

Особенности формирования и межгодовой изменчивости весеннего термобара Ладожского озера в 2016–2022 гг.

А. А. Коник¹, А. В. Зимин^{1,2}, О. А. Атаджанова¹, А. В. Исаев¹

¹ *Институт океанологии им. П. П. Shirshova РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: konikrshu@gmail.com*

² *Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, 199034, Россия*

Термобар представляет собой сезонную термическую фронтальную зону, формирующуюся в весенний и осенний период года в крупнейшем в Европе димиктическом Ладожском оз. Термобар характеризуется большими горизонтальными градиентами температуры, оказывает значительное влияние на формирование стратификации в озере, фоновую циркуляцию озера и генерацию вихревых структур. В настоящей работе предпринята попытка оценить физико-географические особенности и факторы, влияющие на изменчивость весеннего термобара Ладожского оз., по данным многолетних спутниковых измерений радиометров MODIS/VIIRS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer/Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) за период с мая по июнь 2016–2022 гг. В рамках работы показано, что среднемноголетнее положение основного фронта озера в июне сместилось по сравнению с климатическим положением, а площадь его термоактивной зоны в последние годы устойчиво возрастает. Основными факторами, определяющими пространственно-временную изменчивость термобара, являются условия зимнего охлаждения, внутрисезонные аномалии температуры атмосферы и характер атмосферной циркуляции, который описывается индексом атмосферной осцилляции SCAND (*англ.* Scandinavian pattern). Изменчивость вихревой динамики в озере соотносится с периодами минимумов и максимумов площади термоактивной зоны, что показывает связь между сроками формирования стратификации и циркуляции вод озера.

Ключевые слова: термобар, фронт, вихри, спутниковая температура, Aqua, Terra, Suomi NPP, SCAND, Ладожское озеро

Одобрена к печати: 22.07.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-264-273

Введение

Ладожское оз. представляет собой классический пример димиктического водоёма (Филатов, 2019), для которого характерна чёткая сезонная динамика термической стратификации. Ключевой особенностью такого типа озёр выступает формирование термобара — фронтальной зоны, возникающей в периоды весеннего прогрева и осеннего охлаждения вод и разделяющей озеро на две части (Блохина, Показеев, 2015; Тихомиров, 1982; Hyang, 1972). Формирование термобара в озёрах связано с одной из аномалий пресной воды. Температура её максимальной плотности наблюдается примерно при 4 °C. В области термобара воды опускаются до дна, формируя гидрологический фронт, который разделяет водоём на изолированные области с разными видами вертикальной стратификации вод по температуре: теплоактивную зону (ТАЗ) и теплоинертную зону (ТИЗ).

Следует подчеркнуть, что весенний термобар всегда присутствует на акватории Ладожского оз. в мае–июне и считается важным элементом годового гидрологического цикла озера, определяя начальную фазу сезонной стратификации и последующее формирование летнего термоклина. Изначально термический бар образуется в прибрежных мелководных районах, где создаются оптимальные условия для его возникновения. По мере сезонного прогрева водной толщи наблюдается постепенная миграция этой фронтальной зоны в направлении глубоководных участков водоёма (Современное..., 2021). Маркером скорости движения термобара служит изменение площади ТАЗ. Динамика термобара определяет особенности вертикального и горизонтального перемешивания вод (Блохина, Показеев,

2015), оказывает влияние на распределение взвешенных веществ, антропогенных загрязнений и планктонных организмов (Куликов и др., 1993; Isaev et al., 2024). Данные изменения требуют постоянного мониторинга и углублённого изучения, так как они оказывают значимое влияние на гидрологический режим и экологическое состояние всего Ладожского оз. Изучение весеннего термобара в Ладожском оз. приобретает особую актуальность в связи с наблюдаемыми климатическими изменениями, существенно влияющими на сроки его формирования и динамику (Современное..., 2021). Понимание современных особенностей этого гидрофизического явления необходимо для прогнозирования изменений в экосистеме озера, основного источника водоснабжения Санкт-Петербурга.

В настоящее время наиболее перспективным направлением становится использование спутниковых наблюдений для оценки характеристик термобара (Михайлов и др., 2021; Сутырина, 2014), особенно с учётом их высокой пространственно-временной детализации. Современные методы дистанционного зондирования, включая мультиспектральные и радиолокационные данные, позволяют оперативно определять положение термического бара и получать оценки скорости его передвижения через озеро.

В Ладожском оз. наибольшее влияние на перемещение данного фронта оказывают метеорологические условия (температура воздуха, интенсивность радиационного прогрева, скорость и направление ветра), ледовые условия, а также морфометрические характеристики. В первых работах по анализу данных *in situ* измерений и моделирования термического бара (Тихомиров, 1982; Филатов, 2019; Malm et al., 1993, 1994) указывалось, что поверхностный нагрев и интенсивность вертикального перемешивания представляются основными механизмами, приводящими фронт в движение. В период окончания становления фронта в озере поверхностная адвекция может резко ускорить его движение (Науменко, Каретников, 1998). Суровость предшествующей зимы, выраженная в длительности ледового периода и дате вскрытия, также может влиять на сроки формирования термобара, отодвигая момент начала прогрева поверхности (Ладожское..., 2015).

