

## Методы исследований ледовых характеристик водоемов

*В.Н. Баклагин*

*Институт водных проблем Севера – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук», Петрозаводск*

**Аннотация:** Статья посвящена обзору методов исследований ледовых характеристик водоемов (таких как показатель ледовитости, сроки и длительности фаз ледового режима). Приведены преимущества применения методов многозональной спутниковой съемки для оценки ледовой обстановки водоемов над остальными методами. Выявлены проблемы получения информации о ледовой обстановке конкретного исследуемого водоема, вызванные сложностями идентификации этого водоема при анализе спутниковых данных. **Ключевые слова:** ледовые характеристики, водоем, дистанционное зондирование земли, дешифрирование, многозональная съемка.

Изменение ледового режима крупных водоемов является чувствительным индикатором многолетней изменчивости климатических факторов. Это подтверждается в работах российских и зарубежных авторов за последнее время [1-3], занимающихся исследованиями ледового режима различных водоемов. Ледовый режим – это особенности и изменение во времени процессов образования, развития и разрушения ледяных образований на водных объектах. Ледовый режим состоит из трех фаз: замерзание (характеризуется образованием ледового покрова), ледостав (характеризуется наличием ледяного покрова), вскрытие (характеризуется разрушением ледяного покрова). В работе [4] авторами показано, что процессы образования и разрушения ледового покрова небольших озер зависят от региональных климатических особенностей. Получение информации о сроках фаз ледового режима возможно с помощью анализа данных о показателях ледовитости водоема. Показатель ледовитости – это процент площади, занятой льдом, к общей площади водоема [5]. Анализ временных рядов показателя ледовитости позволяет получать данные о ледовом режиме водного объекта (сроки, длительность, скорость вскрытия и замерзания).

---

На настоящий момент накоплен богатый опыт по использованию различных методов для получения информации о ледовом покрове водоемов. Наблюдения за ледовым покровом Великих Американских озер, Великих Европейских озер, озером Байкал ведутся уже более 100 лет. Эти наблюдения в основном сводились к визуально-инструментальной оценке с установленных постов наблюдения. Такой способ получения данных позволял собирать информацию в пределах видимости с установленного поста радиусом несколько километров. Общая картина водоема при этом оставалась неизвестной, поэтому расчет показателя ледовитости был затруднен, так как для его расчета необходимо знать общую площадь, покрытую льдом.

Позднее, с середины 50-х годов двадцатого века были организованы наблюдения за ледовым покровом посредством авиаразведок. Использование авиатехники для исследований ледового покрова озер и морей позволило сделать определенный прорыв в получении данных о показателе ледовитости. На основании схем ледовой обстановки можно было с определенной точностью выполнить расчет ледовитости исследуемого водоема. Таким образом, благодаря данным авиаразведок о ледовом покрове в 1985 году были собраны справочные материалы о ледовитости Ладожского, Онежского озер и озера Байкал за период около 30 лет [5]. Однако необходимо отметить, что вылеты разведывательной авиации были не регулярными из-за высокой стоимости полетов и непостоянных погодных условий. Поэтому исследование динамики показателя ледовитости было затруднено из-за отсутствия подробных рядов данных. Помимо этого данные, полученные со снимков авиаразведок, не были достаточно информативными. Низкое пространственное разрешение получаемых снимков делали точность расчетов ледовитости водного объекта весьма ограниченной (около 8%, как указывается самими авторами работы [5]).

---

Современные методы получения данных о ледовитости и других характеристиках водоема предполагают использование данных дистанционного зондирования земли, которые включают в себя спутниковую съемку [6-9]. В настоящее время существует большое количество спутников (Terra, Aqua, MetOp, Topex/Poseidon, Jason-1,2, Geosat и многие другие), которые делают снимки земной поверхности каждый день в высоком пространственном разрешении (до нескольких метров). Метод получения информации о ледовой обстановке водных объектов, основанный на спутниковых снимках, эффективнее предшествующих методов благодаря ряду преимуществ: под наблюдением находится вся акватория исследуемого водоема; частота фиксирования «сцены» выше (интервал фиксирования от 3-24 часов), чем авиаразведками, когда полеты выполнялись менее одного раза в неделю и реже; снимки, полученные со спутников, имеют высокое пространственное разрешение (до нескольких метров на пиксель), что позволяет с высокой точностью рассчитывать показатели ледовитости водоемов; многозональная спутниковая съемка позволяет получить данные о широком ряде ледовых характеристик таких как толщина льда, сплоченность и многое другое.

