров формируется в основном в том случае, когда средняя температура воздуха в декабре–феврале не превышает –5,6°C, а в феврале безветренная погода длится

более 100 ч [9]. Для изучения ледяной покрова оз. Севан были использованы спутниковые данные Landsat 1-9 и Sentinel 2 за 1975–2022 гг. с соответствующим пространственным разрешением 30 и 10–60 м и периодичностью получения данных соответственно 16 и 5 дней. Снимки прошли предварительную обработку методом DOS (Dark Object Substraction) с применением программного обеспечения QGIS и SNAP [10].

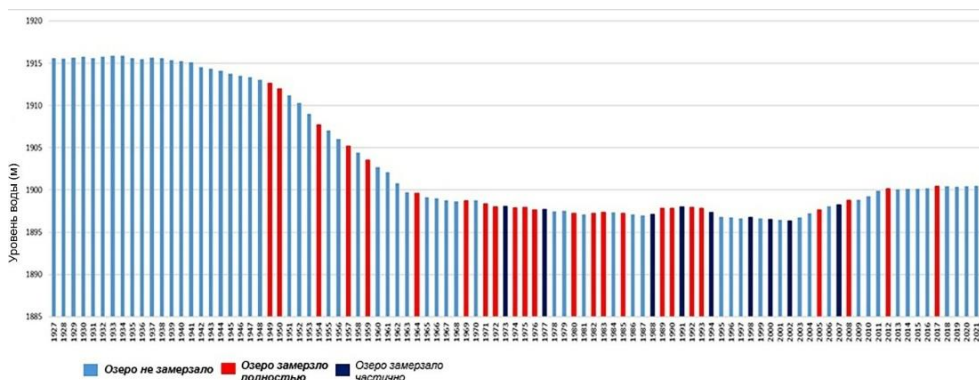


Рис. 1 Уровень воды оз. Севан и случаи замерзания в период с 1927 по 2017 гг.

Для дешифрирования ледового покрова нами использован Нормализованный индекс снега/льда NDSII (Normalized Difference Snow/Ice Index):

$$\text{NDSII} = \frac{\text{SWIR} - \text{Green}}{\text{SWIR} + \text{Green}},$$

где SWIR – спектральное отражение в коротком инфракрасном диапазоне, Green – спектральное отражение в зеленом диапазоне. Пороговым значением разделения воды и льда является значение индекса 0,4: $\text{NDSII} > 0,4$ соответствует льду, а $\text{NDSII} < 0,4$ – воде [11, 12].

Результаты исследований и их обсуждение. Данные о замерзании озера, полученные с четырех наземных наблюдательных точек (полуостровов Севан, Шоржа, Мартуни, Карцахбюр) Центром гидрометеорологии и мониторинга Министерства окружающей среды РА, были использованы для верификации результатов ДЗ. Согласно этим данным, в период 1927–2022 гг. ледяной покров устанавливался на всем озере полностью в 1949, 1950, 1954, 1957, 1959, 1964, 1969, 1971, 1972, 1974–1976, 1980, 1982, 1983, 1985, 1989, 1990, 1992, 1993, 2005, 2008, 2012, 2017 гг. и частично – в 1973, 1977, 1988, 1991, 1994, 1998, 2000, 2002, 2007 гг. [<https://armmonitoring.am>].

Как упоминалось выше, искусственное понижение уровня воды в оз. Севан привело к изменениям теплового режима, в частности, теплоемкость уменьшилась с $700 \cdot 10^{12}$ ккал (до понижения уровня воды) до $500 \cdot 10^{12}$ ккал, вследствие чего озеро стало замерзать чаще [8].

За 47-летний период исследований (1975–2022 гг.) зарегистрировано 22 случая замерзания оз. Севан, из которых 15 удалось идентифицировать дешифрированием спутниковых снимков, а остальные случаи не были идентифицированы из-за отсутствия спутниковых снимков достаточного качества (табл. 1). Как данные Центра гидрометеорологии и мониторинга, так и

результаты дешифрирования спутниковых снимков показывают, что периодичность замерзания озера составляет 1–5 лет, причем в период 1988–1994 гг. оз. Севан замерзало каждый год.

Таблица 1

Данные сплошного ледяного покрова оз. Севан в период с 1975 по 2017 гг.

Год	1975	1976	1977	1980	1982	1983	1985	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1998	2000	2002	2005	2007	2008	2012	2017*
Центр гидро-метеорологии и мониторинга МОС РА	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Данные ДЗ (Landsat, Sentinel 2)	✓	–	✓	–	–	–	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	–	✓	✓	✓	–	✓	✓	✓	✓

* – для 2017 г. кроме спутниковых снимков Landsat доступны также снимки Sentinel 2.