Важнейший фактор движения фронта — ветровое напряжение, которое имеет гораздо больший вклад, нежели фоновая циркуляция озера (Malm et al., 1993). Ветровой режим над озером хорошо отражает изменчивость регионального атмосферного индекса SCAND (англ. Scandinavian pattern) (Современное..., 2021). Так, когда индекс положительный над Скандинавией, формируется антициклон. Это приводит к ослаблению ветра над акваторией озера и к интенсификации поступления холодных воздушных масс из Арктики. В результате формирование и движение термобара происходит медленно. В периоды отрицательных фаз SCAND происходит интенсификация вторжений воздушных масс с Атлантического океана, что ведёт к усилению западных и юго-западных ветров и притоку тёплого воздуха. Это способствует перемешиванию и прогреву вод озера, приводя к интенсификации движения термического бара.

Согласно климатическим оценкам (Ладожское..., 2015) термобар в Ладожском оз. существует в среднем более двух месяцев с начала мая до 10 июля. Оценка климатических соотношений температуры поверхности воды и приводного слоя воздуха в период весеннего прогрева Ладожского оз. (Науменко, 2021) показала наличие значительных межгодовых вариаций исчезновения бара от одной до четырёх недель относительно климатической даты.

Мезомасштабная и субмезомасштабная вихревая динамика в озере — важный фактор, который влияет на перемешивание, транспорт тепла и формирование стратификации. Как было показано ранее (Зимин и др., 2024а, б; Коросов и др., 2006; Malm et al., 1994), множество малых вихрей довольно часто формируются вблизи границы основного фронта бара. Потенциально, интенсивность субмезомасштабного вихревого обмена должна увеличивать скорость перемещения фронта за счёт транспорта более тёплых вод из ТАЗ в ТИЗ. Однако такая оценка для Ладожского оз. на основе анализа многолетней изменчивости проявлений вихрей ранее не проводилась.

Отметим, что большинство работ по изменчивости характеристик термобара Ладожского оз. основываются на данных *in situ* измерений XX в. и не охватывают период современных климатических изменений (Ладожское..., 2015; Науменко, 2021). Между тем в последние

десятилетия региональные климатические условия претерпевают существенные трансформации, выражающиеся в учащающихся волнах тепла, усилении интенсивности атмосферных вторжений и увеличении облачности (Bardin et al., 2024; Groisman et al., 2017; Lind et al., 2023). Эти процессы потенциально изменяют ледовые условия и характеристики динамического режима озера, что, в свою очередь, влияет на формирование, структуру и продолжительность весеннего термического бара. Хотелось бы подчеркнуть, что значительное число доступных спутников позволяет значительно увеличить количество рассматриваемых температурных полей озера даже в условиях частой облачности, что, в свою очередь, позволяет сформировать более детальную картину динамики термобара.

Цель настоящего исследования состоит в оценке межгодовой изменчивости весеннего термобара Ладожского оз. (2016–2022), определении роли атмосферных условий в его формировании и анализе связи между характеристиками термобара и интенсивностью субмезомасштабной вихревой динамики.

Данные и методы

Для оценки положения термобара Ладожского оз. привлекались 6405 мгновенных дневных полей температуры поверхности (*табл. 1*), полученных по данным спутниковых приборов MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)/Aqua, MODIS/Terra и VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite)/Suomi-NPP с сайта <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov> за период с мая по июнь 2016–2022 гг. Точность восстановления данных температуры поверхности озера варьируется в диапазоне 0,5–1 °C. Пространственное разрешение привлечённых данных уровня обработки L2, включающих в себя время измерения, географическую привязку и обработку исходного сигнала с учётом атмосферной коррекции, составляло от 700 м до 1 км. После загрузки исходных полей выполнялась их фильтрация по маркерам качества (параметр *SST_qual*), после которой в сетке значений температуры оставляли только данные маркеров 0 (отличное), 1 (хорошее) и 2 (среднее). Также проводилась фильтрация по пространству — были использованы только спутниковые поля, покрывающие не менее чем 20 % площади озера. В итоге для анализа было подготовлено 1133 поля температуры поверхности Ладожского оз. Ликвидация избыточной информации окрестных с Ладожским озером выполнялась построением векторного полигона, совпадающего с границами озера. Далее методом линейной интерполяции все измерения приводились к единой пространственной сетке с масштабом 1 км и осреднялись посуточно. Для сравнения положения изотермы 4 °C по спутниковым данным с климатическим положением из работы (Современное..., 2021) были подготовлены суточные спутниковые поля за 15 мая и 15 июня, которые затем осреднялись за рассматриваемый период с 2016 по 2022 г.