Большое распространение имеет многозональная съемка, поскольку она позволяет получать широкий спектр различных характеристик о зондируемом объекте. Многозональная съемка – регистрирование в одном кадре различных диапазонов электромагнитной волны. На полученных снимках с помощью процесса дешифрирования можно различать различные типы сред (вода, земля, лед, растительность и прочее). Дешифрирование космических снимков – это очень важный процесс в получении информации со спутниковых снимков, проблемам которого посвящен ряд научно-исследовательских работ [10-16]. Дешифрирование может выполняться посредством визуально-интерактивных методов, а также в результате

---

автоматизированной работы сложных алгоритмов. Эти алгоритмы учитывают особенности характера излучения (длин волны) различных сред, что позволяет классифицировать на изображении различные объекты (лед, вода) или физические свойства этих объектов (температура). В дальнейшем эти данные можно применять в качестве входных для термогидродинамических и экологических моделей водных объектов [17, 18].

Можно перечислить ряд научно-исследовательских работ, где для получения данных о ледовом покрове водных объектов были использованы различные методы анализа снимков дистанционного зондирования земли. В работах [19-21] применялся анализ изображений модели Lake Surface Water Temperature, представленной центром NASA. Эта модель разработана на основании дешифрирования снимков радиометров MODIS и AATSR. В результате были получены данные о температурах воды на поверхности крупных и средних по размеру водоемах в Финляндии, влияющие на процесс образования, развития и разрушения ледового покрова. Эти данные были использованы для улучшения трехмерной математической модели прогнозирования погоды [22]. В работе [23] выполнены исследования ледового режима пяти крупнейших евразийских водоемов: Каспийское и Аральское море, озеро Байкал, Ладожское и Онежское озера. Для этих исследований так же применялись данные дистанционного зондирования земли спутников TOPEX/Poseidon, Jason-1, ENVISAT, Geosat и других. Авторами затрагиваются проблемы методологии классификации льда на изображениях, полученных из космоса, применяется комбинированное использование данных для классификации льда, полученных с различных датчиков, в том числе, со специального датчика для получения изображений в микроволновом диапазоне. Авторы работы [24] использовали данные дистанционного зондирования земли для исследований изменений площади арктического льда за период 20 лет (спутник Nimbus-7, который оснащен

---

микроволновым датчиком, F8, F11, F13). В работе представлены данные о концентрации и площади льда Арктических вод и выполнена оценка трансформации ледового покрова за наблюдаемый период времени. В работе [25] проведены наблюдения за ледовым покровом Арктического бассейна с целью диагностики глобальных изменений климата. В своих исследованиях авторы использовали результаты моделирования, а также результаты дистанционных измерений, которые проводились с помощью спутников Nimbus-7 и серии спутников DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) прибором SSM/I (Special Sensor Microwave / Imager). Для достижения своих целей авторами используются преимущества микроволновых радиометров, которые позволяют проводить съемку в любых погодных условиях. Также в работе [25] выполнены наблюдения за изменением высоты ледникового щита Гренландии за период около 10 лет. Эти наблюдения выполнялись на основе совместного использования данных измерений радиоальтиметров со спутников ERS-1 и ERS-2. На основании полученных результатов наблюдений авторы пришли к выводу, что общая площадь ледового покрова Арктики сокращается, однако потепление в конце века не может быть объяснено только естественными факторами, а также является следствием антропогенного влияния.