Таблица 2

Значения индекса NDSII для оз. Севан на основе спутниковых снимков Landsat и Sentinel 2

Дата	Среднее значение NDSII	Площадь озера, % со значением NDSII>0,4
22 марта, 1988 г.	0,61	88,1
5 февраля, 1989 г.	0,48	96,1
8 февраля, 1990 г.	0,53	90,2
24 февраля, 1990 г.	0,63	96,4
11 февраля, 1991 г.	0,16	23,5
17 марта, 1992 г.	0,73	99,9
2 апреля 1992 г.	0,54	99,2
16 февраля, 1993 г.	0,6	99,8
20 марта, 1993 г.	0,61	99,8
5 апреля, 1993 г.	0,49	98,8
2 марта, 1998 г.	0,5	55,3
15 марта, 2000 г.	0,36	69,3
24 января, 2002 г.	0,37	76,8
17 февраля, 2002 г.	0,37	47,4
3 марта, 2007 г.	0,43	31,1
2 февраля, 2008 г.	0,63	99,8
18 февраля, 2008 г.	0,68	99,9
5 марта, 2008 г.	0,55	99,7
1 апреля, 2012 г.	0,53	45,8
2 февраля, 2017 г.	0,35	22,68
18 февраля, 2017 г.	0,45	63,6
18 февраля, 2017 г.	0,5	92,51
21 февраля, 2017 г.	0,65	97,3
3 марта, 2017 г.	0,56	83
6 марта, 2017 г.	0,5	92,82
13 марта, 2017 г.	0,47	75
22 марта, 2017 г.	0,57	98,77
23 марта, 2017 г.	0,66	99,7
29 марта, 2017 г.	0,52	99
12 апреля, 2017 г.	0,2	0,27

На основе спутниковых данных Landsat и Sentinel 2 и с применением инструментов пространственного анализа и картометрических возможностей программы ArcGIS были получены пространственные характеристики ледяного покрова оз. Севан. Ниже представлены средние значения NDSII для спутниковых снимков за 1988–2017 гг. (снимки Landsat 2 за 1975 и 1977 гг. не охватывают коротковолновый инфракрасный диапазон, необходимый для спектрального индекса NDSII, ледяной покров идентифицирован методом визуального анализа) и площадь ледяного покрова в процентах (площадь со значениями $NDSII > 0,4$) (табл. 2).

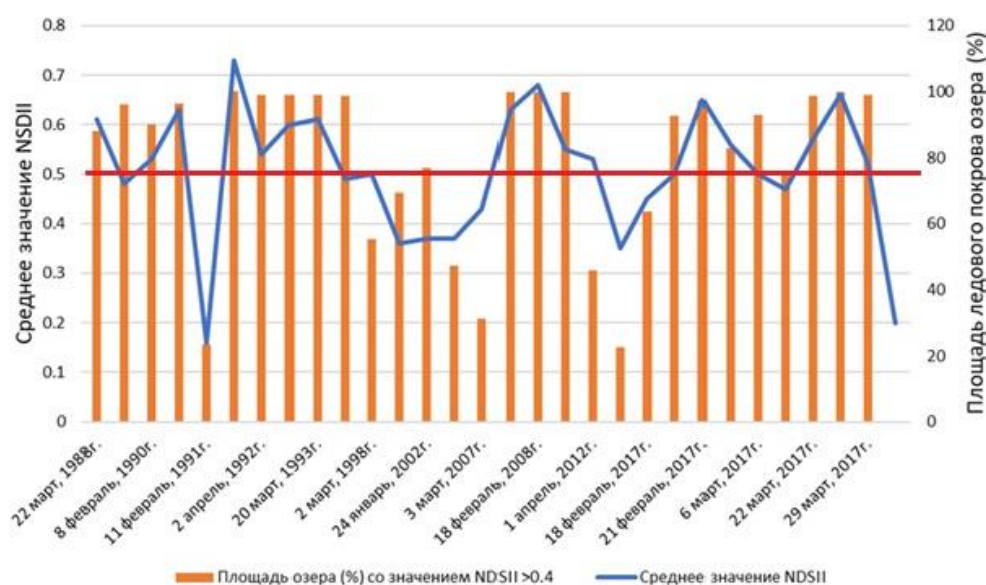


Рис. 2. Значения NDSII для оз. Севан и площадь его ледяного покрова на основе данных спутниковых снимков Landsat и Sentinel 2.

Сопоставление данных среднего значения индекса NDSII с данными площади ледяной покрова позволили выявить предельное значение индекса NDSII, выше которого наблюдается полное замерзание озера. Как показано ниже, озеро полностью замерзает при $NDSII > 0,5$ (рис. 2).