Таблица 1. Количество спутниковых полей температуры и радиолокационных изображений

Спутник	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
MODIS/Aqua	34	32	45	42	50	33	39
MODIS/Terra	31	37	44	49	58	32	45
VIIRS/Suomi NNP	72	56	91	78	106	76	83
Sentinel-1A/B	51	146	157	148	137	134	77

Оценка расчёта площади ТАЗ выполнялась на основе осреднённых за май и июнь суточных спутниковых полей температуры поверхности воды. Для количественной оценки использовалась суммарная площадь пикселей с температурой поверхности воды ≥ 4 °C каждого среднемесячного поля. Средняя скорость движения термобара в мае определялась как изменение площади ТАЗ, оценённое за две разнесённые на месяц декады (с 1 по 10 мая и с 1 по 10 июня).

Анализ вихревых структур выполнялся на основе 850 изображений (*табл. 1*) радиолокаторов с синтезированной апертурой со спутников Sentinel-1A/B с сайта <https://search.asf.alaska.edu> за май и июнь. Использовались радиолокационные изображения (РЛИ) в С-диапазоне и режимах съёмки IW (*англ.* Interferometric Wide) с разрешением 20 м и шириной полосы обзора 250 км и EW (*англ.* Extra-Wide Swath) с разрешением 40 м и шириной полосы обзора 400 км. Регистрация вихрей на РЛИ и оценка количества их проявлений на поверхности озера выполнялась на основе метода, подробно представленного в работе (Зимин, 2024б).

Наибольшая обеспеченность (214 шт.) данными полей поверхностной температуры была в 2020 г., меньше всего качественных термических съёмок отмечалось в 2016 г. (125 шт.). Данные по радиолокационным изображениям также разнятся — максимум (157 шт.) был в 2018 г., а минимум — в 2016 г. (51 шт.). Максимальное покрытие отмечается в центральной части бассейна, а меньше всего изображений приходится на восточную часть озера.

Для оценки факторов, влияющих на межгодовую изменчивость положения термобара и площади ТАЗ, привлекались данные температуры воздуха из атмосферного реанализа ERA-5 (Hersbach et al., 2023) за зимы 2016–2022 гг. Был выполнен расчёт интегрального параметра — сумма градусо-дней мороза (СГДМ) — как суммы отрицательной среднесуточной температуры воздуха между датами устойчивого перехода температуры через 0 °С (Пищальник и др., 2016). Значения атмосферного индекса SCAND были получены с сайта <https://www.cpc.ncep.noaa.gov> за май 2016–2022 гг. Для описания особенностей погодных условий над озером привлекались среднemesячные данные о температуре воздуха и скорости ветра с метеостанции о. Валаам (с сайта <https://rp5.ru>) за тот же период.

Результаты

На *рис. 1* представлены климатические положения основного фронта термобара и положения по осреднённым спутниковым измерениям за 15 мая и 15 июня.

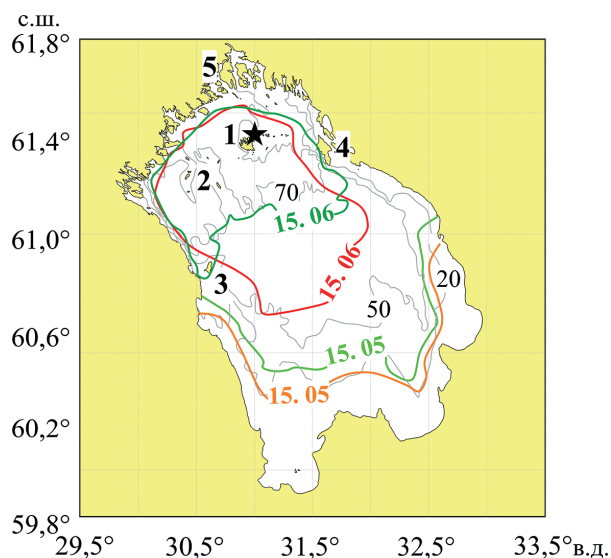


Рис. 1. Положение термобара по климатическим *in situ* данным за XX в. (оранжевый/красный) (Современное..., 2021) и осреднённым спутниковым полям (светло-зелёный/тёмно-зелёный) за 15 мая и 15 июня. Серыми линиями показано положение изобат 20, 50 и 70 м; 1 — арх. Валаам; 2 — Западный арх.; 3 — о. Коневец; 4 — о. Мантсинсаари; 5 — о. Риеккалансаари

Из *рис. 1* видно, что среднее положение весеннего термобара в оба месяца сместилось относительно климатических данных. Светло-зелёная линия, соответствующая спутниковым данным на 15 мая, располагается южнее климатического положения (оранжевая

линия) над глубинами около 25 м. К 15 июня, согласно спутниковым наблюдениям (тёмно-зелёная линия), фронт смещается к северу, достигая границ изобаты 70 м, включая районы арх. Валаам и о. Мантсинсаари, тогда как его климатическое положение (красная линия) сохраняется значительно южнее, проходя практически через центральную часть Ладожского оз. Вместе с тем произошло существенное увеличение площади ТАЗ. На 15 мая, согласно климатическим оценкам, площадь стратифицированных вод (с температурой поверхности $\geq 4^\circ\text{C}$) Ладожского оз. составляла 3610 км^2 (20 % от общей площади озера), в то время как спутниковые данные показывают большую площадь — 5010 км^2 (27 %). На момент 15 июня отмечается более существенная разница: $12\,790\text{ км}^2$ (70 %) против $14\,620\text{ км}^2$ (80 %). Результаты сравнительного анализа показывают более активную динамику термобара и существенное более раннее смещение области ТАЗ в глубоководную часть озера в последние годы. Такое положение наглядно демонстрирует влияние изменений регионального климата (Bardin et al., 2024; Groisman et al., 2017; Lind et al., 2023) на гидродинамический режим озера.