Авторы работы [12] затрагивают вопросы применения методов дистанционного зондирования для диагностики состояния ледового покрова Арктики. Проведен анализ использования различных спутниковых датчиков на предмет идентификации ледового покрова. Особое внимание в этой работе уделяется применяемым алгоритмам обработки радиотепловых изображений для получения карт сплоченности морского льда. Также указаны преимущества и недостатки дешифрирующих алгоритмов, применяемых при обработке спутниковой информации с различных типов датчиков.

---

Все перечисленные работы представляют большой научный и практический интерес. Выполненный обзор проведенных исследований показал, что авторы в своих работах активно используют методы дистанционного зондирования земли для оценки ледового покрова. В основном, результаты этих измерений служат решению глобальных задач изучения многолетней климатической изменчивости. В работах уделяется большое внимание результатам применения полученных со спутников данных, а методология структурирования и классификации конкретных данных о ледовитости исследуемых водных объектов недостаточно описана. Таким образом, можно сделать вывод о том, что многозональная спутниковая съемка имеет существенные преимущества перед остальными методами оценки ледовой обстановки водоемов и является мощным инструментом для формирования подробных временных рядов ледовых характеристик исследуемых водоемов с целью их статистического анализа. Однако в настоящее время является нерешенной проблема идентификации конкретных водоемов на изображении, поскольку алгоритмы дешифрирования не способны отличить исследуемый водоем от других водоемов на изображении. Классифицировать наблюдаемый водоем на изображении посредством визуального анализа трудоемко, поскольку количество изображений, полученных спутниковой съемкой с высокой периодичностью, может быть значительным (более 1000). Недостатком такого способа так же является наличие возможных погрешностей в определении контура объекта. Поэтому для массового анализа снимков с целью получения данных о водоеме необходимо разработать методику автоматизированного анализа спутниковых данных, которая позволит получать конкретное значение показателя ледовитости выбранного водоема с идентификацией этого водоема на изображениях спутниковых снимков или карт.

---

**Благодарность за финансовую поддержку работы.** Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых МК-3379.2018.5.

### Литература

1. Karetnikov S.G., Naumenko M.A. Recent trends in Lake Ladoga ice cover // *Hydrobiologia*. - 2008. - Vol.599. - № 1. - pp. 41–48.
2. Magnuson J.J. Historical Trends in Lake and River Ice Cover in the Northern Hemisphere // *Science*. - 2000. - Vol.289. - № 5485. - pp. 1743–1746.
3. Stroeve J.C., Serreze M.C., Holland M.M., Kay J.E., Malanik J., Barrett A.P. The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: A research synthesis // *Climatic Change*. - 2012. - Vol.110. - № 3-4. - pp. 1005–1027.
4. Brown L.C., Duguay C.R. The response and role of ice cover in lake-climate interactions // *Progress in Physical Geography*. - 2010. - Vol.34. - № 5. - pp. 671–704.
5. Усачев В.Ф., Прокачева В.Г., Бородулин В.В. Оценка динамики озерных льдов, снежного покрова и речных заливов дистанционными средствами - Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. - 103 с.
6. Comiso J.C., Sullivan C.W. Satellite microwave and in situ observations of the Weddell Sea ice cover and its marginal ice zone // *Journal of geophysical research: Oceans*. - 1986. - Vol.91. - №C8. - pp. 9663–9681.
7. Kouraev A. V., Semovski S. V., Shimaraev M.N., Mognard N.M., Lagresy B., Remy F. Observations of Lake Baikal ice from satellite altimetry and radiometry // *Remote Sensing of Environment*. - 2007. - Vol.108. - № 3. - pp. 240–253.
8. Kouraev A. V., Shimaraev M.N., Remy F., Naumenko M.A., Zakharova E., Suknev A. Ice Cover Of Eurasian Water Bodies And Rivers From Satellite

And In Situ Observations. // ESA Living Planet Symposium. - 2013. - №2. - pp. 120-132.