Для изучения режима замерзания нами был выбран 2017 г., поскольку именно тогда наблюдалось последнее за весь период нашего исследования сплошное замерзание оз. Севан и в доступе имелся более обширный ряд снимков благодаря снимкам Sentinel 2 (доступны с 2015 г.), что и позволило увеличить частоту наблюдений.

На рис. 3 видно, что 2.02.2017 лед наблюдается только у береговой линии озера, 11.02.2017 льдом покрыт Большой Севан, 18.02.2017 озеро полностью покрыто льдом, до 23.03.2017 сохраняется почти целостный ледяной покров, а уже 12.04.2017 озеро полностью свободно ото льда. Из-за наличия облачного покрова на снимках наблюдение за исходом льда оказалось невозможным, однако следует отметить, что на снимке, полученном

29.03.2017 и охватившим только Малый Севан, ледяной покров сохранен. На этой основе можно утверждать, что в конце марта оз. Севан было полностью покрыто льдом.

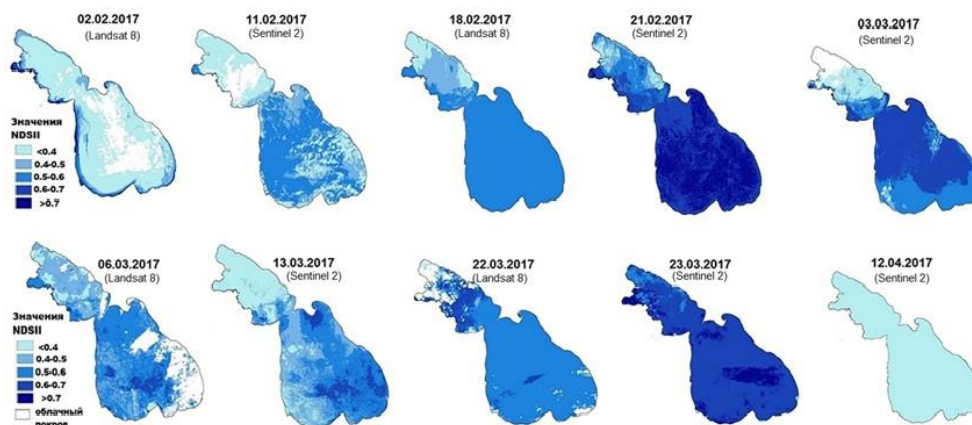


Рис. 3. Формирование ледяного покрова оз. Севан в 2017 г. на основе спутниковых снимков Landsat 8 и Sentinel 2.

Изучение фазы замерзания предполагает не только перечень карт, но и детальный анализ изменения ледовой обстановки в связи с температурными условиями, ветровом режимом и пр.

Заключение. Данные спутникового ДЗ, в частности данные Landsat и Sentinel 2, могут быть использованы для анализа ледяного покрова больших высокогорных озер и для мультитременного анализа ледового режима.

1. Результаты исследования ледового режима оз. Севан на основе данных спутниковых снимков и с применением спектрального индекса NDSII подтверждают увеличение периодичности установления ледяного покрова особенно в конце XX века.

2. При среднем значении $NDSII > 0,5$ озеро полностью покрывается льдом, что позволяет использовать этот спектральный индекс для мониторинга и прогнозирования ледового режима.

3. Низкая периодичность получения спутниковых снимков и наличие облачного покрова не позволяют полностью изучить ледовый режим озера. Однако возможности его исследования будут расширены в результате ожидаемого увеличения частоты получения спутниковых снимков и использования радиолокационных снимков.

4. Принимая во внимание влияние климатических факторов на процесс формирования ледяного покрова и изменение ледового режима, необходимо проведение более глубоких исследований с целью анализа пространственно-временных изменений ледового режима оз. Севан и последствий его влияния на экосистему озера в целом.