Анализ пространственных карт средних положений термобара за июнь показал, что его интерпретация осложнена сильной внутримесячной изменчивостью. Например, в 2017 г. последние проявления фронта на поверхности по спутниковым данным регистрируются до 24 июня, в то время как в 2020 г. термобар в озере не отмечается уже после 12 июня. При этом, согласно климатическим данным (Ладожское..., 2015), термобар сохраняется до 10 июля. Поэтому для описания межгодовой изменчивости термобара использовались его осреднённые положения только за май, когда он всегда присутствует на поверхности. Результаты наиболее различных по площади ТАЗ за 2017 и 2020 гг. визуализированы на *рис. 2*.

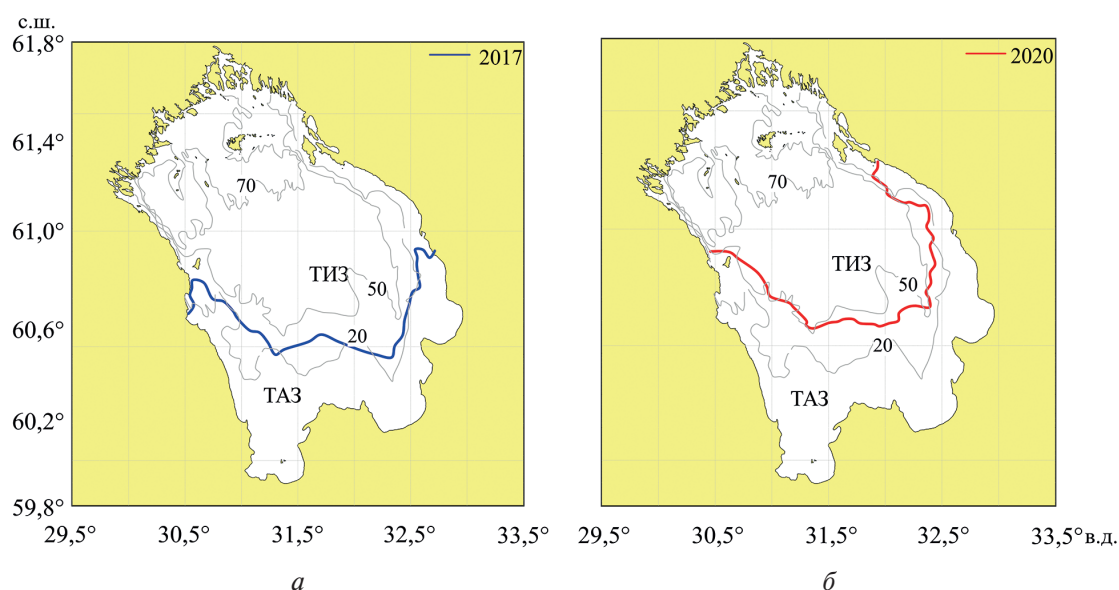


Рис. 2. Среднее положение весеннего термобара за май 2017 г. с минимальной площадью термоактивной зоны (*а*) и май 2020 г. с максимальной площадью термоактивной зоны (*б*). ТАЗ — термоактивная зона; ТИЗ — теплоинертная зона. Серыми линиями показано положение изобат 20, 50 и 70 м

Для оценки межгодовой изменчивости весеннего термобара были проанализированы данные, представленные в *табл. 2*.

Пространственная изменчивость положения термобара (см. *рис. 2а*) за май в период минимальной площади ТАЗ (*табл. 2*, 5381 км^2) в 2017 г. характеризуется его положением вблизи изобаты 20 м. Фронт протягивается от северной оконечности о. Коневец до восточного берега через южную часть Ладожского оз. В мае 2020 г. (см. *рис. 2б*), когда площадь ТАЗ максимальна (*табл. 2*, 7876 км^2), термобар начинается от южной части о. Коневец, проходя вблизи изобаты 50 м через центральную часть озера, и заканчивается недалеко от о. Мантсинсаари на востоке. Отметим, что в целом в 2018, 2019 гг. положение фронта в мае

схоже с 2017 г., а в 2016, 2021, 2022 гг. — с 2020 г. Основной межгодовой пространственный сдвиг фронта происходит вблизи вытянутого свала глубин в юго-восточной части озера в районе 60,6° с.ш. и 32,4° в.д. и вдоль восточного берега Ладожского оз., когда фронт достигает о. Мантсинсаари на востоке.