9. Rybushkina G.B., Troitskaya Y.I., Soustova I.A. Ice cover determination of the lakes of Baltic and White sea basins on the base of Jason-2 satellite observations // Baltic International Symposium (BALTIC). - 2014. - pp. 108-120

10. Баклагин В.Н. Результаты анализа спутниковых данных о температуре поверхности воды Белого моря // Инженерный вестник Дона, 2017, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4075

11. Баклагин В.Н. Совершенствование метода дешифрирования космических снимков больших озер на классы «вода» - «лед» // Современные проблемы науки и образования. 2015. №2 URL: science-education.ru/ru/article/view?id=23900

12. Репина И.А., Иванова В.В. Применение методов дистанционного зондирования в исследовании динамики ледового покрова и современной климатической изменчивости Арктики // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2012. - Т.9. - №5. - С. 89–103.

13. Cavalieri D.J., Gloersen P., Campbell W.J. Determination of sea ice parameters with the NIMBUS 7 SMMR // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. - 1984. - Vol.89. - № D4. - pp. 5355–5369.

14. Comiso J.C. Characteristics of Arctic winter sea ice from satellite Multispectral Microwave Observations // Journal of Geophysical Research. - 1986. - Vol.91. - №C1. - pp. 975–994.

15. Kaleschke L., Lüpkes C., Vihma T., Haarpaintner J., Bochert A., Hartmann J., Heygster G. SSM/I Sea Ice Remote Sensing for Mesoscale Ocean-Atmosphere Interaction Analysis // Canadian Journal of Remote Sensing. - 2001. - Vol.27. - № 5. - pp. 526–537.

---

16. Swift C.T., Fedor L.S., Ramseier R.O. An algorithm to measure sea ice concentration with microwave radiometers // Journal of Geophysical Research. - 1985. - Vol.90. - № C1. - pp. 1087–1099.

17. Баклагин В.Н. Реализация распараллеливания алгоритмических структур, моделирующих экосистему озерных объектов, на многоядерные процессоры // Инженерный вестник Дона, 2013, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1750

18. Баклагин В.Н. Построение математической модели котловины онежского озера // Инженерный вестник Дона, 2013, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1767

19. Eerola K., Rontu L., Kourzeneva E. Impact of partly ice-free Lake Ladoga on temperature and cloudiness in an anticyclonic winter situation-a case study using a limited area model // Tellus A. - 2014. - Vol.1. - pp. 1–17.

20. Kheyrollah Pour H., Duguay C.R., Martynov A., Brown L.C. Simulation of surface temperature and ice cover of large northern lakes with 1-D models: A comparison with MODIS satellite data and in situ measurements // Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography. - 2012. - Vol.64. - № 1. – pp. 1–19

21. Kheyrollah Pour H., Rontu L., Duguay C. Impact of satellite-based lake surface observations on the initial state of HIRLAM. Part II: Analysis of lake surface temperature and ice cover // Tellus A. - 2014. - Vol.1. - pp. 1–18.

22. Kheyrollah Pour H., Duguay C.R., Solberg R., Rudjord Y. Impact of satellite-based lake surface observations on the initial state of HIRLAM. Part I: evaluation of remotely sensed lake surface water temperature observations // Tellus A. - 2014. - Vol.66. - pp. 1–12.

23. Kouraev A. V., Shimaraev M.N., Buharizin P.I., Naumenko M.A., Crétaux J.F., Mognard N., Legrsy B., Rémy F. Ice and snow cover of continental water bodies from simultaneous radar altimetry and radiometry observations // Surveys in Geophysics. - 2008. - Vol.29. - № 4-5. - pp. 271–295.

---

24. Johannessen O.M. Satellite Evidence for an Arctic Sea Ice Cover in Transformation // Science. - 1999. - Vol.286. - № 1. - pp. 1937–1939.

25. Йоханнессен О.М., Бобылев Л.П., Кузьмина С.И. Изменчивость климата Арктики в контексте глобальных изменений // Вычислительные технологии. - 2005. - Т.10. - № 2. - С. 56–62.