Поступила 04.04.2025

Получена с рецензии 01.07.2025

Утверждена 15.08.2025

ЛИТЕРАТУРА

1. Kirillin G. Physics of Seasonally Ice-Covered Lakes: A Review. *Aquat Sci.* **74** (2012), 659–682.
<https://doi.org/10.1007/S00027-012-0279-Y>
2. Herschy R.W. *Encyclopedia of Lakes and Reservoirs: Geography, Geology, Hydrology and Paleolimnology* (1st ed.). New York, Springer (2012).
3. Salonen K.M. Leppäranta et al. Perspectives in Winter Limnology: Closing the Annual Cycle of Freezing Lakes. *Aquatic Ecology* **43** (2009), 609–616.
<https://doi.org/10.1007/s10452-009-9278-z>
4. Livingstone D.M. Break-up Dates of Alpine Lakes as Proxy Data for Local and Regional Mean Surface Air Temperatures. *Climatic Change* **37** (1997), 407–439.
5. Williams G., Layman K.L., Stefan H.G. Dependence of Lake Ice Covers on Climatic, Geographic and Bathymetric Variables. *Cold Regions Science and Technology* **40** (2004), 145–164.
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2004.06.010>
6. Adrian R., O'Reilly C.M., et al. Lakes as Sentinels of Climate Change. *Limnology and Oceanography* **54** (2009), 2283–2297.
https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2283
7. Zdorovenova G., Efremova T., et al. Contrasting Changes in Lake Ice Thickness and Quality Due to Global Warming in the Arctic, Temperate, and Arid Zones and Highlands of Eurasia: 3. Water. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute* **17** (2025), 365.
<https://doi.org/10.3390/w17030365>
8. Оганесян Р. *Озеро Севан вчера, сегодня...* Ереван, Гитутюн (1996), 478.
9. *Гидрологический режим озера Севан*. Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Армения, Служба по гидрометеорологии и активному воздействию на атмосферные явления. Ереван (2017), 13.
10. Chavez P.S. An Improved Dark-Object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data. *Remote Sensing of Environment* **24** (1988), 459–479.
[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90019-3)
11. Xiao X., Shen Z., Qin X. Assessing the potential of VEGETATION sensor data for mapping snow and ice cover: A Normalized Difference Snow and Ice Index. *International Journal of Remote Sensing. Taylor & Francis* **22** (2001), 2479–2487.
<https://doi.org/10.1080/01431160010002902>
12. Heinilä K., Mattilaet O.-P., et al. A Novel Method for Detecting Lake Ice Cover Using Optical Satellite Data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **104** (2021), 102566.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102566>

Ա. Ա. ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ, Ա. Վ. ՄԵԴՎԵԴԵՎ, Շ. Գ. ԱՍՄԱՐՅԱՆ

ԵՐԿՐԻ ՀԵՌՈՂՈՂԱՆՈՒՄԱՆ ՏՎՅԱԼՆԵՐԸ ՄԵՎԱՆԱ ԼՃԻ (ՀԱՅԱՍՏԱՆ)
ՍԱՌՑԱԾԱԾԿԻ ԶԵՎԱՎՈՐՄԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՄԱՆ ԵՎ ՍԱՌՑԱՅԻՆ
ՌԵԺԻՄԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅԱՆ ՄԵՋ

Ա մ փ ո փ ու մ

Լճերի ջերմային ռեժիմի կարևոր բնութագրիչներից է սառցային ռեժիմը, որն ազդում է լճի ամբողջ էկոհամակարգի վրա: Ներկայումս հեռազննման մեթոդները, մասնավորապես NDSII սպեկտրալ ինդեքսը, հնարավորություն են տալիս դիտարկել սառցածածկը, քարտեզագրել այն և կատարել քարտեզաչափական ուսումնասիրություններ: Սույն հետազոտության նպատակն է

զնահատել արբանյակային հեռազննման տվյալների օգտագործման հնարավորությունը Սևանա լճի սառցածածկի վերլուծության և դրա սառցային ռեժիմի ուսումնասիրության համար:

Սևանա լճի հեռազննման տվյալները հաստատում են լճի ջրի մակարդակի նվազման հետևանքով դրա սառցակալման հաճախականության աճը: Սևանա լճի սառցածածկի քարտեզագրման արդյունքների վերլուծությունը ցույց է տվել, որ $NDSII > 0,5$ արժեքները համապատասխանում են լճի ամբողջական սառեցմանը: Հեռազննման տվյալների կիրառման արդյունքում դիտարկվել և հաստատվել են դրանց օգտագործման և՛ հնարավորությունները, և՛ անհրաժեշտությունը Սևանա լճի սառցային ռեժիմի ուսումնասիրության համար:

A. A. HOVSEPYAN, A. V. MEDVEDEV, Sh. G. ASMARYAN

EARTH REMOTE SENSING DATA IN STUDYING ICE COVER FORMATION AND ANALYZING ITS REGIME ON LAKE SEVAN, ARMENIA

Summary

One of the important characteristics of the thermal regime of lakes is the ice regime, which affects the entire lake ecosystem. At present, remote sensing methods, in particular the NDSII spectral index, allow to observe the ice cover, map it and carry out its cartometric studies. The purpose of this study is to assess the possibility of using satellite remote sensing data for analyzing the ice cover of Lake Sevan and studying its ice regime.

The remote sensing data of Lake Sevan confirm the increase in the frequency of its freezing as a result of lake water level decrease. Analysis of the results of Lake Sevan ice cover mapping showed that $NDSII > 0.5$ corresponds to complete freezing of the lake. As a result of application of remote sensing data, both the possibility and necessity of their use for studying the ice cover and ice regime of Lake Sevan were revealed and confirmed.