Таблица 2. Межгодовые количественные оценки площади термического бара и факторов, влияющих на его изменчивость

Год	S ТАЗ ТБ, км ²	СГДМ	Индекс SCAND	NumEd		V, км ² /мес	T _a , °C	V _в , м/с
				май	июнь			
2016	7032 (38 %)	492	1,05	—	—	7350	10,2	2,7
2017	5381 (29 %)	445	0,95	21	61	6050	4,9	2,9
2018	6051 (33 %)	579	1,69	23	5	6220	9,4	2,5
2019	6611 (36 %)	466	–0,11	20	35	6400	6,9	2,6
2020	7876 (43 %)	120	–2,37	5	14	9200	7,5	3,5
2021	7117 (39 %)	303	–1,06	16	24	8190	6,6	2,8
2022	6896 (38 %)	298	–1,50	32	1	8175	5,7	2,8

Примечание: S ТАЗ ТБ — площадь термоактивной зоны термобара за май, в скобках указана доля (в %) от всей площади озера; СГДМ — сумма градусо-дней мороза (за холодный период года); SCAND — индекс SCAND за май; NumEd — количество вихрей за май–июнь; V — скорость движения термобара с юга на север за май; T_a — среднемесячная температура воздуха на метеорологической станции о. Валаам; V_в — среднемесячная скорость ветра на метеорологической станции о. Валаам.

Суровость предшествующей зимы, которая характеризуется интегральным параметром СГДМ (табл. 2) и позволяет классифицировать условия года как холодные и тёплые, по своей изменчивости схожа с колебаниями площади ТАЗ. Наиболее «суровая» зима наблюдалась в 2018 г., когда сумма отрицательной температуры приземного слоя воздуха составила 579 градусо-дней и прогретая область фронта занимала наименьшую площадь. Напротив, в 2020 г. при минимальной сумме отрицательной температуры (120 градусо-дней) ТАЗ фронта была максимальной, что указывает на связь между суровостью зимы и масштабами весеннего прогрева. Индекс атмосферной осцилляции SCAND за май в целом схож с изменчивостью площади ТАЗ: в период минимальной площади (2017, 2018) чаще отмечается положительный индекс (0,95, 1,69), а в периоды максимальной (2020, 2021, 2022) — отрицательный (–2,37, –1,06, –1,5). Полученные результаты хорошо согласуются с метеорологическими наблюдениями на станции о. Валаам. Так, в наиболее холодном 2017 г., когда площадь ТАЗ была минимальной, среднемесячная температура воздуха в мае составила 4,9 °C при средней скорости ветра 2,9 м/с. В тёплом 2020 г., когда площадь ТАЗ достигала максимума, среднемесячная температура воздуха в мае была выше — 7,5 °C, как и средняя скорость ветра — 3,5 м/с. Стоит отметить, что в другие годы, например, в 2016 и 2018, наблюдается более высокая средняя температура воздуха (10,2 и 9,4 °C), однако средняя скорость ветра ниже, чем в 2020 г., и составляет 2,7 и 2,9 м/с соответственно. Таким образом, для быстрого перемещения термобара через озеро в мае необходимо действие сразу нескольких атмосферных факторов — большой среднемесячной температуры воздуха и скорости надводного ветра.

Скорость движения термобара (табл. 2) соотносится с выделением по оценкам площади термоактивной зоны холодных и тёплых годов. Так, в холодные 2017–2019 гг. термобар медленнее передвигался с северной в южную часть Ладожского оз., в то время как в тёплые 2016 г., 2020–2022 гг. его скорость была на порядок выше. Максимальная разница в скорости между холодным 2017 и тёплым 2020 г. составила 3150 км²/мес или 17 % от всей площади озера.

Отдельно стоит выделить весенний термобар 2016 г. Из табл. 2 видно, что площадь ТАЗ в этот период близка к максимальным значениям, однако наблюдалась положительная ано-

малия SCAND в весенний период (1,05), а также довольно устойчивая зима с большим числом дней с отрицательной температурой воздуха (492 градусо-дня мороза). В результате даже в условиях суровой зимы и интенсификации переносов с юга на север, в условиях некоторого смещения от обычного положения, блокирующего Скандинавский антициклон, могут возникать ситуации, когда термобар достаточно быстро движется через Ладожское оз. в течение весны — начала лета, что подтверждается оценками скорости (табл. 2). Этот пример показывает наличие многофакторности процессов, которые формируют динамику весеннего термобара.

Анализ межгодовой изменчивости (табл. 2) между площадью ТАЗ и проявлениями вихревых структур показал неоднозначную связь между этими параметрами. В мае в тёплые годы (2020–2022) наблюдаются как минимум (5 структур), так и максимум (32 структуры) вихреобразования, тогда как в холодные 2017–2019 гг. значения остаются относительно стабильными (20–23 структуры). В июне максимум проявлений смещается в холодные 2017–2019 гг., в то время как в тёплые 2020–2022 гг. вихрей регистрируется значительно меньше. Такая межгодовая изменчивость может быть обусловлена различиями в сроках формирования термобара и установления устойчивой стратификации. В тёплые годы фронт, вероятно, формировался уже к маю, что ограничивало вихреобразование. Напротив, в холодные годы стратификация устанавливалась позже, и максимум проявлений приходился на июнь — июль. Стоит также учитывать, что на проявления вихрей на РЛИ могло влиять маскирующее воздействие ветра.