### References

1. Karetnikov S.G., Naumenko M.A. Hydrobiologia. 2008. Vol.599. № 1. pp. 41–48.

2. Magnuson J.J. Science. 2000. Vol.289. № 5485. pp. 1743–1746.

3. Stroeve J.C., Serreze M.C., Holland M.M., Kay J.E., Malanik J., Barrett A.P. Climatic Change. 2012. Vol.110. № 3-4. pp. 1005–1027.

4. Brown L.C., Duguay C.R. Progress in Physical Geography. 2010. Vol.34. № 5. pp. 671–704.

5. Usachev V.F., Prokacheva V.G., Borodulin V.V. Ocenka dinamiki ozernyh l'dov, snezhnogo pokrova i rechnyh zalivov distancionnymi sredstvami [Estimation of dynamics of lake ice, snow cover and river bays by remote means] Leningrad: Gidrometeizdat, 1985. 103 p.

6. Comiso J.C., Sullivan C.W. Journal of geophysical research: Oceans. 1986. Vol.91. №S8. pp. 9663–9681.

7. Kouraev A. V., Semovski S. V., Shimaraev M.N., Mognard N.M., Lagresy B., Remy F. Remote Sensing of Environment. 2007. Vol.108. № 3. pp. 240–253.

8. Kouraev A. V., Shimaraev M.N., Remy F., Naumenko M.A., Zakharova E., Suknev A. ESA Living Planet Symposium. 2013. №2. pp. 120-132.

9. Rybushkina G.B., Troitskaya Y.I., Soustova I.A. Ice cover determination of the lakes of Baltic and White sea basins on the base of Jason-2 satellite observations Baltic International Symposium (BALTIC). 2014. pp. 108-120

10. Baklagin V.N. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4075](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4075)

11. Baklagin V.N. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija*. 2015. №2 URL: [science-education.ru/ru/article/view?id=23900](http://science-education.ru/ru/article/view?id=23900)
  12. Repina I.A., Ivanova V.V. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2012. V.9. №5. pp. 89–103.
  13. Cavalieri D.J., Gloersen P., Campbell W.J. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1984. Vol.89. № D4. pp. 5355–5369.
  14. Comiso J.C. *Journal of Geophysical Research*. 1986. Vol.91. №C1. pp. 975–994.
  15. Kaleschke L., Lüpkes C., Vihma T., Haarpaintner J., Bochert A., Hartmann J., Heygster G. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 2001. Vol.27. № 5. pp. 526–537.
  16. Swift C.T., Fedor L.S., Ramseier R.O. *Journal of Geophysical Research*. 1985. Vol.90. № C1. pp. 1087–1099.
  17. Baklagin V.N. *Inženernyj vestnik Dona (Rus)*, 2013, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1750](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1750)
  18. Baklagin V.N. *Inženernyj vestnik Dona (Rus)*, 2013, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1767](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1767)
  19. Eerola K., Rontu L., Kourzeneva E. *Tellus A*. 2014. Vol.1. pp. 1–17.
  20. Kheyrollah Pour H., Duguay C.R., Martynov A., Brown L.C. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2012. Vol.64. № 1. pp. 1–19
  21. Kheyrollah Pour H., Rontu L., Duguay C. *Tellus A*. 2014. Vol.1. pp. 1–18.
  22. Kheyrollah Pour H., Duguay C.R., Solberg R., Rudjord Y. *Tellus A*. 2014. Vol.66. pp. 1–12.
  23. Kouraev A. V., Shimaraev M.N., Buharizin P.I., Naumenko M.A., Crétaux J.F., Mognard N., Legrsy B., Rémy F. *Surveys in Geophysics*. 2008. Vol.29. № 4-5. pp. 271–295.
  24. Johannessen O.M. *Science*. 1999. Vol.286. № 1. pp. 1937–1939.
-



25. Johannessen O.M., Bobylev L.P., Kuz'mina S.I. Vychislitel'nye tehnologii. 2005. V.10. № 2. pp. 56–62.