Таким образом, для корректной интерпретации влияния динамики термобара на вихревую активность необходимо проведение подспутниковых экспериментов, направленных на получение количественных оценок для создания высокоразрешающей математической модели данного уникального явления.

Заключение

На основе анализа осреднённых многолетних архивов спутниковых измерений температуры поверхности были оценены физико-географические характеристики весеннего термобара Ладожского оз. за период с мая по июнь 2016–2022 гг.

Анализ спутниковых наблюдений за 2016–2022 гг. показал, что весенний термобар Ладожского оз. в последние годы смещается в более глубоководные южные районы, достигая изобаты 50 м в мае. Это сопровождается увеличением площади термоактивной зоны, которая в тёплые годы (например, 2020) достигает 7876 км², тогда как в холодные годы (2017) она минимальна — 5381 км². Основными факторами, определяющими такие изменения, становятся условия зимнего периода и майские особенности атмосферной циркуляции, включая ослабление или усиление переноса воздушных масс с Северной Европы. Особое значение имеют и внутрисезонные аномалии: в 2016 г., несмотря на холодную зиму и слабый перенос, фронт быстро сместился, что указывает на необходимость учёта дополнительных динамических факторов. Эти наблюдения согласуются с классическими представлениями о роли атмосферы в формировании и изменчивости термобара.

Анализ вихреобразования в озере показал, что минимум и максимум числа проявлений вихрей нужно рассматривать за весь период формирования фронта, а не за отдельные месяцы. Ключевым элементом для понимания вихревой активности представляется срок формирования устойчивой стратификации, так как он может смещать пик вихревого обмена на более поздние месяцы.

Работа выполнена при поддержке грантов Российского научного фонда «Оценка влияния внешней биогенной нагрузки на функционирование экосистемы Ладожского озера в условиях меняющегося климата по результатам трёхмерного математического моделирования», проект № 23-17-20010 (<https://rscf.ru/project/23-17-20010/>), и Санкт-Петербургского научного фонда, проект № 23-17-20010.

Литература

1. Блохина Н. С., Показеев К. В. Уникальное природное явление — термобар // Земля и Вселенная. 2015. № 6. С. 78–88.
2. Зимин А. В., Атаджанова О. А., Благодатских Е. А. и др. (2024а) Субмезомасштабные вихревые структуры Ладожского озера по радиолокационным данным Sentinel-1 за теплый период 2019–2022 гг. // Докл. РАН. Науки о Земле. 2024. Т. 514. № 2. С. 350–355. <https://doi.org/10.31857/S2686739724020201>.
3. Зимин А. В., Атаджанова О. А., Коник А. А., Исаев А. В. (2024б) Субмезомасштабные вихри в Ладожском озере по данным радиолокационных изображений Sentinel-1 с января по декабрь 2016–2022 гг. // Фундам. и приклад. гидрофизика. 2024. Т. 17. № 4. С. 43–54. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(4\)-3](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(4)-3).
4. Коросов А. А., Поздняков Д. В., Филатов Н. Н. и др. Изучение сезонной и пространственной изменчивости некоторых экопараметров в Ладожском озере по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 5. С. 76–85.
5. Куликов И. В., Яковлева Т. В., Михалюк Т. Ю. Площадное распространение основных техногенных компонентов в Ладожском озере // Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера / под ред. Н. Н. Давыдовой, Б. И. Кошечкина. СПб.: Изд-во РГО, 1993. С. 36–48.
6. Ладожское озеро и достопримечательности его побережья: Атлас / под ред. В. А. Румянцева. СПб.: Нестор-История, 2015. 200 с.
7. Михайлов В. В., Сутырина Е. Н., Антонова Т. И. Изучение характеристик весеннего термобара в наиболее крупных заливах оз. Байкал по данным дистанционного спутникового зондирования // Актуальные исслед. 2021. № 31(58). С. 17–20.
8. Науменко М. А. Особенности климатических соотношений температуры поверхности воды и приводного слоя воздуха в период весеннего прогрева Ладожского озера // Фундам. и приклад. гидрофизика. 2021. Т. 14. № 2. С. 78–88. <https://doi.org/10.7868/S2073667321020076>.
9. Науменко М. А., Каретников С. Г. О скорости движения весенней термической фронтальной зоны в Ладожском озере // Метеорология и гидрология. 1998. № 4. С. 107–115.
10. Пищальник В. М., Романюк В. А., Минервин И. Г., Батухтина А. С. Анализ динамики аномалий ледовитости Охотского моря в период с 1882 по 2015 г. // Изв. ТИНРО. 2016. Т. 185. С. 228–239.
11. Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / под ред. С. А. Кондратьева, Ш. Р. Позднякова, В. А. Румянцева. М.: Изд-во РАН, 2021. 640 с.
12. Сутырина Е. Н. Изучение особенностей ледово-термического режима озера Хубсугул с применением данных радиометра AVHRR // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 190–199.
13. Тихомиров А. И. Термика крупных озер. Л.: Наука, 1982. 232 с.
14. Филатов Н. Н. Состояние и перспективы исследований гидрофизических процессов и экосистем внутренних водоемов (обзор) // Фундам. и приклад. гидрофизика. 2019. Т. 12. № 1. С. 3–14. <https://doi.org/10.7868/S2073667319010015>.
15. Bardin M. Yu., Platove T. V., Samokhina O. F. Extreme heat waves and extreme summer seasons in European Russia // Russian Meteorology and Hydrology. 2024. V. 49. No. 6. P. 467–481. <https://doi.org/10.3103/S1068373924060013>.
16. Groisman P., Shugart H., Kicklighter D. et al. Northern Eurasia Future Initiative (NEFI): facing the challenges and pathways of global change in the twenty-first century // Progress in Earth and Planetary Science. 2017. V. 4. Article 41. 48 p. <https://doi.org/10.1186/s40645-017-0154-5>.
17. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S), Climate Data Store (CDS), 2023. <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>.
18. Hyang J. C. K. The thermal bar // Geophysical Fluid Dynamics. 1972. V. 3. P. 1–25.
19. Isaev A. V., Ryabchenko V. A., Konik A. A. Reproduction of the current climatic state of the Lake Ladoga ecosystem // Fundamental and Applied Hydrophysics. 2024. V. 17. No. 2. P. 50–65. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(2\)-5](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(2)-5).
20. Lind P., Belušić D., Médus E. et al. Climate change information over Fenno-Scandinavia produced with a convection-permitting climate model // Climate Dynamic. 2023. V. 61. P. 519–541. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06589-3>.
21. Malm J., Grahn L., Mironov D., Terzhevik A. Field investigation of the thermal bar in Lake Ladoga, spring 1991 // Hydrology Research. 1993. V. 24. No. 5. P. 339–358. <https://doi.org/10.2166/nh.1993.12>.
22. Malm J., Mironov D., Terzhevik A., Jonsson L. Investigation of the spring thermal regime in Lake Ladoga using field and satellite data // Limnology and Oceanography. 1994. V. 39. No. 6. P. 1333–1348. <https://doi.org/10.4319/lo.1994.39.6.1333>.

Features of formation and interannual variability of Ladoga Lake spring thermal bar in 2016–2022

A. A. Konik¹, A. V. Zimin^{1,2}, O. A. Atadzhanova¹, A. V. Isaev¹

¹ Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: konikrshu@gmail.com

² Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia

The thermal bar is a seasonal thermal frontal zone that forms during the spring and autumn in Lake Ladoga, the largest dimictic lake in Europe. Characterized by strong horizontal temperature gradients, the thermal bar significantly influences the development of stratification, background circulation, and generation of mesoscale eddies. This study aims to assess physical and geographical characteristics and key factors driving the variability of spring thermal bar in Lake Ladoga based on long-term satellite-derived surface temperature data from MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) and VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) sensors for the period from May to June 2016–2022. Our analysis reveals a systematic southward displacement of the lake's primary thermal front in June compared to its historical climatological position, alongside a steady increase in the extent of the thermally active zone in recent years. The main drivers of this spatial-temporal variability are winter cooling intensity, intra-seasonal atmospheric temperature anomalies, and the structure of atmospheric circulation patterns, as captured by the Scandinavian index (SCAND). Furthermore, the variability of eddy activity correlates with periods of minimum and maximum thermal bar extent, highlighting a strong link between the timing of stratification onset and lake-wide circulation dynamics.

Keywords: thermal bar, front, eddies, satellite temperature, Aqua, Terra, Suomi NPP, SCAND, Lake Ladoga

Accepted: 22.07.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-264-273

References

1. Blokhina N. S., Pokazeev K. V., Unique natural phenomenon — thermobar, *Zemlya i Vselennaya*, 2015, No. 6, pp. 78–88 (in Russian).
2. Zimin A. V., Atadzhanova O. A., Blagodatskikh E. A. et al. (2024a), Submesoscale eddy structures of Lake Ladoga according to Sentinel-1 radar data for a warm period of 2019–2022, *Doklady Earth Sciences*, 2024, V. 514, No. 2, pp. 296–300, <https://doi.org/10.1134/S1028334X23602742>.
3. Zimin A. V., Atadzhanova O. A., Konik A. A., Isaev A. V. (2024b), Submesoscale eddies in Lake Ladoga based on Sentinel-1 radar images from January to December 2016–2022, *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2024, V. 17, No. 4, pp. 43–54 (in Russian), [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(4\)-3](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(4)-3).
4. Korosov A. A., Pozdnyakov D. V., Filatov N. N. et al., A satellite data-based study of seasonal and spatial variations of some ecoparameters in Lake Ladoga, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2006, No. 5, pp. 76–85 (in Russian).
5. Kulikov I. V., Yakovleva T. V., Mikhalyuk T. Yu., Areal distribution of the main technogenic components in Lake Ladoga, In: *Evolutsiya prirodnikh obstanovok i sovremennoe sostoyanie geosistemy Ladozhskogo ozera* (Evolution of the phenomena of the environment and the current state of the geosystem of Lake Ladoga), N. N. Davydova, B. I. Koshechkin (eds.), Saint Petersburg: Izd. RGO, 1993, pp. 36–48 (in Russian).
6. *Ladozhskoe ozero i dostoprimechatel'nosti ego poberezh'ya: Atlas* (Lake Ladoga and the sights of its coast: Atlas), V. A. Rumyantsev (ed.), Saint Petersburg: Nestor-Istoriya, 2015, 200 p. (in Russian).
7. Mikhailov V. V., Sutyryna E. N., Antonova T. I., Study of the characteristics of the spring thermobar in the largest bays of Lake Baikal according to remote satellite sensing data, *Aktual'nye issledovaniya*, 2021, No. 31(58), pp. 17–20 (in Russian).
8. Naumenko M. A., Guzivaty V. V., Karetnikov S. G., Variability of the horizontal gradients of the air and the water surface temperatures in the vernal frontal zone period of Lake Ladoga, *Oceanology*, 2012, V. 52, No. 6, pp. 735–740, <https://doi.org/10.1134/S0001437012060082>.
9. Naumenko M. A., Karetnikov S. G., On the speed of movement of the spring thermal frontal zone in Lake Ladoga, *Meteorologiya i gidrologiya*, 1998, No. 4, pp. 107–115 (in Russian).

10. Pishchal'nik V. M., Romanyuk V. A., Minervin I. G., Batukhtina A. S., Analysis of dynamics for anomalies of the ice cover in the Okhotsk Sea in the period from 1882 to 2015, *Izvestiya TINRO*, 2016, V. 185, pp. 228–239 (in Russian).
11. *Sovremennoe sostoyanie i problemy antropogennoi transformatsii ekosistemy Ladozhskogo ozera v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata* (Current state and problems of anthropogenic transformation of the ecosystem of Lake Ladoga in the context of changing climate), S. A. Kondrat'ev, Sh. R. Pozdnyakov, V. A. Rummyantsev (eds.), Moscow: Izd. RAN, 2021, 640 p. (in Russian).
12. Sutyryna E. N., A study of the peculiarities of the lake Hovsgol ice-thermal regime using AVHRR data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, V. 11, No. 1, pp. 190–199 (in Russian).
13. Tikhomirov A. I., *Termika krupnykh ozer* (Thermals of large lakes), Leningrad: Nauka, 1982, 232 p. (in Russian).
14. Filatov N. N., The modern state and perspective investigations of hydrophysical processes and ecosystems of inland waters (a review), *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2019, V. 12, No. 1, pp. 3–14 (in Russian), <https://doi.org/10.7868/S2073667319010015>.
15. Bardin M. Yu., Platove T. V., Samokhina O. F., Extreme heat waves and extreme summer seasons in European Russia, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2024, V. 49, No. 6, pp. 467–481, <https://doi.org/10.3103/S1068373924060013>.
16. Groisman P., Shugart H., Kicklighter D. et al., Northern Eurasia Future Initiative (NEFI): facing the challenges and pathways of global change in the twenty-first century, *Progress in Earth and Planetary Science*, 2017, V. 4, Article 41, 48 p., <https://doi.org/10.1186/s40645-017-0154-5>.
17. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al., ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present, Copernicus Climate Change Service (C3S), *Climate Data Store (CDS)*, 2023, <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>.
18. Hyang J. C. K., The thermal bar, *Geophysical Fluid Dynamics*, 1972, V. 3, pp. 1–25.
19. Isaev A. V., Ryabchenko V. A., Konik A. A., Reproduction of the current climatic state of the Lake Ladoga ecosystem, *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2024, V. 17, No. 2, pp. 50–65, [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(2\)-5](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(2)-5).
20. Lind P., Belušić D., Médus E. et al., Climate change information over Fenno-Scandinavia produced with a convection-permitting climate model, *Climate Dynamic*, 2023, V. 61, pp. 519–541, <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06589-3>.
21. Malm J., Grahm L., Mironov D., Terzhevik A., Field investigation of the thermal bar in Lake Ladoga, spring 1991, *Hydrology Research*, 1993, V. 24, No. 5, pp. 339–358, <https://doi.org/10.2166/nh.1993.12>.
22. Malm J., Mironov D., Terzhevik A., Jonsson L., Investigation of the spring thermal regime in Lake Ladoga using field and satellite data, *Limnology and Oceanography*, 1994, V. 39, No. 6, pp. 1333–1348, <https://doi.org/10.4319/lo.1994.39.6.1333>.